

**基于复杂网络视角的  
“一带一路”沿线国家粮食-能源-水关联关系研究**

**作品类别：**

学术论文类

**作者团队：**

汪艺晗 中国地质大学（北京） 大三

谭蕊 中国地质大学（北京） 大三

刘其芸 中国地质大学（北京） 大三

袁浩 中国地质大学（北京） 大三

**指导老师：**

杨谨 中国地质大学（北京）

## 摘要

在“一带一路”倡议下开展资源有效配置、环境可持续发展的农业合作是对于沿线各国经济建设的基础支撑。本文利用来自 UNcomtrade、FAOSTAT、Heekstra 等数据库的数据,综合构建了“一带一路”沿线 20 个国家的粮食贸易及其带来的虚拟水和隐含能源流转的复杂网络,同时应用相关网络指标,考察各国在网络中的地位 and 资源流转模式,分析网络中存在的社团结构。研究表明:(1) 俄罗斯的粮食对外贸易频繁且贸易量大,但是粮食贸易中虚拟水及隐含能源流转量小,进出口基本持平,这是由于其拥有先进的灌溉技术。(2) 印度、泰国等国家的粮食贸易伴随着大量隐含水能资源出口,这些国家农业部门均存在资源外流的现状。(3) 中国通过粮食贸易进口了大量水能资源,有效缓解了国内的资源压力。(4) “一带一路”沿线各国积极参与粮食国际贸易,研究国家的水能流转网络已分化出稳定的社团结构,社团内国家资源往来频繁,并存在辐射带动效应,粮食国际贸易能够明显促进水能资源在区域间的优化配置。本研究分析这些国家的粮食—能源—水关联关系,提出对于其农业用水和灌溉耗能高效利用的切实建议,为解决区域资源环境问题提供新的视角。

**关键词:** 粮食-能源-水关联关系; 复杂网络模型; 社团结构; “一带一路”沿线国家

## 第 1 章 引言

粮食,能源和水是维系社会环境可持续发展的关键因素。联合国将 2012 年和 2014 年世界水日的主题分别定为“水与粮食安全”和“水与能源”,充分表明了全球层面对粮食、水和能源的高度重视<sup>[1]</sup>。2011 年,德国联邦政府在波恩召开了“水—能源—粮食安全纽带关系”会议,会议中提出粮食、能源、水三种资源构成复杂的关联系统。世界经济论坛发布的《全球风险报告(第六版)》将“Water-Energy-Food Nexus”风险群作为三大重要风险群之一<sup>[2]</sup>。在全球人口增长、环境恶化、资源短缺、气候变化影响加剧的背景下,三者之间的内在关联和互动关系得到了国际广泛关注。

“一带一路”是一个旨在构建一个互惠互利的区域利益、责任和命运共同体的国家级顶层合作倡议,涉及 65 个沿线的国家和地区,其中总人口约 44 亿、经济总量约 21 万亿美元,分别占世界的 62%和 29%<sup>[3]</sup>。“一带一路”沿线各国拥有各自的优势资源禀赋,有较大的合作空间。其中,农业合作是“一带一路”倡议的重要组成部分。沿线农业资源丰富和贫乏的国家之间具有较强的贸易互补性,同时,大部分国家对解决饥饿问题、保障粮食安全有着强烈愿望和共同诉求<sup>[4]</sup>。虽然一部分沿线国家在农业资源上具有先天优势,农业总量大,资源丰富,但是在粮食国际贸易过程中,由于粮食市场结构不合理,传统优势粮食产品出口困难,出

口面临“绿色壁垒”等问题仍然不可避免<sup>[5]</sup>。

此外，粮食贸易过程中会带动粮食生产过程中消耗的水能资源流转，不够合理的农业贸易结构可能会使得隐含的淡水、能源等自然资源无法得到合理的配置。

“一带一路”沿线国家或地区水资源短缺且配置不平衡，各国需要加强区域合作来提高水资源配置效率<sup>[6]</sup>。在农业生产到消费的过程中，“一带一路”沿线众多国家的农业用水占用了过多水资源，导致这些国家用水矛盾突出，水生产率低。虽然增加农业灌溉有助于满足人口增长对粮食的需求，但农业灌溉使用了“一带一路”沿线国家约 80% 的淡水资源<sup>[7]</sup>。农业虚拟水对于各国水资源优化配置有重要的意义，它为水资源短缺或贫乏的国家和地区缓解其缺水问题提供一种可能途径，缺水国家例如中国、印度、巴基斯坦等可以通过进口水密集型商品、出口低耗水型商品来突破自身水资源禀赋的制约<sup>[8]</sup>。

农业部门对能源产品的消耗是能源资源配置问题研究中不可忽视的重要部分。“一带一路”沿线国家化石能源丰富，2015 年世界化石能源生产 113.9 亿吨油当量，“一带一路”沿线国家生产 69.27 亿吨油当量，贡献了 60.81%<sup>[9]</sup>。然而现阶段，大多数沿线国家能源利用效率低下。多数“一带一路”沿线国家为农业大国，在农业部门中，提水灌溉是化石能源的使用消耗的主要动因。由于灌溉设备的老化，维护不到位，一部分国家农业部门存在能源资源浪费严重的现状。核算分析粮食贸易中潜在的灌溉耗能输入输出情况，为解决能源资源配置问题提供了一个崭新的研究角度。

进行资源有效配置、环境可持续发展的农业贸易是“一带一路”沿线各国的共同愿景。在“一带一路”沿线各国，农业部门是水能资源使用的重要部门，而各国在通过粮食贸易来保障自身粮食需求的同时，往往忽略粮食贸易带来的资源重新配置的问题。研究粮食与水能资源间的耦合关系，能够为各国政府合理利用相关资源提供新的视角，并有效推动区域资源节约。因此，基于关联关系的视角，本文研究了“一带一路”沿线主要国家农业部门国际贸易过程中粮食作物贸易带动下的虚拟水、隐含能源流动格局，以期“一带一路”沿线各国经济环境政策的制定提供理论依据和有力参考。

## 第 2 章 文献综述

### 2.1 粮食-能源-水系统的耦合关系研究

国内外学者从不同角度对于粮食-能源-水系统中的任意两个要素之间的关联关系进行了大量研究。在粮食和水的关联的研究中，Khan 等基于全球视角，评估了粮食生产过程的水足迹<sup>[10]</sup>。基于水足迹的理论，Gheewala 等计算水分胁迫指数等指标评估了泰国 10 种主要作物用水现状<sup>[11]</sup>。通过脱钩指标的构建，于法稳对中

国 19 个主要粮食生产省份的粮食和灌溉用水的脱钩关系进行了系统性分析<sup>[12]</sup>。在全球倡导节能减排从而缓解气候恶化的大背景下，多数关于粮食和能源的研究围绕如何改进农业部门生产技术来实现更高的能源利用效率。例如 Xydis 等对郊区小型农业生产过程与风电系统的耦合关系进行了评估<sup>[13]</sup>。此外，立足于全球角度<sup>[14,15]</sup>、国家尺度<sup>[16-18]</sup>、流域尺度<sup>[19,20]</sup>以及城市尺度<sup>[21]</sup>，国内外学者对水和能源的关联关系进行了一系列的量化评估和案例分析。以美国为案例，Scott 等研究了当地水能耦合系统以及水能资源的管理模式，并进一步探索了气候变化对于水能系统的影响<sup>[22]</sup>。彭焜等结合投入产出和生态网络分析方法，分别构建了湖北省 2007 年和 2012 年的水能耦合网络，有效识别了当地水能管理的关键部门<sup>[23]</sup>。Siddiqi 和 Anadon 研究了中东和北非地区的水能耦合系统，并得出研究地能源生产系统对淡水的依赖性较弱，而淡水生产系统严重依赖于能源的结论<sup>[24]</sup>。

