

DOI: 10.5846/stxb201907161502

韩雪, 梁璇, 王倩. 中国主要农产品虚拟要素贸易网络结构特征分析. 生态学报, 2020, 40(11): 3851-3865.

Han X, Liang X, Wang Q. Analysis on the structure characteristics of virtual elements trading network in major crops trade of China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3851-3865.

中国主要农产品虚拟要素贸易网络结构特征分析

韩 雪^{1,*}, 梁 璇¹, 王 倩²

1 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

2 辽宁师范大学数学学院, 大连 116029

摘要: 据虚拟水概念定义虚拟要素, 并将其划分为虚拟资源要素和虚拟生态要素两类, 选取虚拟资源要素中的耕地要素和虚拟生态要素中的化肥/农药要素为研究对象, 定量分析 2002—2016 年以粮食贸易为载体的虚拟耕地、虚拟化肥/农药要素的贸易量, 构建虚拟要素贸易网络, 通过复杂网络的研究方法, 结果表明: 2002—2016 年我国主要农产品虚拟耕地、化肥/农药要素的贸易总量呈下降趋势, 降幅分别约 25.51%、8.01%; 虚拟耕地要素网络节点入度较大的为长江中下游、华南、西南地区, 出度较大的为黄淮海和东北地区, 虚拟化肥/农药要素网络与之相反; 地区间节点强度的差异性大, 虚拟耕地要素差值最大可达 1459.56 万 hm^2 , 虚拟化肥/农药要素达 61.38 万 t; 二者网络节点度和强度的累积分布均符合幂律分布规律, 其尾部的“重尾”现象揭示了节点度和强度的高可变性以及网络结构的脆弱性; 虚拟耕地要素的输入区网络同配, 输出区网络异配, 揭示了地区间耕地要素的流动既呈集聚又有分散的态势, 虚拟化肥/农药要素网络节点相关性皆为减函数, 网络异配, 揭示了虚拟化肥/农药要素在八大区域间联通的状况。网络结构特征分析为研究网络抗毁性特征和网络的优化调控机制奠定基础, 为中国粮食贸易格局和粮价制定以及各个地区的农业种植结构调整提供理论依据。

关键词: 虚拟要素; 虚拟资源要素; 虚拟生态要素; 复杂网络; 网络结构

Analysis on the structure characteristics of virtual elements trading network in major crops trade of China

HAN Xue^{1,*}, LIANG Xuan¹, WANG Qian²

1 School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 School of Mathematic, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: We divide virtual elements into two types: virtual resource elements and virtual ecological elements. The virtual farmland elements represented the former and virtual fertilizer/pesticide elements represented the latter; these elements are selected as our research objects. We quantitatively analyzed the trade volume of the virtual elements to establish the trade network. Our research used complex network methods to focus on the total trade volume of virtual farmland and fertilizer/pesticide elements of major agricultural products in China from 2002 to 2016. The results showed downward trends of 25.51% and 8.01% for the farmland and fertilizer/pesticide elements, respectively. The areas of the virtual farmland network with a higher degree of in-node were the middle and lower reaches of the Yangtze River, South China, and Southwest China, while the areas with the higher degree of out-node were Huanghuaihai and Northeast China. The dynamics of the network of virtual fertilizer/pesticides show a clear opposite trend. The node strengths of the virtual elements varied greatly, with a maximum of 14.5956 million hectares and 613,800 tons for the farmland and fertilizer/pesticide elements, respectively. The cumulative distribution of both the node degree and node strength conform to a power law relationship; the

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41601118, 61702244)

收稿日期: 2019-07-16; 网络出版日期: 2020-03-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhan1982@hotmail.com

“heavy-tailed” phenomenon reveals a high variability of node degree and node strength and the fragility of the network structure. The network of input areas of virtual farmland element are assortative and the output areas are disassortative; specifically, the flow of virtual farmland between regions is both agglomerated and dispersed. The correlation degree of the virtual fertilizer/pesticide element network is a reduction function, and the network is disassortative; this indicates that the flow of virtual fertilizer/pesticide is close between the eight regions. The network structure analysis lays the foundation for studying the invulnerability, optimization, and control mechanism of the network while providing a theoretical basis for a pattern of the grain trade, the establishment of grain prices, and an adjustment of the agricultural planting structure in various regions of China.

Key Words: virtual elements; virtual resource elements; virtual ecological elements; complex networks; network structure

农产品贸易作为连接农业资源丰富和匮乏地区的纽带,不仅缓解了区域粮食供给的压力^[1],而且带动了一系列要素在区域间的流动。基于水资源要素在地区间的流动而提出的虚拟水贸易理论,为水资源安全管理提供了新思路^[2],对国际或区际间虚拟水贸易的量化研究,更使虚拟水贸易网络格局的分析成为热点^[3-5]。但虚拟水不能全面反映一个国家的资源稀缺状况^[6],由此启发了学者们对农产品贸易其他隐含要素的研究:首先,农业生产对于土地资源具有极强的依赖性,而耕地过度占用、非农化效率低和利益分配偏差等问题致使耕地潜在价值消失或被迫转移^[7],因此国内外学者开始将虚拟水理论扩展到土地资源配置中,罗贞礼在程国栋院士引入虚拟水的基础上率先提出虚拟土和虚拟土战略的概念^[8]。随后,关于虚拟土的研究被广泛延伸,集中在对虚拟土地资源量和潜力的核算与评估、虚拟土地资源流动的社会经济及环境影响的评价、虚拟土战略的可行性、虚拟土地贸易平衡博弈、虚拟土地资源进口影响因素及效应等方面^[8-10]。其次,虚拟资源流转分析的主线依托于人口-粮食-贸易的连接关系^[11],从虚拟水和虚拟土含义来看,虚拟资源都是指在商品和服务生产过程中所需要的资源数量,定量分析粮食贸易中隐含资源的流动,为农业节水和生态价值补偿提供依据。当前,水土资源是虚拟资源研究的主体,学者们多从宏观着手,分析粮食贸易所带来的虚拟水土资源的时空分布、流动格局和流量的动态变化,用以衡量地区资源供需现状,一定程度上为科学性调控资源提供了依据^[10],但实际上,虚拟水土战略因资源禀赋、经济社会状况、贸易条件和文化背景等的不同,导致的战略可行性广泛存在争议。再次,在虚拟生态要素研究方面,孙才志等^[12]将化肥、农药、农膜列为研究对象,量化了虚拟生态要素在国内外的贸易流动,指出了虚拟生态要素对不同区域,特别是调入区陆地自然生态系统的影响和经济损失等。该研究增加了农业生产过程中隐含危害因素的研究,考虑到了农业可持续发展的必要性,同时也拓宽了隐含要素研究的范围。农业可持续不仅要求在农业生产过程中注重生产、经济效益和社会效益,还着重资源节约、生态维护、环境保护,粮食贸易中隐含要素的流动值得关注。因此,根据虚拟水、虚拟土地资源与虚拟生态要素研究成果,本文定义虚拟要素概念为隐含在农产品生产和流通过程中的各类要素,如水、土、人力、农业器械、农药和化肥等要素,并进一步将其划分为虚拟资源要素和虚拟生态要素两类。

复杂网络几乎随处可见,如万维网、互联网、无线通讯网络、电力网络、大规模集成电路等,这些网络与我们的生活息息相关,因此复杂网络作为一种科学研究手段,在理论上和现实世界中倍受关注^[13-15],其起源于1961年Erdős和Rényi^[16]对于随机图的研究。自复杂网络的小世界特征和无标度特征被发现^[17],极大地推动了复杂网络研究的发展,被广泛应用到图论、计算机、生物学、社会学、管理学等领域^[18-20],学者们对复杂网络的结构、功能、动力学行为等进行了深入的研究和探讨,用以测定网络特性和模拟最优网络结构等,使其逐渐成为一门热点交叉学科。节点度作为网络拓扑结构的第一表征,可以简单地反映节点在网络中的重要性^[21-22],即一个地区在我国主要农产品虚拟要素贸易网络中的地位。节点强度作为网络链路中的附加信息,反映了节点间的不同特征。由节点度引申的度相关性的计量,更是可以细致的反映出节点间的贸易关系,折射出我国虚拟要素贸易网络的框架。本文引用复杂网络的相关研究,依据贸易量赋予网络权重,定量分析中国主要农产品虚拟耕地要素和虚拟化肥/农药要素贸易网络的特征及其稳定性,揭示粮食贸易中要素的真实

流动情况,衡量地区间贸易关系,为科学性调控资源、分析贸易格局安全及所带来的生态环境问题提供依据,为地区间贸易调控和未来网络的结构优化做铺垫。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 虚拟要素贸易量计算

