

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.002

基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析

孙才志¹, 郑靖伟²

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029;

2. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:基于2002年、2007年和2012年的多区域投入产出表的相关数据,利用多区域投入产出(MRIO)模型和社会网络分析法(SNA)分析了中国水资源流动网络的空间关联性和结构特征。结果表明:网络中的链接数量没有随水足迹贸易值的增加而增加,链接路径上的流量不断增加,网络的韧性不够,空间关联渠道有待拓展,存在一定的等级差异,稳定性需要加强;网络中一些省份链接的增加,会削弱其他省份的链接数目,这种可塑性特征有利于在全国范围内合理配置水资源;将网络划分为4个板块,板块间的溢出关系主要是以板块内部为主,且少数板块之间没有任何的溢出关系。

关键词:水资源;水足迹;多区域投入产出;社会网络分析法;空间关联关系

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)01-0009-09

Analysis of China's water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA // SUN Caizhi¹, ZHENG Jingwei² (1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Based on the relevant data of multi-region input-output (MRIO) tables in the year of 2002, 2007 and 2012, the spatial correlation and structural characteristics of China's water resource flow network were analyzed by using MRIO model and social network analysis (SNA). The results show that the number of links in the network does not increase with the increase of water footprint trade value. The traffic on the link path is increasing, the network is not strong enough, the spatial connection channel needs to be expanded, there is a certain level difference, and the stability needs to be strengthened. The increase in links in some provinces will weaken the number of links in other provinces. This plasticity feature is conducive to the rational allocation of water resources across the country. The network is divided into four plates, and the spillover relationship between plates is mainly internal. There is no spillover relationship between individual plates.

Key words: water resources; water footprint; MRIO; social network analysis; spatial association

水资源短缺问题是全球面临的重要难题之一,也是影响我国经济发展的主要障碍之一,我国的水资源总量在世界排名第六,但是人均水资源量排名较低,仅为世界平均水平的1/4。目前,我国解决水资源短缺问题的主要方法之一是提高水资源利用效率和提升水资源配置管理能力,而水资源利用的空间转移作为水资源配置的途径之一,不仅缓解了水资源短缺地区在生产产品和服务所需要的水资源总量,而且还加强了区域经济的合作与发展。2002年荷兰学者 Hoekstra^[1]在虚拟水概念基础上,首次提出水足迹概念,水足迹可以清楚地表明某一地区

消耗的本地与来自其他地区的水资源,区分不同行业和进出口贸易生产所消耗的水资源总量,为更准确地研究水资源利用的空间转移问题提供了新的思路。因此,基于水足迹探究我国水资源利用的空间转移问题,对于缓解我国的水资源短缺问题具有重要的意义。

目前,国内外核算水足迹的方法大致可分为“自下而上”法和“自上而下”法两类^[2]。王新华等^[3]、盖美等^[4]、Zhao等^[5]和 Okadera等^[6]分别采用“自下而上”法计算了中国2002年各省的人均水足迹、2004—2013年辽宁省14个城市的水足迹、中

基金项目:国家社会科学重点基金(19AJY010)

作者简介:孙才志(1970—),男,教授,博士,主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

国农业水足迹和泰国能源生产水足迹,该方法较为简单,但存在数据不全的缺陷。“自上而下”法又可分为两种不同的算法,其中一种侧重于进行水足迹评价和水资源利用现状评价,如潘安娥等^[7]、潘文俊等^[8]、杨子江等^[9]、Hu 等^[10]、Jian 等^[11]和 Feng 等^[12]分别计算了湖北省、九龙江流域、昆明、滇池流域、天津及中国水足迹,但该方法无法清楚区分水足迹的来源;另一种是 Leontief^[13]提出的投入产出法,采用该方法,蔡振华等^[14]、吴兆丹等^[15]和柳雅文等^[16]分别分析了甘肃、江苏和天津的地区水足迹,Feng 等^[17]分析了 2007 年黄河流域的城乡居民水足迹,吴兆丹等^[18]分析比较了 2007 年我国 30 个省级行政区(以下简称为“省”)42 个经济部门的水足迹以及差异成因,且基于经济区域分析了水足迹总量^[19],Zhang 等^[20-22]分析了中国省际或区域的水足迹差异,Cazcarro 等^[23]模拟了西班牙旅游所需水足迹。投入产出法不仅可以计算出直接或间接资源消耗量,还能够更加准确地区分经济流,但目前的研究多集中于分析单一省份或全国范围的某一时间段的水足迹贸易情况,对于水足迹的空间关联性分析较少,无法对水足迹的时空变化做出归纳分析以及预测,对于每个省在水足迹贸易中所处的地位和发挥的作用,并没有明确的说明。

鉴于此,本文利用多区域投入产出(multi-region input-output, MRIO)模型核算了 2002 年、2007 年和 2012 年中国 30 个省(不含西藏和港澳台地区)的水足迹,给出了中国水资源利用的空间转移关系,进而构建了水足迹空间关联网;运用社会网络分析法(social network analysis, SNA)对水足迹空间关联网的结构以及属性特征进行分析,阐明了中国水资源利用的空间转移趋势以及各省在网络中所处的地位。