早期关于粮食-能源-水系统的绝大部分研究集中于对关联研究方法学的探索，如 Bassel 等提出了 WEF Nexus Tool 2.0 用于优化未来各发展情景下三种资源的分配<sup>[25]</sup>。基于粮食安全和农业可持续发展的角度，世界粮农组织(FAO)于 2014 年提出粮食—能源—水耦合决策框架<sup>[26]</sup>。此外，从水资源保护的角度出发，Lucia 等提出跨流域粮食、能源、水资源的协同管理方法<sup>[27]</sup>。2011 年，Bazilian 等建立了 CLEW 模型，为粮食-能源-水系统的定量研究奠定了基础。该模型综合考虑了多种农业、水文和能源领域的相关模型，例如 LEAP、WEAP、AEZ 等，用以量化三者之间的高度相关特征<sup>[28]</sup>。Sherwood 等核算了美国各城市的粮食产量以及一、二、三产部门的水和能源消耗量，并进一步研究其空间差异性<sup>[29]</sup>。综合考虑到 29 种食物，Vora 等核算了美国州际食品贸易间隐含的虚拟水，能源及温室气体的流转<sup>[30]</sup>。Ozturk 使用主成分分析法和广义矩量法考察了金砖四国地区长期可持续发展的粮食-能源-水关系，结果表明，能源短缺和水资源不足损害了金砖四国的粮食安全<sup>[31]</sup>。另外，一些学者关注于全球气候变化背景下，粮食-能源-水系统的演变和发展。Damerau 等探讨了气候变化可能引起的农业和能源部门的消费模式变化趋势，以及这些趋势对农业和能源部门的进一步影响和对全球水资源的影响<sup>[32]</sup>。使用 SWAT 模型，Armagan 等计算了相关指标来评估多瑙河流域生态系统气候变化对于保证食物、水和能源安全的作用<sup>[33]</sup>。Yang 等提出了一个流域水利经济水系模型，用以研究气候变化对南亚布拉马普特拉河流域沿岸国家未来的能源和粮食生产供水的影响<sup>[35]</sup>。

## 2.2 基于复杂网络视角的国际贸易及产生的环境问题研究

由于能够从全局上客观地识别和评价贸易特征，复杂网络被广泛应用于国际贸易以及由其产生的环境问题的研究<sup>[35]</sup>。早期的相关研究主要应用复杂网络于研究国际贸易网络的静态指标，如网络度、网络密度等等。Sayder 和 Kick 最早提出

用复杂网络方法研究国际贸易问题。这两位学者通过构建贸易复杂网络,研究“核心-边缘”结构<sup>[36]</sup>。此后, Serramo 和 Boguna 等学者也通过构建有向无权网络,研究世界范围的各个国家贸易关系<sup>[37]</sup>。之后有一些学者开始探究贸易网络随时间变化的动态演化过程。Kali 等通过构建复杂网络模型,研究了 1992 年到 1998 年国际贸易网络演化的情况<sup>[38]</sup>。王祥等构建了全球性的农产品贸易网络,并对其特征和演变模式进行了系统化的定量研究<sup>[39]</sup>。综合考虑 51 个州之间的 29 种农产品的贸易, Konar 等使用复杂网络理论,分析了 1986 年到 2007 年全球粮食贸易中隐含的虚拟水流转网络的动态演变特征,得出粮食国际贸易有利于全球水资源节约的结论<sup>[40]</sup>。覃静研究了全球能源贸易的网络结构,并指出该贸易网络的规模稳定,且贸易连续性较高<sup>[41]</sup>。安海忠等研究了 2002 到 2010 年间世界范围的石油贸易,并得出世界石油贸易网络的容量逐年递增,国际石油贸易往来的全球化不断加深的结论<sup>[42]</sup>。石泽浩等对 2005 年到 2014 年“一带一路”钢铁贸易网络进行研究,探讨了国家贸易之间的竞争和依存关系<sup>[43]</sup>。之后,一些学者开始关注网络中社团的存在和划分问题。Tzekina 等证明了国际贸易中社团的存在<sup>[44]</sup>。Bhattacharya 等认为在国际贸易中,贸易量富国的社团规模在逐年减小<sup>[45]</sup>。邹嘉龄等对“一带一路”沿线国家的贸易网络中社团的变化趋势进行研究,该研究表明,中国在与沿线国家组成的网络中占据核心地位,并且扮演着越来越重要的角色<sup>[46]</sup>。

总体而言,截至目前,国内外关于粮食-能源-水耦合系统的定量研究仍然有限,现有的研究更多关注于其中任意两个要素之间的关联关系。同时,较少的研究关注到“一带一路”沿线国家,这些国家面临的资源环境问题没有得到充分的关注和重视。此外,复杂网络在粮食-能源-水耦合关系研究中的应用还不多,较少学者使用复杂网络对相关资源环境问题中的社团存在和划分情况进行研究,复杂网络在该类研究中的应用还存在一定的发展空间。

## 第 3 章 数据与方法

### 3.1 数据来源与估算

各国每年向联合国统计署提供商品贸易数据,其中包含每年与各个贸易对象之间各种商品交易往来的数据<sup>[47]</sup>,所以本文所使用的粮食贸易数据主要来源于联合国统计署(UNSD)商品贸易数据库(COMTRADE)。根据粮食贸易量的大小,我们在“一带一路”沿线的 65 个国家中选择了粮食贸易涉及的最主要的 20 个国家,其中包括中国,马来西亚,印度尼西亚,缅甸,泰国,柬埔寨,菲律宾,土耳其,黎巴嫩,以色列,沙特阿拉伯,阿联酋,印度,巴基斯坦,孟加拉,俄罗斯,乌克兰,波兰,斯里兰卡和越南。本文选取了 HS 编码下 2017 年这 20 个国家之间小麦、玉米、水稻和相关粮食制品的进出口贸易量数据,同时,和国际贸易

中心数据库（International Trade Centre）的数据以及联合国农业及粮食组织数据库（FAOSTAT）的数据进行比对，以保证数据的准确性。另外，本文关于虚拟水计算的数据来源于 Hoekstra 数据库，虚拟水系数更新所采用的农作物产量数据和灌溉耗能数据来源于 FAOSTAT。由于部分国家灌溉水耗能的数据缺失，本文对照了生产技术和灌溉水平相近的国家的灌溉水耗能数据，对数据缺失的国家进行数据替代（泰国、缅甸、斯里兰卡）。同时，由于该指标的数据仅更新到 2012 年，本文假设 2012 年到 2017 年间，各国农业灌溉水耗能没有明显变化。

表 3-1 粮食名称及对应的 HS 编码

大类编码	大类名称	小类编码	小类名称
1001	小麦及混合麦	100110	硬粒小麦
		100190	除硬粒小麦外的麦子和混合麦
1005	玉米	100510	玉米种子
		100590	除种子外玉米
1006	水稻	100610	稻壳中的稻谷
		100620	去壳的稻谷
		100630	碾磨过的稻谷
		100640	碎米
1103	谷类食品	110311	小麦制品
		110313	玉米制品
		110314	水稻制品

### 3.2 粮食-能源-水关联关系

粮食贸易会引起虚拟水在区域范围的流转配置。虚拟水主要包括三类：蓝水，绿水和灰水。蓝水是指生产一种产品所消耗（蒸发）的地表水和地下水；绿水是指所消耗的雨水。灰水是指根据现有环境水质标准吸收污染物负荷所需的淡水量。其中，蓝水多为灌溉用水，灌溉过程中引起了农业部门最主要的能源消耗。本文核算了蓝水流转过程中引起的隐含能源的流转，以考察粮食国际贸易中整个粮食-能源-水关联关系的总体表现。