本文根据中国八大区域主要农产品的贸易量推算虚拟要素的贸易量,参考公式如下:

$$w_{ij} = \frac{N_{\text{总}}}{M_{\text{总}}} \times M_{ij} \quad (1)$$

$$w_{ji} = \frac{N_{\text{总}}}{M_{\text{总}}} \times M_{ji} \quad (2)$$

w_{ij} 表示 i 到 j 的虚拟要素输出量, w_{ji} 表示 j 到 i 的输出量, $N_{\text{总}}$ 代表全国范围内的耕地资源量或化肥与农药的总使用量, $M_{\text{总}}$ 代表全国主要农产品贸易量, M_{ij} 代表地区 i 到 j 的粮食贸易量, M_{ji} 与之相反。

1.2 复杂网络研究方法

复杂网络,是指具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络。本文构建了未加权有向网络 A_D 和加权有向网络 W_D [23-24],将参与粮食贸易的地区看作复杂网络中的节点,粮食的流动路径看做节点间的链路,路径中的虚拟要素的流量即为该链路的权重。复杂网络理论中涵盖了众多表现网络特征的指标,节点度和强度作为最基础和最典型的指标可以更直观的揭示各研究区域在网络中的重要性。其他指标如网络介数作为一个全局几何量,代表最短路径是否都经过该节点,反映了节点或者边在网络中的作用和影响力,强调节点的调节能力和中介调节效应等,但在实际应用中更侧重某点的控制力。再如刻画网络中节点间相互连边密集程度的网络密度,多用于测量社交关系网络中的密集程度以及演化趋势。因此选取节点度、节点强度、度相关性和强度相关性作为本文研究指标,以节点度和度相关性评价未加权网络的特征,节点强度和强度相关性评价加权网络的特征。因已知贸易的方向,又可将这四个指标分别细化为节点入度和出度;节点入度强度和出度强度;入度相关性和出度相关性,入度强度相关性和出度强度相关性。指标说明如下:

(1) 节点度

复杂网络的基本属性是节点度 (k_i),代表每个节点的链路(边)数,即与每个地区存在贸易关系的地区数。在未加权有向网络中,可将地区间的流动关系看做一个拓扑邻接矩阵 A_D ,因某一地区不存在与自身的贸易,所以主对角线元素 (a_{ii}) 为 0,矩阵中的其他元素 a_{ij} ,代表虚拟要素从地区 i 流向 j ,当 i 和 j 之间存在流动时, $a_{ij} = 1$,当 i 向 j 输出虚拟要素且 j 同时向 i 输出时, $a_{ij} = a_{ji}$,否则, $a_{ij} \neq a_{ji}$ 。节点的入/出度公式为:

$$k_{\text{in}_i} = \sum_i \sum_j a_{ji} \quad (3)$$

$$k_{\text{out}_i} = \sum_i \sum_j a_{ij} \quad (4)$$

k_{in_i} 表示节点 i 的入度,即当节点 i 作为输入区时,与之存在贸易关系的输出区的总数。 k_{out_i} 为 i 的出度,即节点 i 作为输出区,与之存在贸易关系的输入区的总数。

(2) 节点强度

节点强度 (s_i) 是指每个节点的链路权重,即虚拟要素在区际间的实际贸易量。在加权网络 W_D 中,矩阵元素 w_{ij} 和 w_{ji} 表示地区间的贸易量。因不考虑区域自身贸易, $w_{ii} = 0$;且因有向性, $w_{ij} \neq w_{ji}$ 。公式如下:

$$s_{\text{in}_i} = \sum_i \sum_j w_{ji} \quad (5)$$

$$s_{\text{out}_i} = \sum_i \sum_j w_{ij} \quad (6)$$

s_{in_i} 表示所有节点度为 k_{in_i} 的入度强度,即所有向地区 i 输入的虚拟要素的总贸易量。 s_{out_i} 为所有节点度为 k_{out_i} 的出度强度,即所有由地区 i 输出的虚拟要素的总贸易量。

(3) 度与强度的累积度

自然与社会网络中存在多种幂律分布现象^[25],许多世界网络的实证分析与拉伸指数 $P(K \geq x)$ 匹配,节点度和节点强度的累积度公式:

$$P(K \geq k) = 1 - \sum_{k=1}^k P \quad (K \geq k-1) \quad (7)$$

$$P(S \geq s) = 1 - \sum_{s=1}^s P \quad (S \geq s-1) \quad (8)$$

(4) 度相关性

度分布是网络的一个重要的拓扑特征,但具有相同度分布的两个网络可能具有不同的性质或行为^[26]。为进一步研究网络的拓扑结构,需要分析节点间的关系,即需研究网络的高阶拓扑特征-度相关结构^[13],本文通过平均近邻度 (k_{nn_i}) 来分析节点度的相关性。定义节点 i 的平均近邻度 k_{nn_i} ,得到度为 k 的所有节点的平均近邻度,

$$k_{nn_i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in V(i)} k_j \quad (9)$$

$j \in V(i)$ 表示节点 i 的 j 个存在贸易活动(不区分网络方向)的地区。 k_{nn_i} 通过先识别所有节点度为 k 的地区,再依次统计这些地区其邻域中的所有节点的度,最后通过 i 的节点度归一化。

因网络的有向性,平均近邻度可以细化为四个类别: $k_{nn_i}^{\text{in,in}}$, $k_{nn_i}^{\text{in,out}}$, $k_{nn_i}^{\text{out,in}}$ 和 $k_{nn_i}^{\text{out,out}}$,即入-入度相关性,入-出度相关性,出-入度相关性,出-出度相关性(参考公式 10—13),

$$k_{nn_i}^{\text{in,in}} = \frac{1}{k_{\text{in},j \in V_{\text{in}}(i)}} \sum a_{ji} k_{\text{in},j} \quad (10)$$

$$k_{nn_i}^{\text{in,out}} = \frac{1}{k_{\text{in},j \in V_{\text{in}}(i)}} \sum a_{ji} k_{\text{out},j} \quad (11)$$

$$k_{nn_i}^{\text{out,in}} = \frac{1}{k_{\text{out},j \in V_{\text{out}}(i)}} \sum a_{ij} k_{\text{in},j} \quad (12)$$

$$k_{nn_i}^{\text{out,out}} = \frac{1}{k_{\text{out},j \in V_{\text{out}}(i)}} \sum a_{ij} k_{\text{out},j} \quad (13)$$

公示上标中的第一个元素确定了节点 i 的邻域,第二个元素确定了其邻域中的节点的领域。如图 1 所示模拟了 $k_{nn_i}^{\text{in,out}}$ 的关系图,B、C 为 A 的输入区,D、E 和 F、G、H 分别为 B 和 C 的输出区,因此节点 A 的 $k_{nn_i}^{\text{in,out}}$ 值为 2.5。

k_{nn_i} 同样可以扩展到加权网络 W_d 中,节点 i 与其输入/出区之间的链路值(权重值)也存在度相关性,即在加权网络中,以地区间实际的虚拟耕地资源和生态要素流量来衡量贸易量差异情况下的地区间的连接性 $k_{nn_i}^w$ 。计算公式如下:

$$k_{nn_i}^{W(\text{in,in})} = \frac{1}{s_{\text{in},j \in V_{\text{in}}(i)}} \sum w_{ji} k_{\text{in},j} \quad (14)$$

$$k_{nn_i}^{W(\text{in,out})} = \frac{1}{s_{\text{in},j \in V_{\text{in}}(i)}} \sum w_{ji} k_{\text{out},j} \quad (15)$$

$$k_{nn_i}^{W(\text{out,in})} = \frac{1}{s_{\text{out},j \in V_{\text{out}}(i)}} \sum w_{ij} k_{\text{in},j} \quad (16)$$

$$k_{nn_i}^{W(\text{out,out})} = \frac{1}{s_{\text{out},j \in V_{\text{out}}(i)}} \sum w_{ij} k_{\text{out},j} \quad (17)$$

$k_{nn_i}^w$ 表明此处引入加权,公式(14—17)分别给出加

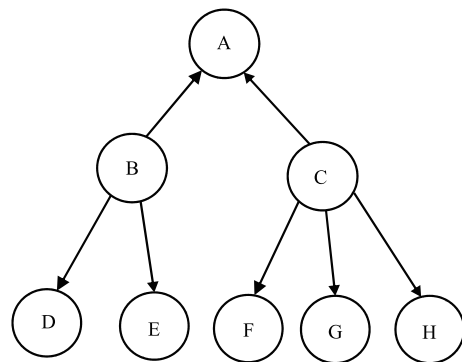


图 1 入-出度网络关系图

Fig.1 In-Out node degree of network

图 1 中的 A、B、C、D、E、F、G、H 分别代表虚拟要素网络中的一个节点,即某一个地区

权网络的入-入度,入-出度,出-入度,出-出度相关性计算公式,遵循等式(10—13)中的符号,并用 s_{in} 或 s_{out} 归一化。

1.3 数据来源

在研究中国虚拟资源空间格局的惯用方法中,常将全国 31 个省(尚未统计中国台湾、中国香港和中国澳门)划分为八大或九大大区域进行分析。本文根据中国虚拟水贸易研究中采用的区划方法^[27],即将中国的 31 个省、市及自治区划分为八大区域,即:华北(京、津、晋)、东北(黑、吉、辽、蒙)、黄淮海(冀、豫、鲁、皖)、西北(陕、甘、宁、青、新)、东南(沪、浙、闽)、长江中下游地区(苏、鄂、湘、赣)、华南(粤、桂、琼)和西南(渝、川、黔、滇、藏)。本文选取稻谷、小麦和玉米作为研究对象,对大豆贸易产生的虚拟要素的流动忽略不计。稻谷、小麦和玉米产量数据、化肥和农药使用量数据均来源于《中国统计年鉴》(2003—2017 年)和《中国农村统计年鉴》(2003—2017 年)。

2 结果分析

2.1 虚拟耕地要素贸易复杂网络结构分析

根据公式 1 及参考文献^[28]计算中国区际间主要农产品虚拟耕地要素贸易量并绘制网络图(图 2 仅给出 2016 年)。由图 3 可以看出,中国虚拟耕地要素贸易量整体呈下降趋势,降幅约 25.52%,这与中国耕地非农化趋势密切相关;其中 2006—2007 年以及 2011 年受世界谷物价格大幅上涨的影响,以粮食贸易为载体的虚拟耕地要素的贸易量有明显的回升;2008 年的金融危机以及 2012 年由发达国家蔓延的经济不景气现象,致使我国粮农市场受波动,相应的虚拟耕地要素的贸易量明显下降。中国虚拟耕地要素贸易网络的结构变动较小,多数地区间的贸易关系较为稳定,如东北、黄淮海地区是虚拟耕地要素长期而稳定的净输出区,长江中下游、华南和西南是净输入区;网络中链路的生成与消亡并存,如 2005 年长江中下游→黄淮海的链路消失,华南→西南的链路生成;链路中贸易量的差异和变化明显,贸易量差值最大可达 1459.56 万 hm^2 ,西南→西北由 2002 年的约 624.7 万 hm^2 下降到 2016 年的约 188.8 万 hm^2 ;八大区域网络的最大流量是:黄淮海地区→长江中下游地区。中国主要农产品虚拟耕地要素贸易网络的格局表现为由经济较不发达北方地区流向较为发达的南方地区,这与中国经济发展中资源配置的长期流向吻合,对于主要的输入区来说,缓解了当地因耕地资源紧缺粮食自给能力不足的现象,且为第二、三产业的发展提供稳定的支撑。但对于主要的输出区来说,因耕地生态效益不受重视^[29-31],势必造成输出区的“效益亏损”,尤以华北、黄淮海地区为重,且有碍于当地的产业调整与布局的合理。

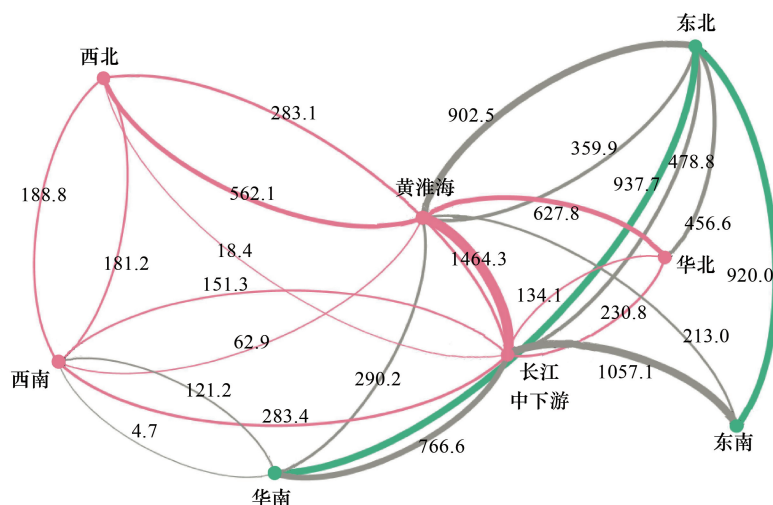


图 2 2016 年中国虚拟耕地要素贸易网络图

Fig.2 The virtual farmland element trade network in China of 2016

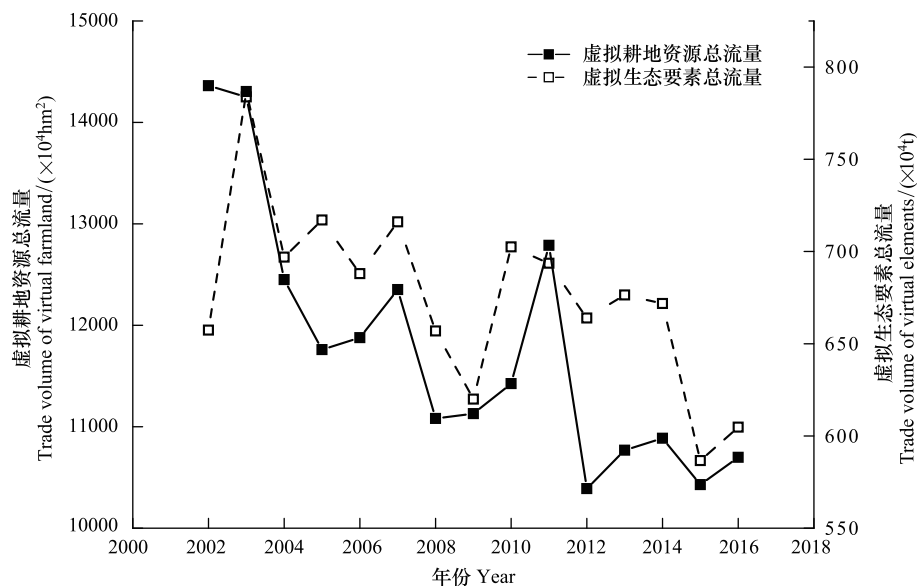


图3 2002—2016年中国主要农产品虚拟要素贸易量

Fig.3 China's major agricultural products trade volume from 2002 to 2016

(1) 虚拟耕地要素贸易复杂网络的节点度分析

节点度作为节点在拓扑网络中的基本属性,可以简单的反映出节点在网络中的重要性,节点的出入度更是可以反映出网络连接的异质性。根据公式(3—4)计算虚拟耕地要素网络各节点度,结合图2可知2002—2016年中国虚拟耕地要素贸易网络节点的入度值在0—5之间,度值较高的区域包括长江中下游、华南和西

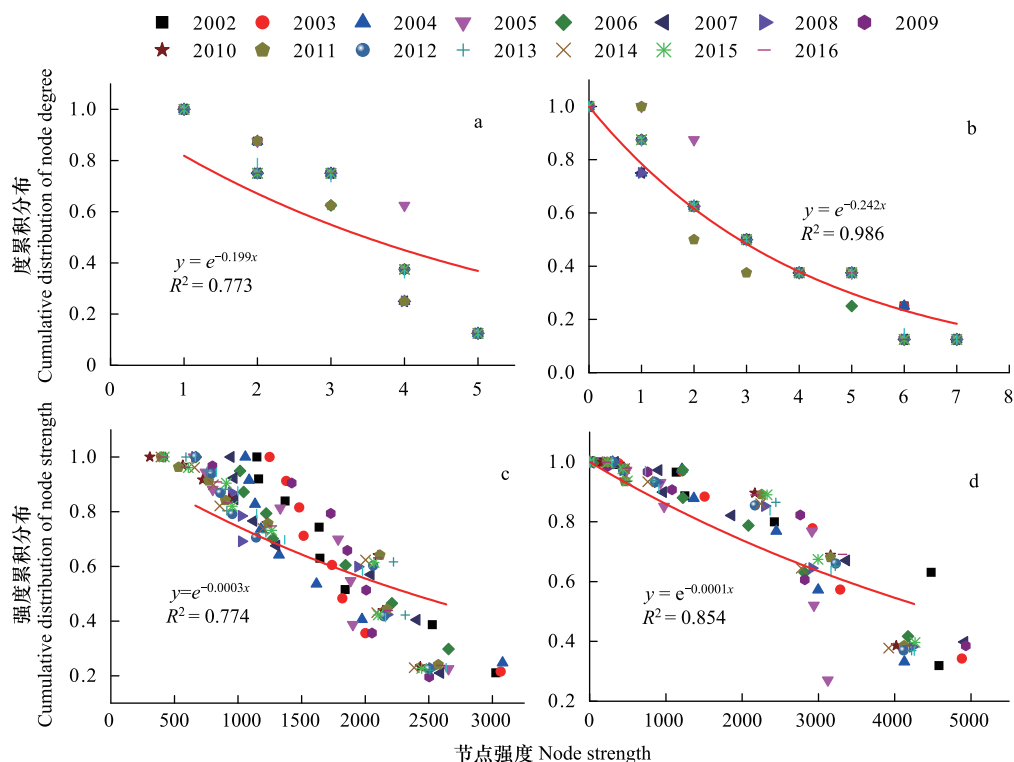


图4 2002—2016年中国虚拟耕地要素贸易网络节点度和强度累积分布

Fig.4 The cumulative distribution of the node degree/strength of virtual farmland element trade network in China form 2002 to 2016