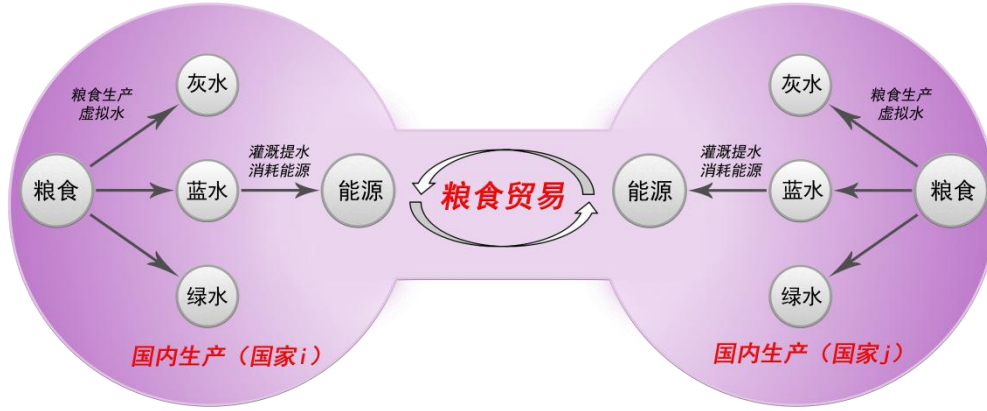


图 3-1 粮食、虚拟水和隐含能源关系图

### 3.3 虚拟水计算

对粮食贸易的虚拟水进行量化需要计算出该作物在生长发育期间所消耗的全部水资源量，一般采用学术界普遍认可的联合国粮农组织（FAO）推荐并修正的标准彭曼公式进行计算。Mekonnen 和 Hoekstra 采用 FAO 建立的气象数据库（ClimWat）中的气象数据，将各个国家的气象观测数据导入应用彭曼公式的原理建立的 CropWat 软件中，计算得出每个国家农作物的虚拟水量<sup>[48]</sup>。Hoekstra 数据库是目前国际上对作物需水量较为科学准确估计的数据库。为了计算 20 个国家的粮食贸易过程中隐含的虚拟水贸易，我们从 Hoekstra 数据库中选取了所研究的 20 个国家农产品的三种虚拟水含量（VWC）（系数仅更新到 2005 年），其单位是  $\text{m}^3/\text{ton}$ 。需要特别注意的是，若数据库中数值为 0，则表示该国不生产这种农作物，或农作物产量极小，无法对其生产消费环节的虚拟水进行可靠计量，这对本文的计算过程无显著影响。同时，由于生产方式的变化和灌溉技术的改进等原因，农作物的单位面积产量会逐年提高<sup>[49]</sup>。进而各国农作物的需水量也会受到相应的影响。Liu 等发现不同作物的 VWC 的倒数，即作物水分生产力（CWP），和该类粮食的产量有较强的线性关系<sup>[50]</sup>。本文应用这种规律，对 VWC 进行了相应的更新，具体计算公式如下。这种方法也被应用于 Dalin 等学者的虚拟水贸易研究中<sup>[51]</sup>。

$$VWC_{i,c,n} = VWC_{i,c,2005} * \frac{Y_{i,c,2005}}{Y_{i,c,2017}} \quad (1)$$

其中，i 代表国家；c 代表粮食种类；Y 代表粮食产量。

本文基于 Hoekstra 和 Hung 提出的计量方法<sup>[52]</sup>，对本文所研究的 2017 年粮食产品国际贸易过程中的虚拟水流转进行科学的计量。对于 i 国而言，c 类粮食产品出口贸易中的虚拟水流出为该产品出口总量中所包含的虚拟水量，计算公式如下：

$$VWX_c^i = VWC_c^i(i, c, 2017) * x_c^i(i, c, 2017) \quad (2)$$

其中,  $VWX$  指  $i$  国  $c$  产品虚拟水出口总量,  $VWC$  指  $i$  国  $c$  产品的虚拟水含量,  $x$  表示  $i$  国  $c$  产品的出口总量。

类似地,  $i$  国进口贸易中,  $c$  类粮食产品所包含的虚拟水流入量可表示为该产  
品出口总量中所包含的虚拟水量。计算公式表示如下:

$$VWM_c^i = VWC_c^i(i, c, 2017) * m_c^i(i, c, 2017) \quad (3)$$

其中,  $VWM$  代表  $i$  国  $c$  产品虚拟水进口总量,  $m$  表示  $i$  国  $c$  产品的进口总量。

从而, 针对本文研究的粮食产品,  $i$  国的虚拟水净流出 ( $VWB_i$ ) 可用以下公  
式表示,

$$VWB_i = \sum_c VWX_c^i - \sum_c VWM_c^i \quad (4)$$

若该值为负, 则该国为粮食产品虚拟水净进口国。

### 3.4 灌溉耗能计算

基于 FAO 数据库中的相关数据, 我们计算了  $i$  国单位灌溉水耗能 ( $EC_i$ )。计  
算公式如下:

$$EC_i = \frac{\text{Energy for irrigation}_i}{\text{Total water for irrigation}} \quad (5)$$

从而,  $i$  国粮食产品出口贸易中, 灌溉用水耗能出口 ( $EX_c^i$ ) 计算如下:

$$EX_c^i = VWX_c^i * EC_i \quad (6)$$

类似的,  $i$  国进口  $c$  产品的灌溉用水耗能进口 ( $EM_c^i$ ) 计算如下:

$$EM_c^i = VWM_c^i * EC_i \quad (7)$$

从而, 针对本文研究的粮食产品,  $i$  国的灌溉耗能净流出 ( $EB_i$ ) 可用以下公  
式表示,

$$EB_i = \sum_c EX_c^i - \sum_c EM_c^i \quad (8)$$

若该值为负, 则该国为粮食产品灌溉耗能净进口国。

### 3.5 网络模型构建及相关指标计算

为了进一步研究“一带一路”沿线 20 国的粮食贸易及其带来的虚拟水和灌溉  
用能流动, 本文构建了相应的粮食、虚拟水和灌溉耗能的复杂网络。复杂网络模



型包括节点  $V$  和边  $E$ ，其中， $V=\{v_i: i=1, 2, \dots, n\}$ ， $n$  是节点的数量。 $E=\{e_i: i=1, 2, \dots, m\}$ ， $m$  是边的数量。本文的贸易网络模型中，每个节点代表一个国家，节点之间的边是各贸易参与国之间的粮食贸易往来，虚拟水流转，灌溉用能流转。由于各个国家之间贸易和资源流转量差异巨大，为了揭示网络的性质和各个国家地位关系的全貌，需要考虑权重对于网络的影响。本研究将复杂网络模型中边的权值设定为相对应的贸易额和流转额。我们用 Gephi 软件计算出各类粮食及虚拟水和隐含能源所构成的复杂网络的特征指标，包括网络平均度，平均路径长度，网络直径和模块度等等，并进一步研究了水能网络中社团的存在和分布。

网络密度是显示网络节点间联系和反应网络整体情况的指标。本文中的网络密度大小可以反映网络中主要贸易参与国农产品贸易、虚拟水流转和隐含能源流转联系的紧密程度。整体来讲，网络密度越大，网络的发育程度越高，资源交流越高效，网络对各个贸易参与国的影响越大。反之，则各贸易国的关系相对松散，互相影响的程度也就越低。网络密度的公式如下：

$$D = \frac{m}{n * (n - 1)} \quad (9)$$

在公式中， $D$  代表网络密度， $m$  为网络的边数（贸易关系数量）， $n$  为节点的数量（贸易参与国数量）。

平均路径长度是指节点之间最短路径的平均值，可以被用来描述各网络的节点的分离程度。若网络的平均路径长度较大，粮食产品贸易及其引起的资源流动相对较少。一般而言，当网络的规模变大，网络的平均路径长度也会变长，但是平均路径长度增长的速度要小于网络规模的增长速度。平均路径长度的计算公式如下：

$$I = \frac{\sum_{i,j} d_{ij}}{n * (n - 1)} \quad (10)$$

其中  $d_{ij}$  表示  $i$  和  $j$  之间的最短路径程度，如果存在网络中  $i$  和  $j$  之间无法连接或存在  $i=j$  的情况，那么最短路径  $d_{ij}$  为 0。

网络直径是指所有节点之间的最大距离，本文中网络直径的大小可以衡量粮食产品及其引起的水能资源流动的传输效率。计算公式如下：

$$D = \text{MAX } d_{ij} \quad (11)$$

为了更好地研究“一带一路”沿线 20 个国家的粮食贸易引起的水能资源流转的网络结构，本文引入了 Blondel 等人设计的基于模块度的社团划分算法对其进行

分析。模块度表示一个网络的分化情况<sup>[53,54]</sup>。模块度越大，表明网络分化越明显。模块度的值通常介于-1 和 1 之间，计算公式如下：

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[ W_{ij} - \frac{A_i A_j}{2m} \right] * \delta(c_i, c_j) \quad (12)$$

其中， $W_{ij}$  表示点  $i$  与点  $j$  之间的边的权重， $A_i = \sum_j W_{ij}$  为点  $i$  的所有边的权重之和，同理， $A_j$  为点  $j$  的所有边的权重之和， $c_i$  为点  $i$  所在的社团， $c_j$  为点  $j$  所在的社团。如果点  $i$  和  $j$  在同一个社团，那么  $c_i = c_j$ ， $\delta(c_i, c_j) = 1$ ，反之， $\delta(c_i, c_j) = 0$ 。

$$m = 1/2 \sum_{ij} W_{ij}。$$

模块度的算法可分为两个阶段。

第一阶段为网络的每一个节点都分配一个社区指数，此时网络有  $n$  个社区。对每个节点  $i$ ，考虑它的邻接节点  $j$ ；使得  $i$  的社区指数变成  $j$  的，如果这个变动对模块度带来的是正向的，就接纳这个变动，否则就保持原来的分配方式。计算公式如下：

$$\Delta Q = \left[ \frac{\sum_{in} + k_{i,in}}{2m} - \left( \frac{\sum_{tot} + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[ \frac{\sum_{in}}{2m} - \left( \frac{\sum_{tot}}{2m} \right)^2 - \left( \frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (13)$$

其中  $\sum_{in}$  是该社区内部的连接权重总和， $\sum_{tot}$  是所有与该社区相连的边的权重和。

第二阶段，将同一个社区进行折叠，折叠后形成一个新的网络，其中，社区间的连接权重为连接两个社区的节点的权重和，而社区的内部连接自成一个闭环，其权重为该社区内部连接的和。这两个阶段需要被不断迭代，直至模块度的值固定。

## 第 4 章 结果分析与讨论

### 4.1 复杂网络构建

本文构建了“一带一路”沿线 20 个国家的粮食贸易网络及粮食贸易引起的水能流转网络，并利用相关复杂网络指标进行分析。从表 2 可看出，粮食贸易网络中，水稻网络密度最高，平均路径长度最短，网络直径最小。在全球范围内，水稻最主要的生产地集中在亚洲的季风区内，特别是东亚、东南亚和南亚。同时，水稻生产大国也是世界上最主要的水稻消费大国。因此，在本文研究的 20 个国家中，水稻网络发育程度高，节点的分离程度小，各国的水稻贸易联系最为紧密。小麦网络、玉米网络和谷类食物网络的网络密度均在 0.4 左右，平均路径相对较长，

这说明在所研究的 20 个国家中，这些粮食的贸易量小，贸易关系松散。玉米和谷类食物网络直径为 3，这说明这两种农产品在一些国家需要有一个贸易中介国才能与其他国家产生联系。小麦网络直径为 4，表明其在一些国家需要两个贸易中介国才能和他国贸易。随着“一带一路”倡议的不断推进，小麦、玉米、谷类食物等农产品在“一带一路”沿线国家的贸易需要被进一步推动，以实现区域间各国的互惠互利。

在虚拟水网络中，三类虚拟水的网络密度相近且数值较高，平均路径较短。这说明在这些国家中，粮食虚拟水交流频繁，网络传输效率高。三类虚拟水的网络直径均为 2，这说明网络中任意两国均存在贸易联系。以上事实均表明农产品贸易引起的虚拟水流转在区域水资源优化配置中起着重要的作用。

能源网络也呈现出较好的网络特征，网络密度较高，平均路径和网络直径短。这些指标表明了“一带一路”沿线各国粮食贸易隐含灌溉用能流转对贸易参与国的影响显著，隐含能源在各国之间的传播和沟通能力强，通过贸易来优化配置各国的能源消费切实可行。

表 4-1 主要网络指标

	网络密度	平均路径长度	网络直径
小麦网络	0.353	1.784	4
玉米网络	0.447	1.563	3
水稻网络	0.682	1.318	2
谷类食物网络	0.411	1.626	3
蓝水网络	0.782	1.218	2
绿水网络	0.795	1.205	2
灰水网络	0.795	1.205	2
能源网络	0.784	1.216	2

#### 4.2 粮食贸易

本文选取了“一带一路”沿线 20 个国家间贸易量最大的三种粮食及其粮食制品作为研究对象，这三种粮食分别为小麦、玉米、水稻。

小麦是一种非常重要的在全球范围内广泛种植的粮食作物。小麦的国际贸易程度较高，资源在全球都得到了合理配置。在 20 国中，土耳其、印度尼西亚、俄罗斯、乌克兰是小麦最主要的贸易国。土耳其，印度尼西亚是主要的小麦进口国。土耳其的出口量在 2013 到 2017 一直远小于进口量，印度尼西亚在 2013 到 2016 的平均进口量超过 800 万千克，是世界小麦进口大国。俄罗斯，乌克兰是主要的出口国。在 2017 到 2018 年度，俄罗斯已成为头号小麦出口国，小麦总出口量为

4049.9 万吨，同比增加 1.5 倍。同时，根据 FAOSTAT2017 年的数据显示，乌克兰的小麦年产量超过 8 亿吨。这与两国土地肥沃，自然资源丰富，农业竞争优势突出有着密切关系<sup>[55]</sup>。

工业化属性较强的玉米的贸易程度不及小麦，研究国家的玉米贸易量仅占其总产量的 12%。其中，中国与土耳其的进口量分别占总进口量 38%，22%，是主要的玉米进口国。而在 2009 年之前，中国并不是玉米的净进口国。由于进口配额的限制和出口补贴，中国玉米出口量可观，是净出口国。2009 年之后中国开始实行临时仓储政策，国内外玉米价差增大，玉米进口量骤增。此后，中国的玉米进口量保持较为稳定的增长<sup>[56]</sup>。一直以来，美国都是中国玉米进口的最主要来源国，2010 到 2013 年间，中国进口的玉米 90% 以上来自美国。但自 2014 年以来，这个比例大幅下降。随着“一带一路”的建设发展，中国正在谋求粮食进口国的多元化，以更安全地利用国际粮食市场满足自身的粮食需求。土耳其玉米的进口量一直远大于出口量。该国主要从俄罗斯、乌克兰大量进口玉米。乌克兰，俄罗斯的玉米出口量较大。乌克兰的玉米出口贸易对象主要为中国、以色列、土耳其、波兰、斯里兰卡、黎巴嫩等国，贸易范围广，几乎不进口玉米。俄罗斯玉米出口的主要贸易对象为土耳其、越南、黎巴嫩等，同时它从乌克兰、波兰等东欧国家进行较少量玉米进口。

世界水稻的主产区集中在亚洲，水稻产量占全球水稻产量的 91%。印度、中国、印度尼西亚、孟加拉国、泰国这 5 国水稻播种面积均在 10 万平方公里以上，是全球水稻播种面积最多的国家<sup>[57]</sup>。水稻净进口国中，中国，孟加拉的进口量加和超过 50%，是研究国家中主要的进口国。尽管两国均有较多的国内产量，但庞大的人口数量以及以水稻为主食的饮食习惯造就了庞大的消费量。中国为了应对自然灾害设置库存粮食量，这使水稻需求与国内供给出现缺口，进口需求依然存在<sup>[58]</sup>。印度、越南等国家是世界范围内的水稻出口大国。尽管印度和中国均有较高的粮食需求，但由于印度社会发展水平仍处于很低下的阶段，印度农民为了满足其他方面的最低需求，只能以降低自己的粮食消费为代价来进口他们更为紧缺的商品。