南;出度值在 0—7 之间,度值较高的区域包括东北、黄淮海和长江中下游。根据公式 7 计算中国虚拟耕地要素贸易网络节点度的累积分布(如图 4a、b 所示),将节点入度分布与指数 $P(K \geq x) = e^{-\lambda x}$ 拟合,基本符合幂律分布,网络的节点度更具有多样性,且其尾部呈“重尾分布”。重尾分布的流量具有以慢速度收敛到稳态和在稳态处表现出高可变性^[32]。以节点度作为参数可见 k_{in} 的尾部比 k_{out} 的尾部要“胖”,即 k_{in} 比 k_{out} 的重尾分布现象更明显, k_{in} 以更慢的速度收敛到稳态并表现出高可变性,这说明在虚拟耕地资源的输入区,其节点度分布更具有多样性,输出区链路数量的变化,将会极大得影响输入区贸易的稳定性。如东北、黄淮海和长江中下游地区分布有中国著名的商品粮基地,在充分满足本地需求的情况下,每年稳定地向华南地区输出虚拟耕地资源,若因自然灾害或人为活动致使某一输出链路中断,将会对作为主要输入区的华南地区造成很大的影响。

以节点的入/出度为变量,节点累积分布遵循幂率关系。图 4 分别给出中国虚拟耕地要素贸易网络的节点入度、出度的累积分布(多数年份分布情况类似,存在较多图标的叠合,但不影响对于累积分布走势的表现),采用均值拟合累积度的幂率分布, R^2 值在 0.7 以上,拟合效果较好。

(2) 虚拟耕地要素贸易复杂网络的节点强度分析

在加权网络中,节点被与之有关的链路赋予权重而具有了质量意义,将数据与拉伸指数拟合($P(S \geq s) = e^{-\lambda s}$),节点强度的累积分布如图 4c、d 所示,可知入度强度在 0—3250 之间,出度强度在 0—5250 之间。对比图 4a、b 发现,网络赋权后增加了系统的异质性,累积度分布发生明显的变化。加权网络累积度分布 s_{out} 和 s_{in} 比未加权 k_{in} 和 k_{out} 的尾部要“胖”,表明地区间虚拟耕地要素贸易量差异很大。另 s_{out} 比 s_{in} 的尾部更胖,这种重尾分布现象也说明了虚拟耕地资源输出区的贸易量具有很强的突变性,若输出区贸易量发生急剧的变化,整个网络的稳定性受到冲击,作为贸易承接区的输入区会因供给量的变化造成正常社会经济活动的扰乱。

节点度作为网络拓扑中心性的第一近似,其与节点强度的关系也值得探讨。以节点度为变量,节点强度为因变量,二者的线性关系如图 5 所示,可见节点强度有随节点度的增加而增加的趋势,遵循 $S_{in}(k_{in}) - k_{in}^{\beta_{in}}$ 和 $S_{out}(k_{out}) - k_{out}^{\beta_{out}}$ 形式的变量关系。在中国主要农产品虚拟耕地要素贸易网络中,参数 β_{in} 约为 374.54,参数 β_{out} 约为 664.73,一方面,这些高 β 值表明当网络附加权重后,虚拟耕地要素贸易量和贸易区数量存在明显的正比关系,即贸易区数量越多,其带动的虚拟耕地要素贸易量越大。因此对于虚拟耕地要素的净输入区来说,其输入区的数量越多,其虚拟耕地要素的输入量也越多,表明可以通过贸易的方式弥补当地耕地资源紧缺以及粮食供给不平衡的现象。但对于输出区而言,耕地的生态效益外部化趋势不可逆转,长期的贸易关系可能导致输出区愈加严重的生态效益亏损现象,因此目前的贸易格局和粮价高低是否合理,是我国必须面对的问题。另一方面, β_{out} 远大于 β_{in} ,表明虚拟耕地要素的输出区因链路消长而发生贸易量变动的程度更大,其贸易量的变动将会直接影响输入区的虚拟耕地资源的供给量,加大输入区虚拟耕地资源供给的不稳定性,可能导致当地产业结构的变动和社会经济的发展。

图 5 给出中国虚拟耕地要素贸易网络的节点入度强度、出度强度随节点度数的消长关系,图中散点代表不同年份对应节点的虚拟耕地要素贸易量,采用均值拟合了节点度与强度的线性关系。

(3) 虚拟耕地要素贸易复杂网络的度相关性分析

通过公式(10—13)可知 $k_{nn}(k)$ 是 k 的函数,那么度相关性可以通过函数 $k_{nn}(k)$ 的单调性分析:若 $k_{nn}(k)$ 是无单调性,则节点间联系不大;若 $k_{nn}(k)$ 是增函数,则网络是同配网络,度值大的节点倾向于与度值大的节点联系,度值低的倾向于与度值低的联系;若 $k_{nn}(k)$ 是减函数,则网络是异配网络,高节点度的节点倾向于与低节点度的节点连接。

结合公式(10—17)得出中国虚拟耕地要素贸易网络的度相关性(图 6 所示),实线代表未加权网络 A_d 的度相关性特征,虚线代表加权网络 W_d 的度相关性特征。由图 6 可知在未加权网络中,除节点的入—入度和入—出度相关性在节点 3 处发生波动外,节点度相关性的波动均较小,这是因为华北、东南、西南、西北地区常年保持为 3 的入度值,其各自的输入区又与其他地区产生较多的贸易关系;在加权网络中,节点强度相关性的变动较大,这与地区间虚拟耕地要素贸易量的多样化有关。从整体上看,节点的入—入度、入—出度相关性为

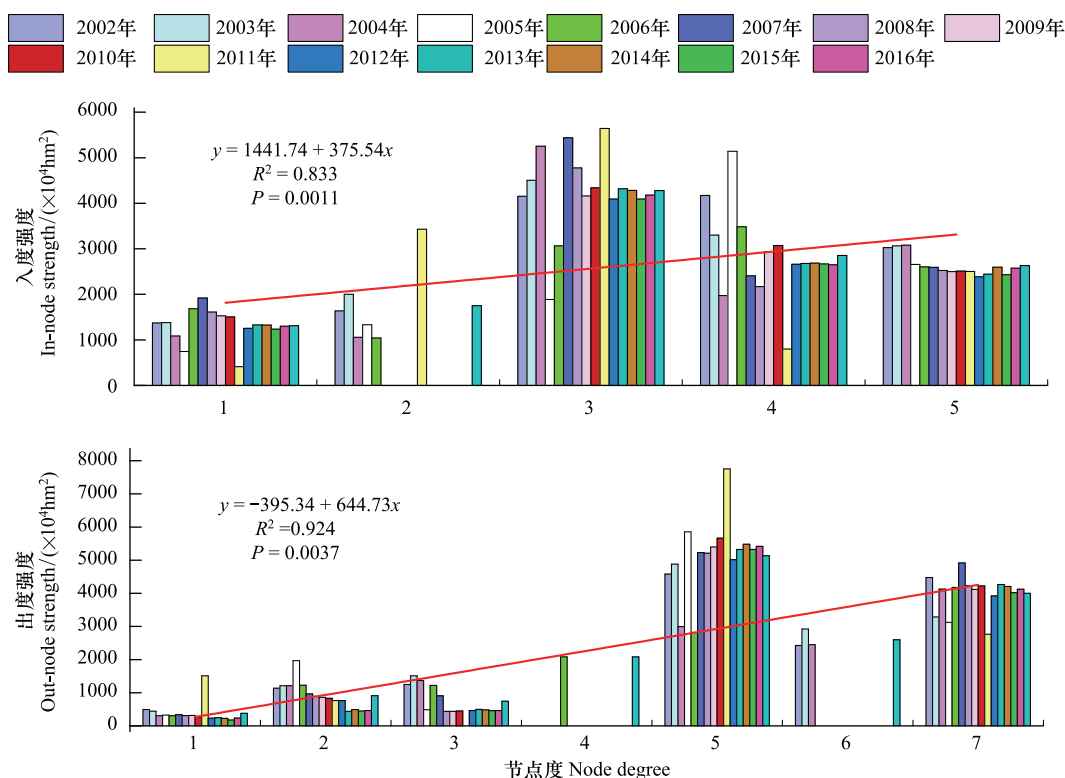


图5 2002—2016年中国虚拟耕地要素强度

Fig.5 The in/out node strengths of virtual farmland element trade network in China from 2002 to 2016