另外，印度、中国、土耳其是谷类食物最主要的出口国。沙特阿拉伯、马来西亚、柬埔寨是主要进口国，进口量分别占研究国家总进口量的 31%，22%，12%。

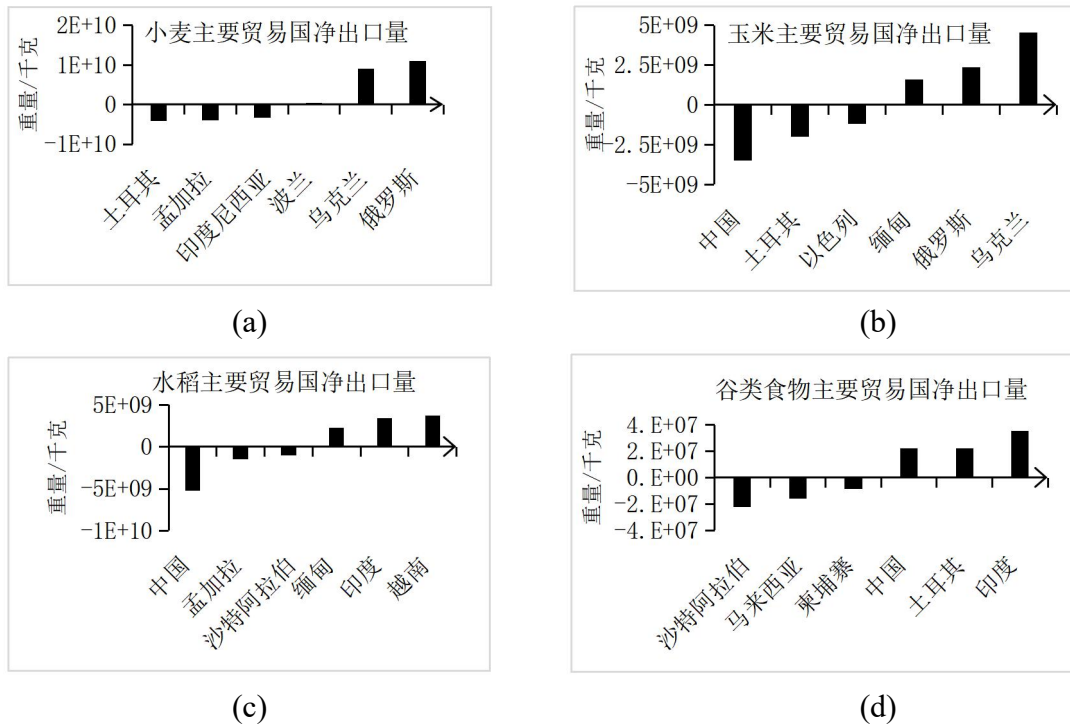


图 4-1 粮食主要贸易国贸易量

### 4.3 粮食贸易虚拟水流转

农产品的虚拟水主要可分为蓝水（地表和地下水）、绿水（雨水）、灰水（根据现有环境水质标准吸收污染物负荷所需的淡水量）三类。图 3 展示了“一带一路”沿线 20 国粮食贸易引起的三种虚拟水的流转网络。从总体来看，俄罗斯、乌克兰和印度是所研究国家中粮食贸易虚拟水流出量最大的几个国家，而中国和部分农业不发达、水资源缺乏的国家则是主要的粮食贸易虚拟水流入国。

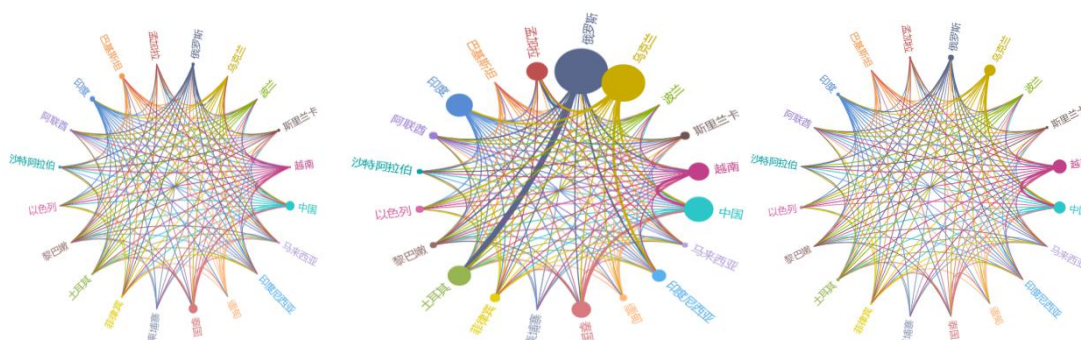


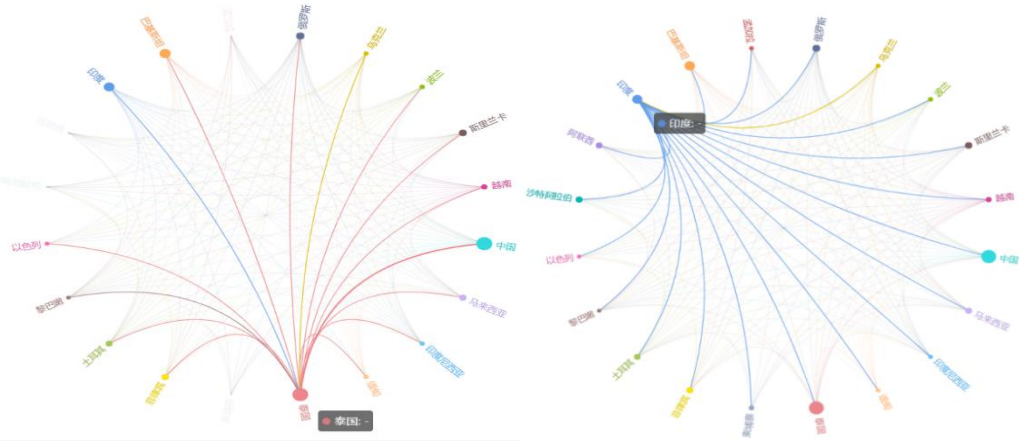
图 4-2 粮食贸易隐含蓝、绿、灰水流转网络

（注：图中节点的大小代表粮食贸易虚拟水总体量的大小。和节点颜色相同的线条指节点流出量，线条的粗细表示了流转量的大小。）

从蓝水的流向来看，泰国、印度、俄罗斯为主要流出国，其中泰国、印度蓝

水流出量分别占所统计总流出量的 33%、19%。虽然中国向研究国中的 10 个国家均有一定量的蓝水流出，但从总量上看，中国仍是蓝水流入量最大的国家，流入量占总流入量的 33%。波兰作为远离亚洲的欧洲国家，蓝水的流入和流出量相差不大，数值均较小，其流出量占总比最小。

泰国是世界五大农产品出口国之一，拥有众多的河流及大量的地下水，淡水面积达 3750 平方公里。为充分利用水资源发展农业，泰国建设了 20 项大中型水利工程，灌溉农田面积近 16000 平方公里。作为水资源充沛的国家，泰国可大量出口密集使用水资源的农产品<sup>[47]</sup>。泰国流向中国的蓝水量是整个蓝水网络中体量最大的，接近泰国蓝水总出口量的 54%。虽然中国的水资源总量较大，但人口基数大、水资源时空分布不均等问题使得实际国内水资源状况十分紧张，中国是世界上严重缺水的 13 个国家之一。中国通过粮食产品贸易形式从泰国以及其他国家进口虚拟水，能够有效地缓解本国水资源紧缺的状况，甚至可以弥补本国的水资源缺口。另外，远在欧洲的波兰的蓝水几乎全部流向中东地区，流入波兰的蓝水主要来自亚洲地区。尽管波兰的农业发达，粮食总量充足，但受气候、土壤及耕作习惯的限制和影响，该国粮食品种较单调，每年仍须进口大量的水稻等粮食产品，从而带来虚拟水的流转。



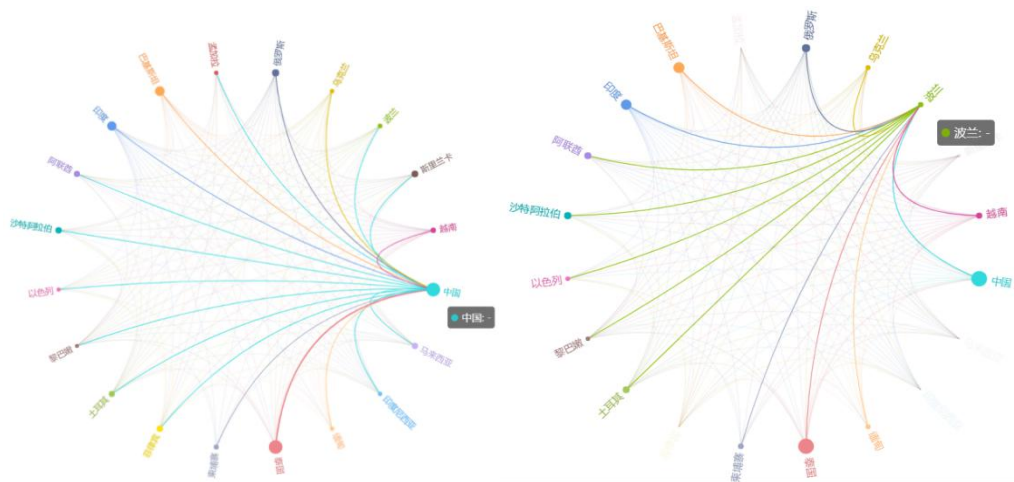
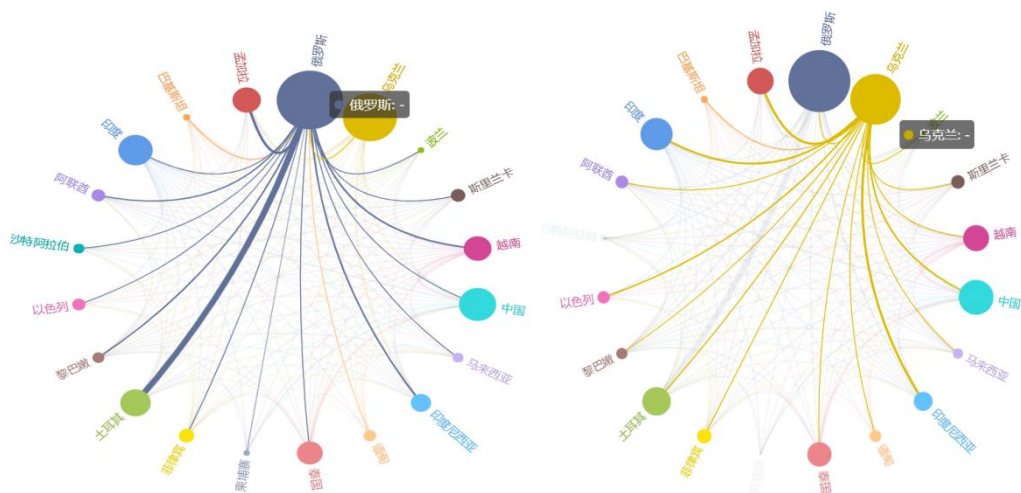