增函数,网络为同配网络,节点度大的地区倾向于与度大的地区联系,贸易量多的地区倾向于与贸易量多的地区联系,如长江中下游和华南地区作为虚拟耕地资源重要的输入区,节点入度值分别为5和4,二者年输入量均高达2000多万 hm^2 ,且互相保持着稳定的贸易联系。可见在中国虚拟耕地要素输入区的网络中存在一种“集聚效应”,高节点度的地区相互联系,使贸易活动频繁的地区获得更多的要素输入,贸易结构可能存在单一化的问题。节点的出一入度、出一出度相关性整体上为减函数,网络的同配结构分解,即在网络的输出区中,贸易区多的地区更可能与其它贸易区少的地区联系,贸易量大的地区更倾向于与贸易量少的地区联系,如黄淮海地区作为虚拟耕地资源重要的输出区,其节点出度为7,年输出量高达4000多万 hm^2 ,华南地区的出度值为1,年输出量仅约为8万 hm^2 ,其每年从黄淮海地区输入虚拟耕地要素约300多万 hm^2 ,网络的这种异配行为表明中国虚拟耕地要素贸易网络呈现出全国架构,其中高节点度的地区为周围低节点度的地区提供了连通性,这在一定程度上有利于虚拟耕地要素在地区间的流动以及网络结构的稳定性。

考虑到网络附加了权重之后结构发生变化,本文进一步分析拓扑网络和加权网络度相关性的差异。当 $k_{nn_i}^W > k_{nn_i}$ 时,具有较大权重的节点更倾向于连接具有较大度值的节点,当 $k_{nn_i}^W < k_{nn_i}$ 时,具有较大权重的节点倾向于连接具有较小度值的节点^[24]。由图6可知, $k_{nn_i}^W$ 均大于 k_{nn_i} ,表明在中国虚拟耕地要素贸易网络中,贸易量大的地区更可能与拥有较多贸易区的地区相联系,如2016年东北、华北、黄淮海、西北和西南地区向长江中下游地区输入虚拟耕地要素达2575.11万 hm^2 ,这5个输出区各自拥有5、3、7、3、4个贸易区。

2.2 虚拟生态要素贸易复杂网络结构分析

根据公式2计算中国区际间虚拟生态要素的贸易量(本文将虚拟化肥/农药要素简称为虚拟生态要素)。因耕地的非农化趋势,耕地面积不断缩减,化肥农药总使用量的减少,2002—2016年,中国主要农产品虚拟生态要素网络的总流量呈下降趋势(如图3所示),降幅约8.01%,受国内外市场以及政策实施的影响,网络的总贸易量出现了较为明显的波动。如在2003年、2007年和2011年,因国际粮农价格的大幅上涨,以农产品交

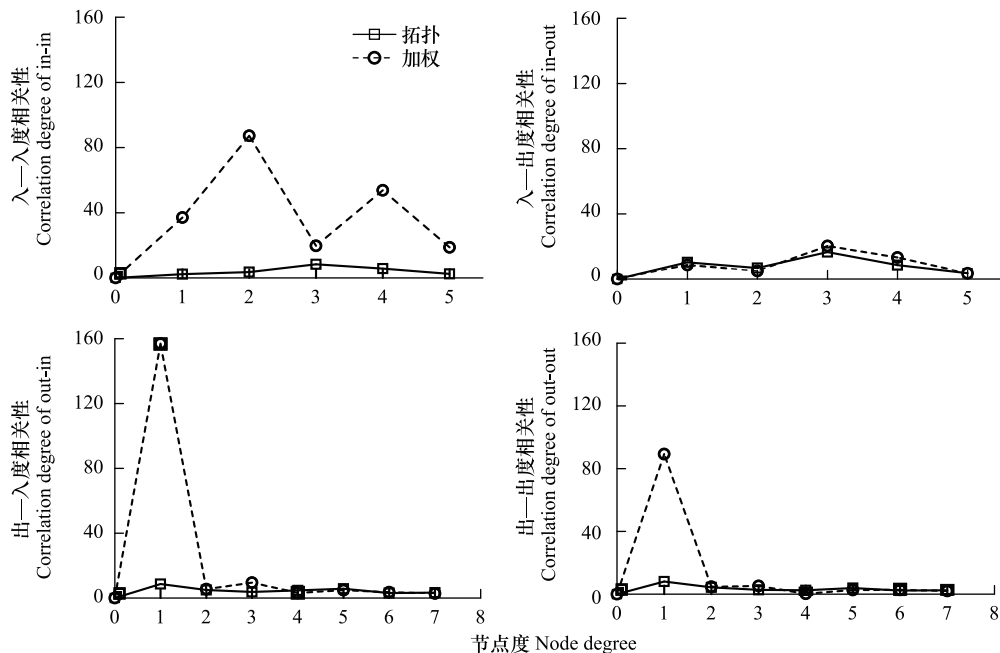


图6 2002—2016年中国虚拟耕地要素贸易网络度相关性

Fig.6 The correlation degree of the virtual farmland element trade network in China from 2002 to 2016

实线代表未加权网络的度相关性,虚线代表了加权网络度相关性特征(参考公式 10—17)

易量为基础的虚拟生态要素的贸易量明显上涨;2008 年全球金融危机背景下,我国农业市场也受到了很大的波动,农产品市场的疲软进而促使虚拟生态要素贸易量明显下降;2015 年农业部部署的化肥农药零增长行动^[33],也促使化肥其贸易量的明显下降。观其网络的结构图(如图 7,仅给出 2016 年),可见虚拟生态贸易网络的结构变动同样较小,地区间的贸易关系稳定,东北、黄淮海、长江中下游地区是主要的输入区,华南、东南、华北地区是主要的输出区;网络链路中的贸易量的异质性高,差值可达 61.38 万 t,网络中链路的生成与消亡并存,如华南向黄淮海地区输入的虚拟生态要素值从 2002 年的 39.8 万 t 增长到 2016 年的 95.9 万 t,向西北地区的输入由 0 增长到 29.1 万 t。对比虚拟耕地要素贸易网络可以发现其与虚拟生态要素贸易网络的流向呈相反的态势,表现为由经济较为发达的南方地区流向较为不发达的北方地区。

(1) 虚拟生态要素贸易复杂网络的节点度分析

根据公式(3—4)计算各节点度及结合图 7,可以看出 2002—2016 年我国虚拟生态要素流动网络的节点入度值在 0—7 之间,度值较高的区域为东北、黄淮海、长江中下游地区;出度值在 0—5 之间,度值较高的区域包括华南、东南、华北地区。图 8a、b 为中国虚拟生态要素贸易网络的节点度的累积分布,节点出度的累积分布 k_{out} 的尾部比入度累积分布的 k_{in} 要“胖”,即 k_{out} 比 k_{in} 的重尾分布现象更明显,节点出度值表现出高可变性。一方面,地区间虚拟生态要素的流动具有多样性,且某一地区往往会输出到众多地区,而只从少数地区输入虚拟生态要素。如 2016 年华南地区的输出区包括了东北、华北、黄淮海和长江中下游等 6 个地区,而该地区仅存在一个虚拟生态要素的输入区,即西南地区。另一方面, k_{out} 的重尾分布表明虚拟生态要素输出区的高可变性致使网络不稳定性加大,即输出区对输入区贸易关系的变动将会牵制整个网络的变化。对于虚拟生态要素主要的输出区来说,通过贸易可以将农业生态污染“外部化”,解决当地粮食问题的同时,减少农业活动对当地环境的压力。但是对于主要的输入区来说,虚拟生态要素随粮食贸易的“负向”流动,致使当地承担更重的环境压力。我国农业技术水平虽在改革开放后得到很大的发展,但是在高产利率的驱动下,我国成为世界上化肥农药投入最多的国家,加之农户群体农业生态环境保护的意识较差,相关政策法规的缺失和执行难度较大,化肥农药的过量使用,使输出区的生态环境遭进一步的破坏,土壤、水和大气污染愈加严重,土壤肥力下