图 4-3 蓝水重点贸易国（泰国、印度、中国、波兰）

从绿水的流向看，俄罗斯、乌克兰、印度、越南为主要流出国。其中俄罗斯与乌克兰的流出量尤为巨大，流出量占比分别为 37%和 31%。中国依旧是绿水流入量最大的国家，占比高达 19%。黎巴嫩几乎拥有来自所有国家的绿水流入，但实际流入量占比只有 5%。

俄罗斯是水资源开发利用大国，第一产业用水量为 305 亿立方米，占总用水量的 11.4%。俄罗斯年降水量平均为 150 到 1000 毫米，雨水资源相当丰富<sup>[59]</sup>。俄罗斯出口的粮食产品中包含着丰富的雨水资源。而乌克兰的雨水资源虽不算特别丰沛，但由于拥有得天独厚的土地资源，发达的农业背景，乌克兰仍是绿水的主要流出国<sup>[60]</sup>。由于对水资源重要性的认知差异、生产技术差异、土地资源差异等原因的存在，有些富水国家也没能有效地使其丰富的水资源参与到国际贸易中来。例如黎巴嫩，尽管雨水资源丰富，但其是网络中的绿水进口国之一。





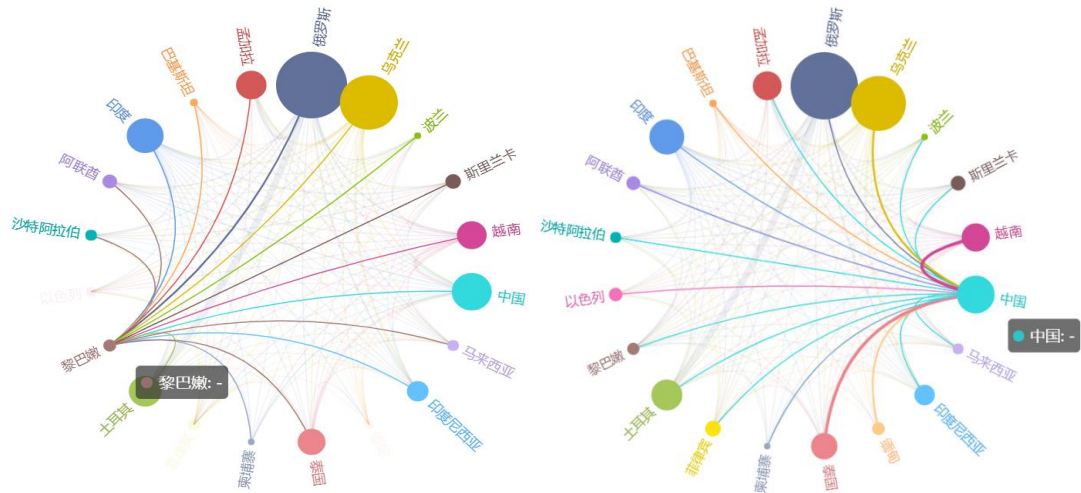


图 4-4 绿水重点贸易国（俄罗斯、乌克兰、黎巴嫩、中国）

从灰水的流向来看，乌克兰、越南、俄罗斯是主要流出国，总量占比分别为 37%、27%、18%。中国是流入量最大的国家，占比高达 38%。尽管中国也有相当一部分灰水外流，但其流入量更大。斯里兰卡则是典型的流入国，几乎所有国家都有灰水流向斯里兰卡。

为了更好地研究网络密度较高，节点联系紧密的虚拟水网络的具体结构，我们对三种虚拟水网络分别进行了模块度的分析。根据计算，蓝水网络的模块度均接近于 1，说明网络分化明显，社团的独立性好。绿水和灰水的模块度接近于 0，说明这两类虚拟水在各个国家之间的流转往来关系相对紧密，不存在明显的小团体现象。

蓝水网络中存在 3 个社团。印度尼西亚、缅甸、菲律宾、沙特阿拉伯、阿联酋、印度、巴基斯坦和波兰组成了第一社团。该社团的蓝水流转活动占总比的 40%，社团内部边数 44 条。第二社团包括 7 个国家，分别为中国、马来西亚、泰国、柬埔寨、孟加拉、越南和斯里兰卡。它们全都处于东亚、东南亚和南亚。该社团的蓝水流转活动占总比 35%。第三社团包括土耳其、黎巴嫩、俄罗斯和乌克兰。总体而言，三个社团的体量占比相差不明显，在总的蓝水网络中，这三个社团的划分有利于社团内部国家的蓝水资源优化配置。同时，三个社团在地理位置上的划分相对清晰，这也说明蓝水流转受地理因素影响大。

#### 4.4 灌溉用能流转

“一带一路”沿线国家虽然在农业资源上具有先天优势，但是在技术应用等方面具有明显的不足，在农业灌溉中对能源的利用效率不高。农业贸易能够有效缓解各国农业部门灌溉用能资源浪费的问题，优化资源配置<sup>[4]</sup>。从图 6 中，我们可以看出巴基斯坦、俄罗斯、印度、中国的粮食贸易隐含的灌溉用能流转总量较大。



其中，巴基斯坦隐含能源出口量最大。该国作为一个农业大国，农业单位用水耗能却处于相对较低的水平。该国的粮食产品出口到各国有利于灌溉水耗能较大的国家减少相关粮食的生产，节约能源资源。俄罗斯的粮食贸易中隐含能源流转进出口相对均衡。同时，自 2000 年以来，俄罗斯政府将国家扶持的主力项目从金融业转到农业。有了政府的财政支持，俄罗斯农业人口的素质高，技术先进，该国的农业单位灌溉水耗能处于较低水准。若该国提高自产农作物的出口，不仅能够发展本国经济，还能缓解他国农业用能压力。印度也是一个粮食出口大国，但由于印度对于传统化石能源——煤炭的依赖，印度的农业用能技术水平较低。印度从他国进口粮食能够减少农业部门灌溉时对化石能源的使用，有利于该国节能减排。单位农业用水耗能较高也是中国的农业发展所待解决的问题。中国地域广袤，国内的各地区之间的资源配置与发展的不均衡导致了其在农业生产中，资源使用的效率不高。中国现阶段在和“一带一路”沿线各国的粮食贸易中，隐含灌溉用能的流入大于流出，这有利于缓解中国能源资源紧缺的现状，这种贸易趋势需要被继续保持。

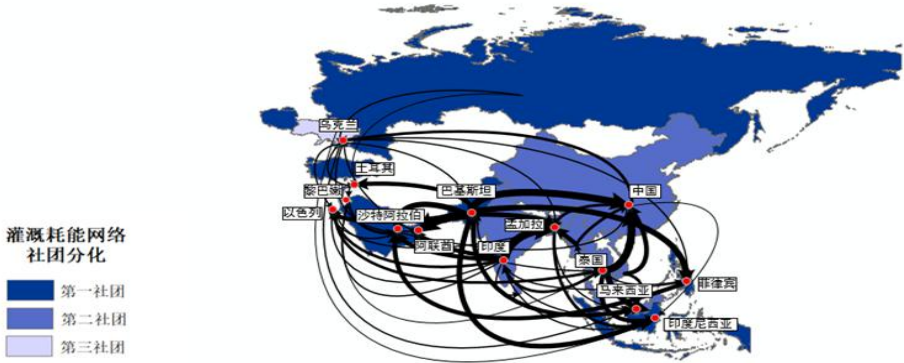
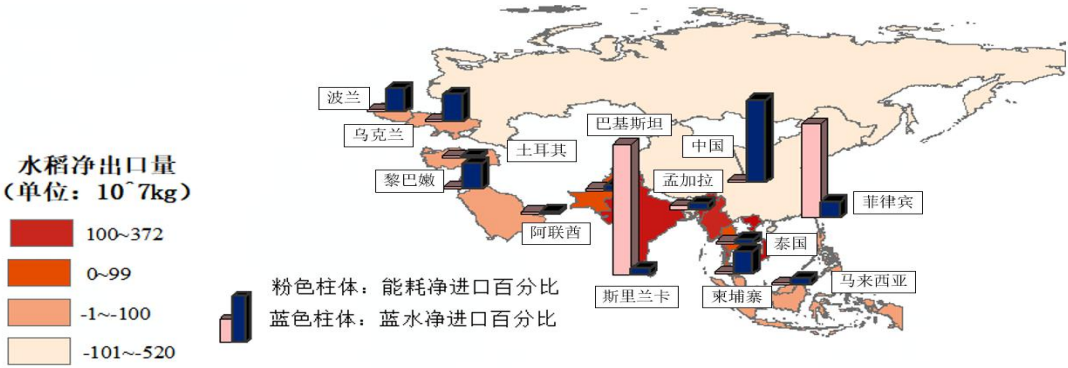


图 4-5 粮食贸易隐含灌溉用能流转分布

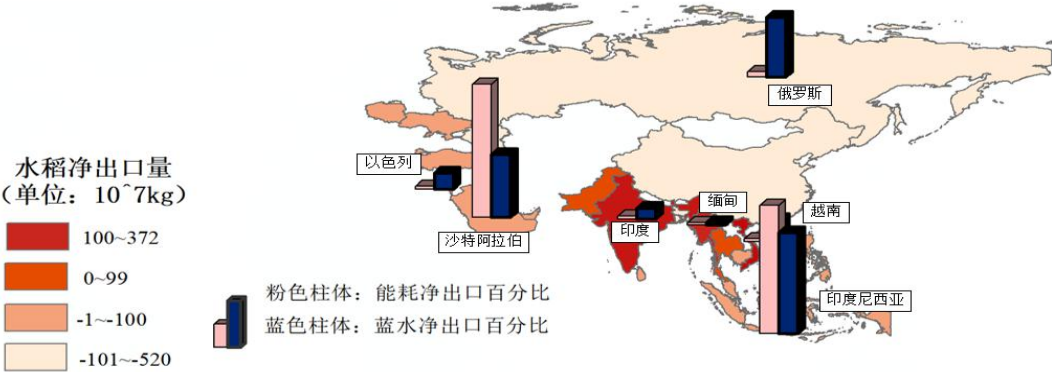
另外，我们对隐含灌溉用能的网络也进行了模块度的计算，发现能源网络的模块度接近 1。能源网络中主要存在 3 个社团。第一社团由 11 个国家组成，社团内部资源传输边数为 88 条。社团内国家分别为印度尼西亚、菲律宾、土耳其、黎巴嫩、沙特阿拉伯、阿联酋、巴基斯坦、孟加拉、俄罗斯和波兰。第一社团占据了总体量的 55%，在总网络中占据重要地位。其中，大多数国家为能源净流入大国，而巴基斯坦为能源净流出大国，巴基斯坦流出的能源主要流向这个社团中其他的国家。第二社团包括中国、马来西亚、缅甸、泰国、柬埔寨、印度、越南和斯里兰卡，总占比 35%，社团内部边数 35 条。第三社团包括乌克兰和以色列。

4.5 粮食-能源-水关联关系

根据上述研究结果，我们发现水稻是所研究的粮食中，贸易量最大，贸易活动最为频繁的农产品，以水稻为例，我们对“一带一路”沿线 20 个国家农业贸易中存在的粮食-能源-水关联关系进行了进一步研究。由图 7 可发现大部分国家粮食贸易引起的蓝水和隐含灌溉用能流转是成正比的。但由于是生产水平和灌溉技术等差异，某些国家少量的粮食出口也会引起大量的虚拟水和灌溉耗能出口（沙特阿拉伯）。另外，一些国家虽然在粮食贸易中占据最主要的地位，但是由于政府在农业的投入较大，灌溉技术科技含量较高，能够节约水资源和能源，粮食贸易引起的水能资源流转反而较小（俄罗斯）。一些国家可以通过农业贸易来进口一部分水能资源，缓解本国固有的资源压力（中国）。因此，应用粮食贸易来重新配置区域内部资源，需要综合考虑各国的社会文化背景，政治经济政策，经济发展水平、农业生产水平、灌溉情况、对外贸易等的实际情况。



(a)



(b)

图 4-6 (a) 水稻净进口国水稻贸易引起的蓝水、隐含灌溉用能流转; (b) 水稻净出口国水稻贸易引起的蓝水、隐含灌溉用能流转

## 第5章 结论和政策建议

“一带一路”沿线各国在进行频繁的粮食贸易的过程中，虚拟水和隐含能源在这些国家不断流转、重新配置。厘清粮食、虚拟水及隐含能源在各国之间的贸易结构，有利于各国农业实现可持续发展，各国资源合理有效使用。

根据上述结果，我们发现，“一带一路”沿线各国主要依据粮食的比较优势来确定进出口贸易方向，在保障国内粮食需求的同时，积极建立多边贸易格局，维持国内的粮食安全。另外，“一带一路”沿线各国的粮食贸易受国家政策的影响。粮食的贸易能够有效带动水能资源在区域内的优化配置，水资源丰富的国家，例如俄罗斯，能够通过农业部门流出虚拟水补贴区域内的缺水国家。水资源稀缺的国家，例如中国，能够通过粮食贸易流入虚拟水来缓解农业部门的水资源短缺、浪费严重问题。同理，粮食隐含能源资源在贸易过程中也被优化配置。

针对本文的研究结果，我们提出了以下几点政策建议：

(1) “一带一路”沿线各国需要在保障本国粮食安全的基础上，进行粮食的对外贸易。沿线的主要粮食生产国，例如泰国、缅甸、柬埔寨等可以通过合作改善农业基础设施，革新农业技术，进一步提高产能，在粮食贸易中占有更多优势。同时，一些国家，例如阿联酋、沙特阿拉伯、以色列等可以在区域内外寻找更多的贸易伙伴，减少对单一国家的粮食依赖度，使贸易多元化。

(2) 在农业生产中，水的作用不可或缺。针对水资源的短缺问题，各国应当加大对技术开发的投入，使用高效的灌溉措施，提高对水资源的利用率。技术水平落后的国家可以向农业灌溉技术先进的国家，例如俄罗斯，学习相关发展经验。

(3) 贸易往往具有联动性，粮食贸易需要综合考虑水能资源的流动。各国政府在政策制定过程中往往只能片面考虑到通过农业国际贸易保障国内粮食需求，而忽视了粮食贸易引起大量水能资源在区域间的重新配置，这会不利于农业部门的资源节约和环境可持续发展。本文的研究结果表明粮食贸易有助于水资源在各贸易国被重新分配。各国可以考虑自身贸易结构，缺水国家（中国、沙特阿拉伯等）可从水资源丰富的国家（俄罗斯、泰国等）进口农产品来缓解本国的水资源短缺问题。“一带一路”沿线各国均需要重视农业灌溉的能源消耗问题。本文的研究结果为各国节约能源资源，优化能源配置提供了新的思路。缺少能源资源的国家可以充分利用贸易活动中的隐含能源流入来优化本国的能源结构。

(4) 各国需要考虑自身所在的贸易社团，社团内部的贸易大国往往会对社团内的其他国家的农业贸易与资源流转产生辐射带动效应，各国可加强与社团内部国家的贸易往来以优化水资源配置。