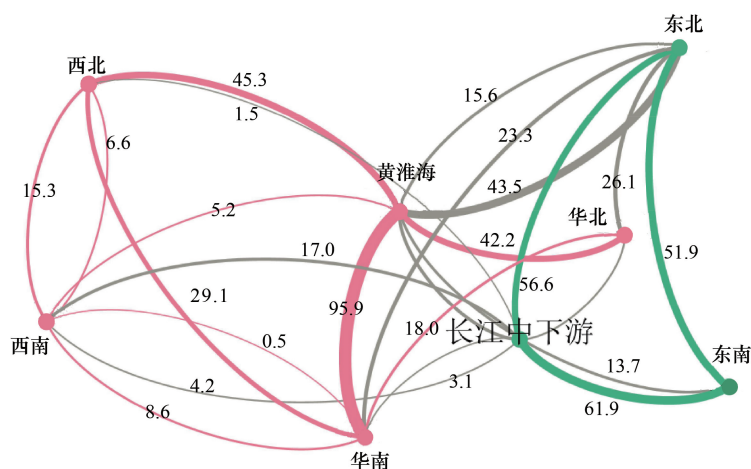


图7 2016年中国虚拟生态要素贸易网络图

Fig.7 The virtual ecological element trade network in China of 2016

降,农业减产,农业投入要素经历着报酬递减,进而影响到农业生产效率,这势必威胁到中国粮食安全以及社会经济的可持续发展。

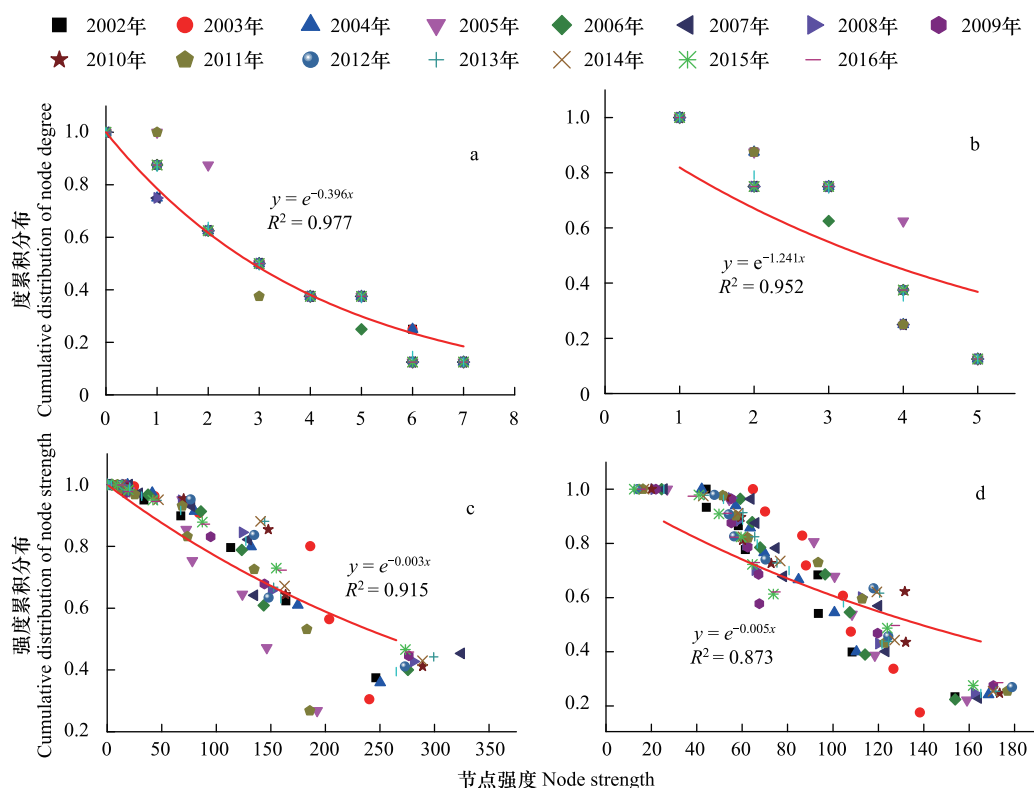


图8 2002—2016年中国虚拟生态要素贸易网络节点度和强度的累积分布

Fig.8 The cumulative distribution of the node degree/strength of virtual ecological element trade network in China form 2002 to 2016

(2) 虚拟生态要素贸易复杂网络的节点强度分析

根据公式(5,6,8)计算中国虚拟生态要素贸易网络节点强度的累积度分布(如图8c、d),可知入度强度在0—350之间,出度强度在0—190之间。网络赋权后节点入/出度强度的累积分布明显不同于节点度的累积

分布,入度强度累积分布 s_{in} 的尾部比出度强度累积分布 s_{out} 的要“胖”,作为虚拟生态要素主要输入区的地区,其贸易量比输出区的更具有多样性。 s_{in} 的重尾分布更为明显,表明虚拟生态要素主要输入区的贸易量更易发生变化,其对输出区贸易活动变动的响应更大,也就是说,从减少输入区农业生态污染的方面看,可以通过控制虚拟生态要素的输出量,从而有效减少对输入区的环境压力。在中国区际间虚拟生态要素贸易网络中,节点入/出度强度的参数 β_{in} 约为 41.48, β_{out} 约为 11.79,与虚拟耕地要素网络相比较小,节点入/出度与强度同样呈正比关系(图 9 所示),说明虚拟生态要素的来源地越多,其虚拟生态要素的贸易量越大,如 2015 年黄淮海地区从其他七大区域输入了约 273.29 万 t 的虚拟生态要素,将近占全国贸易量的一半,承担了全国虚拟生态要素重要输入区的角色。 β_{in} 明显大于 β_{out} 值,表明虚拟生态要素输入区因链路消长而发生的贸易量的变动更大,对于当地来说,若虚拟生态要素输入量的加大,将会进一步造成更为棘手的环境问题。

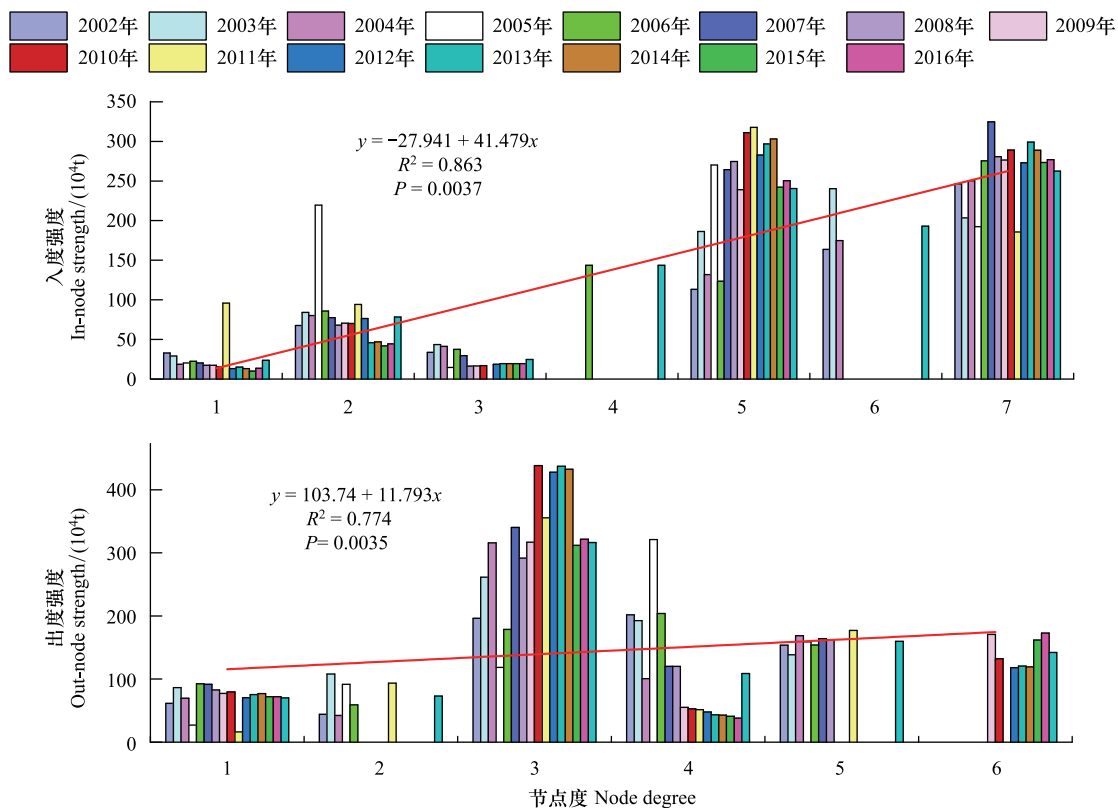


图 9 中国虚拟生态要素贸易网络入度/出度强度

Fig.9 The in/out node strength of virtual ecological element trade network in China from 2002 to 2016

(3) 虚拟生态要素贸易复杂网络的度相关性分析

根据公式(10—13)及(14—17)计算中国区际间主要农产品虚拟生态要素贸易网络的度相关性和强度相关性(如图 10),除节点入—入强度,入—出强度在度值为 1 处相关性较大外,虚拟生态要素贸易网络的度相关性波动较小,网络的度、强度的相关性特征都表现为异配,节点强度的加权属性并没有破坏网络的异配结构,即节点度大的地区更倾向于与节点度小的地区联系,贸易量大的地区更倾向于与贸易量小的地区联系,与虚拟耕地要素网络不同,该网络呈现出八大区域间联通的趋势,这说明我国虚拟生态要素的流动具有多地区联系的全国架构。因此在我国,虚拟生态要素的流动不仅影响着一个地区的农业生态环境的优劣,而且因地区间的密切联系制约到我国总体农业环境的状况。综合来看,虚拟要素贸易网络的流向与流量与我国经济发展格局以及资源配置的方向密切相关;东北、黄淮海地区为虚拟耕地要素的主要输出区,华南、西南地区是主要的输入区,长江中下游地区既是虚拟耕地要素重要的输出区,也是重要的承接区,这也从侧面反映出了长江