## 参考文献

- [1] 鲍淑君,贾仰文,高学睿,等.水资源与能源纽带关系国际动态及启示[J].中国水利,2015(11):6-9.
- [2] World Economic Forum.Global Risks 2011 Report (6th edition)[R]. Cologne: World Economic Forum, 2011.
- [3] 智强.“一带一路”给企业发展带来的商机[J].商业观察,2015(1):32-34.
- [4] 李富佳,董锁成,原琳娜,等.“一带一路”农业战略格局及对策[J].中国科学院院刊,2016(6):678-688.
- [5] 张芸,张斌. (2016).农业合作:共建“一带一路”的突破口[J].农业经济(8),3-5.
- [6] Howard K W F, Howard K K. The new “Silk Road Economic Belt” as a threat to the sustainable management of Central Asia’s transboundary water resources[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(11):1-12.
- [7] 刘清杰. “一带一路”沿线国家资源分析[J].经济研究参考,2017(15):70-104.
- [8] 柯兵,柳文华,段光明,等.虚拟水在解决农业生产和粮食安全问题中的作用研究[J].环境科学,2004,25(2):32-36.
- [9] BP 世界能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2016.
- [10] Khan S, Hanjra M A. Footprints of water and energy inputs in food production – global perspectives[J]. Food Policy,2009,34(2):130-140.
- [11] Gheewala S H, Silalertruksa T, Nilsalab P, et al. Water footprint and impact of water consumption for food, feed, fuel crops production in Thailand[J]. Water, 2014, 6(6):1698–1718.
- [12] 于法稳. 中国粮食生产与灌溉用水脱钩关系分析[J]. 中国农村经济,2008(10):34-44.
- [13] Xydis G A, Liaros S, Botsis K. Energy demand analysis via small scale hydroponic systems in suburban areas: An integrated energy-food nexus solution[J]. Science of the total environment, 2017, 593: 610–617.
- [14] Holland R A, Scott K A, Martina Flörke, et al. Global impacts of energy demand on

the freshwater resources of nations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(48):E6707-E6716.

[15]Turner S W D, Ng J Y, Galelli S. Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model[J]. Science of The Total Environment, 2017, 590-591:663-675.

[16]Eichelberger L P. Living in Utility Scarcity: Energy and water Insecurity in Northwest Alaska[J]. American Journal of Public Health, 2010, 100(6):1010-1018.

[17]Zhou Y, Li H, Ke W, et al. China's energy-water nexus: Spillover effects of energy and water policy[J]. Global Environmental Change, 2016, 40:92-100.

[18]Tanguy P A. Environmental challenges in the energy sector: A chemical engineering perspective[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2010, 5(4):553-562.

[19]Suarez F, Munoz J F, Fernandez B, et al. Integrated water resource management and energy requirements for water supply in the Copiapo River Basin, Chile[J]. Water, 2014, 6(9):2590—2613.

[20]Walkere L, Anderson A M, Read L K, et al. Water use for hydraulic fracturing of oil and gas in the South Platte River Basin, Colorado[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(4) : 839—853.

[21]Perrone D, Murphy J, Hornberger G M. Gaining perspective on the water? Energy nexus at the community scale[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(10):4228-4234.

[22]Scott C A, Pierce S A, Pasqualetti M J, et al. Policy and institutional dimensions of the water - energy nexus[J]. Energy policy, 2011, 39(10):6622—6630.

[23]彭焜,朱鹤,王赛鸽,等.基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例[J].自然资源学报,2018,33(09):42-56.

[24]Siddiqi A, Anadon L D. Quantifying the Water-Energy Nexus in Middle East and North Africa[J]. Energy Policy, 2011, 39(8):4529-4540.

[25]Daher, Mohtar. Water–Energy–Food (WEF) Nexus Tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making[J]. Water International, 2015, 40(5-6):748-771.

- [26]Food & Agriculture Organization of the United Nations . The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Rome: FAO, 2014.
- [27]Destrasser L, Lipponen A, Howells M, et al. A methodology to assess the water energy food ecosystems nexus in transboundary river basins[J]. *Water*, 2016, 8(2):59.
- [28]Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12):7896-7906.
- [29]Sherwood J, Clabeaux R, Carbajales-Dale M. An extended environmental input–output lifecycle assessment model to study the urban food–energy–water nexus[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(10):105003.
- [30]Vora N, Shah A, Bilec M M, et al. Food–Energy–Water Nexus: quantifying embodied energy and GHG emissions from Irrigation through virtual water transfers in food trade[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(3):2119-2128.
- [31]Ozturk I. Sustainability in the food-energy-water nexus: Evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries[J]. *Energy*, 2015, 93:999-1010.
- [32]Damerau K, Patt T, Van Vliet O P R. Water saving potentials and possible trade-offs for future food and energy supply[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 39:15-25.
- [33]Karabulut A, Egoh B N, Lanzaova D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water–food–energy nexus in the Danube river basin[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17:278-292.
- [34]Yang Y C E, Ringler C, Brown C, et al. Modeling the agricultural water-energy-food nexus in the Indus River Basin, Pakistan[J]. *Journal of water resources planning and management*, 2016, 142(12):04016062.
- [35]许和连,孙天阳,成丽红. “一带一路” 高端制造业贸易格局及影响因素研究——基于复杂网络的指数随机图分析[J].*财贸经济*,2015,36(12):74-88.
- [36]Snyder D, Kick E L. Structural position in the world system and economic growth,

1955-1970: A multiple-network analysis of transnational interactions[J]. American Journal of sociology. 1979, 68(2):1096-1126.

[37]Serrano M A, Boguna M. Topology of the world trade web[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003, 68(2):015101.

[38]Kali R. The architecture of globalization: A network approach to international economic integration[J]. Journal of International Business Studies, 2007, 38(4):595-620.

[39]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.

[40]Konar M, Dalin C, Suweis S, et al. Water for food: The global virtual water trade network[J]. Water Resources Research, 2011, 47(5):143-158.

[41]覃静.世界能源贸易网络的结构特征及其影响因素分析[D].湖南大学,2014.

[42]安海忠,陈玉蓉,方伟,等.国际石油贸易网络的演化规律研究:基于复杂网络理论[J]. 数学的实践与认识,2013,43(22):57-64.

[43]石泽浩,何喜军,李洪英,等.“一带一路”钢铁贸易格局及演变规律研究[J].国际商务(对外经济贸易大学学报),2017(4):27-37.

[44]Tzekina I, Danthi K, Rockmore D N. Evolution of community structure in the world trade web[J]. European Physical Journal B, 2008, 63(4):541-545.

[45]Bhattacharya K, Mukherjee G, Manna S S. The international trade network[J]. New Economic Windows, 2007, 41(4):139-147.

[46]邹嘉龄,刘卫东. 2001~2013 年中国与“一带一路”沿线国家贸易网络分析[J]. 地理科学, 2016, 36(11):1629-1636.

[47]王若愚.我国农产品国际贸易中的虚拟水流动研究[D].2017.

[48]Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat.[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7):1259-1276.

[49]王朝影.主要农产品单位面积产量预测[J].商,2013(16):319-319.

[50]Liu J, Zehnder A J B, Hong Y. Global consumptive water use for crop production:

The importance of green water and virtual water[J]. Water Resources Research, 2009, 45(5):641-648.

[51]Dalin C, Konar M, Hanasaki N, et al. Evolution of the global virtual water trade network[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(16):5989-5994.

[52]Hoekstra, A.Y, Hung, et al. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change, 2004, 15(1):45-56.

[53]Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. Journal of Statistical Mechanics, 2008, 2008(10):155-168.

[54]Lambiotte R, Delvenne J C, Barahona M. Laplacian dynamics and multiscale modular structure in networks[J]. 2008.

[55]孙振远.乌克兰经济调整战略与中乌经济合作[J].世界经济与政治论坛,1995,6:23-26.

[56]蒋文斌,李丰.玉米替代品进口冲击对临时收储政策的影响——基于VAR-BEKK-GARCH模型[J].粮食科技与经济,2017,5:24-28.

[57]陈庆根.世界及主要国家稻米进出口贸易分析[J].世界农业,2003(1):28-30

[58]孙定东,陈耀东.从世界粮食供给看中国粮食生产[J].上海综合经济,2004,12:121-123.

[59]A.E.阿萨林,赵秋云.俄罗斯的水资源及其利用[J].水利水电快报,2008(05):1-4+8.

[60]韩丽宇.乌克兰的水资源开发利用与管理——各国水概况系列之七[J].水利发展研究,2009,9(05):61-66.