中下游地区在全国经济格局中的重要位置;华南、东南、华北是虚拟生态要素主要的输出区,东北、黄淮海、长江中下游地区是主要的输入区,其流向有与虚拟耕地要素相反的态势。

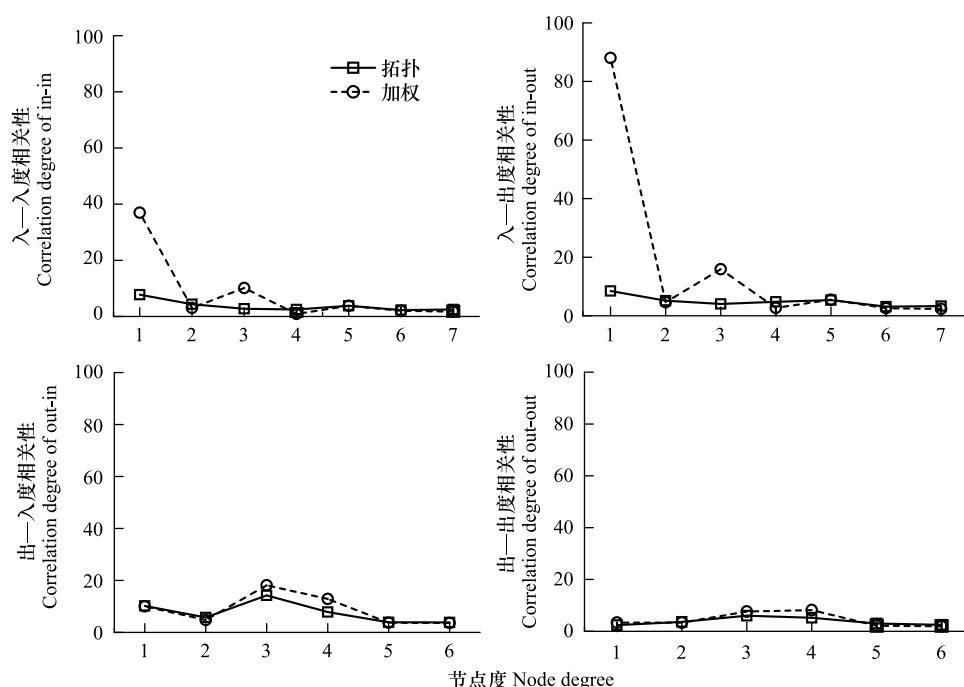


图 10 2002—2016 年中国虚拟生态要素贸易网络度相关性

Fig.10 The correlation degree of the virtual farmland element trade network in China from 2002 to 2016

3 结论

本文将复杂网络的分析方法应用于中国主要农产品虚拟要素贸易网络中,量化地区间的虚拟要素的贸易量,将复杂网络中的节点与网络中的地区相对应,并将链路中的流量赋予网络权重,分析了网络的总体特性,以及不同地区在整个网络中的位置和彼此间的作用关系。

在中国主要农产品虚拟耕地要素贸易网络中,随着耕地非农化趋势和总面积的减少,虚拟耕地资源贸易量整体呈下降趋势;我国耕地资源分布的北多(60%)南少(40%)和资源配置流向,决定了该网络在研究年份的结构变动较小,多数地区间的贸易关系较为稳定,东北、黄淮海地区分布有我国著名的商品粮基地,因此成为虚拟耕地主要的输出区,华南地区作为经济较为发达以及人口密集的地区,对粮食需求较大,西南地区由于其复杂而恶劣的地形限制,使这些地区成为主要的输入区,因此虚拟耕地资源长期表现为由经济较不发达的北方地区向经济较为发达的南方地区的流动;网络中链路的生成与消亡并存,长江中下游到黄淮海链路的消失,华南到西南链路的生成,一定程度上指示了经济发展、宏观调控和运输距离对全国粮食供给和需求格局变化的影响;链路中贸易量的差异和变化明显,网络中差值最大可达 1459.56 万 hm^2 ;节点度和强度分布的重尾现象,预示了虚拟耕地要素主要输出区数量和贸易量的变化,将会极大得影响到输入区贸易的稳定性。对于输入区来说,虚拟耕地输入可以缓解当地耕地资源紧缺导致的粮食自给能力不足的问题,虚拟耕地战略实施具有实际意义,但对于输出区来说,在耕地效益外部化和不被重视的现状下,长期的虚拟耕地要素输出会致使当地严重的“生态效益亏损”。

在中国主要农产品虚拟生态要素贸易网络中,随着耕地总量减少和化肥农药“零”增长活动的实施,虚拟生态要素总贸易量呈递减趋势;网络结构变动较小,但链路中的贸易量差异很大,差值可达 61.38 万 t;与虚拟耕地要素流向相反,虚拟生态要素大体上是由经济较为发达的南方地区流向经济较为不发达的北方地区,东

北、黄淮海、长江中下游地区是主要的虚拟生态要素的输入区,华南、东南、华北地区是主要的输出区。虚拟生态要素网络当前的贸易流向,将对生态环境构成很大威胁的要素,输入到主要粮食供应区(或者说滞留在这些地区),对当地生态环境尤其是土地资源,造成不可逆转的破坏;虚拟生态要素输出区节点度与强度的重尾分布,预示了输出区高可变性致使网络不稳定性加大的可能性,而贸易活动的密切使得虚拟生态要素贸易关系的变动将会牵制整个网络的变化;此外,节点相关度的异配特征指示了虚拟生态要素的流动呈现出区域间联通的趋势,意味着一个地区的农业生态环境的优劣变化将影响到我国总体农业环境的状况。

对比虚拟耕地要素和虚拟生态要素的网络结构,结果表明作为虚拟耕地要素主要输出区的地区,基本对应了虚拟生态要素主要输入的地区,如东北和黄淮海地区。对于虚拟耕地要素主要的输入区来说,地区间的粮食贸易不仅保障了当地的粮食供应需求,也通过粮食输入的方式从虚拟的角度节约了耕地资源,基本符合了虚拟耕地战略的初衷。而对于虚拟生态要素主要的输入区而言,因粮农市场不断扩大的需求,追求粮食高产而使化肥农药的使用量不断的升高,势必造成对当地农业生态环境的极大破坏,长此以往,土壤板结,空气与水源污染问题严峻。另外由于虚拟要素在全国范围内的流动,密切了地区间的联系,因此当主要的粮食供应区因长期的生态环境破坏致使其生产能力受损时,虚拟要素贸易网络结构可能被分解或破坏,这必然影响我国整体的粮食安全以及经济社会稳定发展。

4 讨论和政策启示

4.1 讨论

由粮食贸易引发的隐含要素在地区间的流动,不仅包括水资源,耕地资源,化肥/农药要素等自然要素的范畴,而且也包含了人文要素的内容,例如人力,交通,技术等多种要素的流动^[34]。本文将虚拟要素划分为虚拟资源要素和虚拟生态要素,因以粮食贸易为依托,要素间性质差异致使输入/出区的流向相反,网络拓扑结构转置。当再次引用节点度等指标表现其他虚拟要素贸易网络的拓扑结构时,以粮食贸易为依托的其他虚拟要素网络节点间的贸易关系不变,即网络链路的联通关系不变,网络特征很可能与上文两个网络相似,因此应更多关注其他要素网络的加权特征,即由实际贸易量赋权的网络结构,或是拓展虚拟要素研究至国民经济的其他行业。本文所用的复杂网络研究方法,涵盖很多表现网络特征的指标,节点度和强度作为网络最基础也是最典型的指标,具有简单表征网络特征的能力^[24],将更客观而科学的数学思维应用于虚拟水流动网络研究中,使地区间的关系和贸易量更直观,因此笔者认为该网络研究方法还可以拓展至其他学科研究中,或者与其他网络方法的结合,为地理学、生态学、交通网络或社交网络研究的发展提供新视角。另,通过研究发现节点度、强度、累积度分布以及度相关性并不受网络节点总数的影响,这些指标更注重刻画节点自身重要性和节点间的相互关系。与我国 31 省、市、自治区虚拟耕地要素和生态要素网络特征对比(篇幅限制并未给出)发现,网络特征包括节点累积度的幂率拟合、网络异配性质等,并未因节点多寡而改变,八大区网络分析结果可以客观反映上文二者网络的总体特征。

再者,本文与前有对我国八大区域间虚拟水贸易网络的研究^[27,35-36]衔接,将粮食贸易中隐含要素的量化相关联,着重对比和探讨网络结构特征,作为后续网络优化和调控工作的基础。因此今后的工作可以从网络拓扑结构和加权结构特征着手,深入研究网络节点间的制衡关系,网络链路的消长对网络连通性或网络效率的影响,即各地区要素贸易的关联性和链路变动对国民经济稳固运行的影响;研究网络在遭受突发人为或自然灾害时,网络的抗毁性特征,网络的预防和缓冲能力,尤其是当网络遭遇蓄意攻击时,各地粮食贮备量充足与否对于我国粮食安全供给的军事意义;利用网络的优化调控为我国各地区农业种植结构调整提供科学依据,探究我国粮食贸易格局的合理性、当前粮价高低以及我国农业生态环境恶化等问题。

另外,本文研究对象的选取具有一定局限。经统计,2003 年以来,中国稻谷、小麦、玉米的产量累积之和约占全国粮食总产量的 90%,成为中国主要的三大粮食作物,且稻谷、小麦和玉米主要靠国内区域间贸易,基本实现了自给自足,对外依存度较小,其进口量不足国内各区域贸易量的 1.2%,可忽略不计;而中国自 1996

年起便成为大豆净进口国,随着国内大豆产量的减少,大豆对外依赖程度高达 80% 以上,而在国内区际间贸易较少。从贸易占比决定了本文研究对象的选取,因此,选取稻谷、小麦和玉米作为中国主要粮食作物区际间贸易的代表,基本符合了研究要求。当然,虚拟要素贸易的研究势必不能仅考虑国内主要粮食作物,这存在将虚拟要素流动至于封闭网络研究的嫌疑。中国庞大的人口基数和不断增长的粮食需求,使粮食贸易中隐含要素的研究,不仅关乎国内粮食安全和经济发展的状况甚至可能影响到全球粮食安全和贸易稳定发展。

4.2 政策启示

一是明确虚拟要素属性的归类和划分,如水土资源、人力资源等属于积极要素投入,而化肥、农药或农膜等属于消极要素投入。在划分要素属性的基础上,根据每地农业种植结构、资源禀赋、耕作方式的不同,给定该地要素投入的类型。当前,国内虚拟资源(水、土、人力等)存在供求矛盾突出、农产品供求结构失衡、要素配置不合理等严峻问题,应以农业供给侧改革为主线,以乡村振兴为着眼点,围绕这些问题加大科技创新引领。二是根据虚拟资源贸易的初衷,适当调整对虚拟资源密集型产品的进口,这就要求国内积极主动创造良好的贸易环境。应统筹利用好国际和国内两种市场和两种资源,适应国际环境变化的新特点,积极做好调整和应对工作,要在“立足国内供给、适度进口调剂”的安全战略下,合理调整优化农产品供给结构,健全公平竞争的农产品进口市场环境,以减轻农产品进口不断扩大对农民生计的影响,实现虚拟资源进口最优化^[37]。三是灵活运用网络方法对未来农业种植结构调整和生态效益补偿方面的作用,重视网络方法在表征网络抗毁性和对网络结构优化调控的重要性。四是加强与“一带一路”沿线国家的农产品贸易合作。应贯彻落实新发展理念,深化农产品贸易体制机制的改革,实施多元化贸易策略,以“一带一路”建设为统领,将“一带一路”沿线国家作为农产品进口开拓的重要来源地,降低农产品的贸易集中依存度,以便实现优出优进,从进出口的角度缓解地区间经济效益和生态效益的空间异置、成本收益的空间异置等问题。

参考文献(References):

- [1] Huang H, Lampe M V, Tongeren F V. Climate change and trade in agriculture. *Food Policy*, 2011, 36(Suppl 1): S9-S13.
- [2] 程国栋. 虚拟水--中国水资源安全战略的新思路. *中国科学院院刊*, 2003, 18(4): 260-265.
- [3] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. *Priorities for Water Resources Allocation and Management*. London: ODA, 1993: 13-26.
- [4] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade// Hoekstra A Y, ed. *Value of Water Research Report Series No. 11*. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002: 13-15.
- [5] 刘雅婷, 王赛鸽, 陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算. *生态学报*, 2018, 38(6): 1930-1940.
- [6] Wichelns D. The role of 'virtual water' in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(2): 131-151.
- [7] 罗贞礼, 龙爱华, 黄璜, 徐中民. 虚拟水战略与土地资源可持续利用的社会化管理. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 624-631.
- [8] 强文丽, 刘爱民, 成升魁, 谢高地, 赵明洋. 中国农产品贸易的虚拟土地资源量化研究. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1289-1297.
- [9] 曹冲, 夏咏, 陈俭. 虚拟水视阈下中国重点大宗农产品贸易流的驱动因素研究--基于 LMDI 模型的再检验. *农业技术经济*, 2019, (8): 133-144.
- [10] Kastner T, Nonhebel S. Changes in land requirements for food in the Philippines: a historical analysis. *Land Use Policy*, 2010, 27(3): 853-863.
- [11] 赵菊勤, 张明军. 以粮食为载体的甘肃省虚拟资源流量计算. *干旱区研究*, 2009, 26(3): 447-451.
- [12] 孙才志, 汤玮佳, 邹玮. 中国粮食贸易中的虚拟资源生态要素估算及效应分析. *资源科学*, 2012, 34(3): 589-597.
- [13] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, Vespignani A. The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [14] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 刘之景, 严钢. 复杂网络研究概述. *物理*, 2005, 34(1): 31-36.
- [15] Costa L D F, Rodrigues F A, Traverso G, Boas P R V. Characterization of complex networks: a survey of measurements. *Advances in Physics*, 2007, 56(1): 167-242.
- [16] Erdős P, Rényi A. On the strength of connectedness of a random graph. *Acta Mathematica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1961, 12(1/2): 261-267.
- [17] 朱涵, 王欣然, 朱建阳. 网络“建筑学”. *物理*, 2003, 32(6): 364-369.

- [18] 吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征. 地理研究, 2015, 34(4): 711-728.
- [19] 向铮, 蔡小军, 曾苏. 基于复杂网络与代谢组学的中药药代动力学研究思考与探索. 药学报, 2012, 47(5): 558-564.
- [20] 许丹, 李翔, 汪小帆. 复杂网络理论在互联网病毒传播研究中的应用. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(3): 10-26.
- [21] 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述. 系统工程, 2005, 23(6): 1-7.
- [22] 史定华. 网络--探索复杂性的新途径. 系统工程学报, 2005, 20(2): 115-119, 210-210.
- [23] Barthélemy M. Betweenness centrality in large complex networks. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 163-168.
- [24] Konar M, Dalin C, Suweis S, Hanasaki N, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. Water for food: the global virtual water trade network. Water Resources Research, 2011, 47(5): W05520.
- [25] 胡海波, 王林. 幂律分布研究简史. 物理, 2005, 34(12): 889-896.
- [26] Suweis S, Konar M, Dalin C, Hanasaki N, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. Structure and controls of the global virtual water trade network. Geophysical Research Letters, 2011, 38(10): L10403.
- [27] 孙才志, 韩雪, 秦晓楠. 中国区际间主要农产品虚拟水流动格局稳定性. 地理研究, 2014, 33(3): 478-489.
- [28] 马静, 汪党献, Hoekstra A Y, 夏海霞. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用. 水科学进展, 2006, 17(1): 102-107.
- [29] 蔡运龙, 霍雅勤. 中国耕地价值重建方法与案例研究. 地理学报, 2006, 16(10): 1084-1092.
- [30] 李翠珍, 孔祥斌, 孙宪海. 北京市耕地资源价值体系及价值估算方法. 地理学报, 2008, 63(3): 321-329.
- [31] 任平, 吴涛, 周介铭. 耕地资源非农化价值损失评价模型与补偿机制研究. 中国农业科学, 2014, 47(4): 786-795.
- [32] 陈楚, 许勇, 张凌. 重尾分布对网络流量性质的影响. 计算机应用, 2009, 29(6): 1520-1522.
- [33] 宇菲. 化肥农药使用量零增长行动启动. 农业工程, 2015, (2): 97-97.
- [34] 韩雪, 孙才志. 中国主要农产品虚拟水流动格局形成机理研究. 资源科学, 2013, 35(8): 1567-1576.
- [35] 车亮亮, 韩雪, 秦晓楠. 基于 BP-DEMATEL 模型的农产品虚拟水流动影响因素分析. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1112-1119.
- [36] 韩雪. 我国农产品虚拟水流动格局分析及其应用. 水利经济, 2012, 30(6): 1-6.
- [37] 王云凤, 冯瑞雪, 郭天宝. 我国主要农产品的虚拟土地进口效益分析. 农业技术经济, 2015, (4): 26-35.