1 数据来源

30 个省的基础数据来源于国家统计局公布的《2002 年 30 省区 42 部门区域间投入产出表》《2007 年中国 8 大区域 17 部门区域间投入产出表》和《2012 年中国 31 省区市 42 部门区域间投入产出表》。由于 2007 年区域间投入产出表为合并后的八大区域,本文根据地区的最终消耗占合并后区域最终消费的比例将八大区域剥离为 30 个地区,再根据 GB/T4754—2017《国民经济行业分类》标准,将 2002 年和 2012 年的 42 部门合并为 17 个部门计算各省的水足迹。各地区行业用水数据分别来自《水资源公报》《中国环境年鉴》和《中国统计年鉴》,第一产业的用水数据从《水资源公报》中获得,第二产

业和第三产业划分下的各行业的用水数据,是根据投入产出表中“水的生产和供应业”在不同行业的投入比例来确定的,其中第二产业部分行业的用水数据来自《中国环境年鉴》。

2 水足迹空间关联网研究方法

2.1 水足迹计算方法

水足迹的测算是在多区域投入产出表的基础上,加入了水资源消耗量,由于本文研究的是省际水足迹流动。因此不包含多区域投入产出表中的出口与进口项,而多区域投入产出表中,进口量包含在中间使用和最终使用矩阵中,因此,需要引入进口系数矩阵对其进行剔除,由此测算了 2002 年、2007 年和 2012 年的水足迹,并计算出省际水资源转移量矩阵,进而构建了水足迹空间关联网。

a. 各部门直接消耗系数采用以下公式计算:

$$A = (A_{hikj}) \quad (1)$$

其中

$$A_{hikj} = x_{hikj}/X_{kj}$$

式中: A 为直接消耗矩阵; A_{hikj} 为 h 地区 i 部门对 k 地区 j 部门的直接消耗系数; x_{hikj} 为 h 地区 i 部门对 k 地区 j 部门产品的中间投入; X_{kj} 为 k 地区 j 部门的总产出。

b. 各部门直接用水系数采用以下公式计算:

$$\sigma = (\sigma_{kj}) \quad (2)$$

其中

$$\sigma_{kj} = R_{kj}/X_{kj}$$

式中: σ 为直接用水系数矩阵; σ_{kj} 为 k 地区 j 部门的直接用水系数; R_{kj} 为 k 地区 j 部门的用水量。

c. 完全用水系数采用以下公式计算:

$$\delta = (\delta_{kj}) \quad (3)$$

其中 $\delta_{kj} = \sum \sigma [I - (I - \hat{M})A_{hk}]^{-1}$

式中: δ 为完全用水系数矩阵; δ_{kj} 为 k 地区 j 部门的完全用水系数; I 为单位矩阵; A_{hk} 为 h 地区对 k 地区中间投入的直接消耗矩阵; \hat{M} 为进口系数矩阵,是根据进口量与国内总需求的比例确定的; $[I - (I - \hat{M})A_{hk}]^{-1}$ 为剔除进口后的列昂惕夫逆矩阵。

d. 各地区总水足迹(不包含进出口)采用以下公式计算:

$$W = \delta(Y_N + Y_C + Y_G + Y_P) \quad (4)$$

式中: W 为总水足迹矩阵; Y_N 、 Y_C 、 Y_G 、 Y_P 分别为农村居民最终消费、城镇居民最终消费、政府最终消费和资本形成总额矩阵。

e. 地区间水资源转移(不包含进出口)采用以下公式计算:

$$T_{hk} = \delta Y_{hk} \quad (5)$$

式中: T_{hk} 为 h 地区对 k 地区的水资源转移矩阵; Y_{hk} 为 h 地区对 k 地区最终消费的转移矩阵。根据地区间水资源转移矩阵构建中国水足迹空间转移矩阵, 取每行的平均值为阈值, 高于平均值, 取值为 1, 低于平均值, 则取值为 0, 由此刻画出水足迹空间关联网络。

2.2 水足迹空间关联网络分析方法

社会网络分析法是对复杂的社会关系进行精确量化分析的一种研究方法^[24], 通过探究网络关系可以分析个体之间的关联关系。本文通过网络密度、关联度、等级度和网络效率 4 个指标来描述整体网络的特征, 从而探究网络的时空变化; 用点度中心度、接近中心度和中间中心度这 3 个中心性特征来分析各省在水足迹网络中的地位与作用, 再对各省进行板块划分和相关数据的计算, 清晰地表现水足迹网络的空间关联性。块模型方法是根据结构性信息把各个节点进行分区的方法, 从而研究空间关联网络中各个分区之间的关系, 以及各个分区在整体网络中所承担的作用和角色。具体计算公式和方法详见文献^[25-31]。

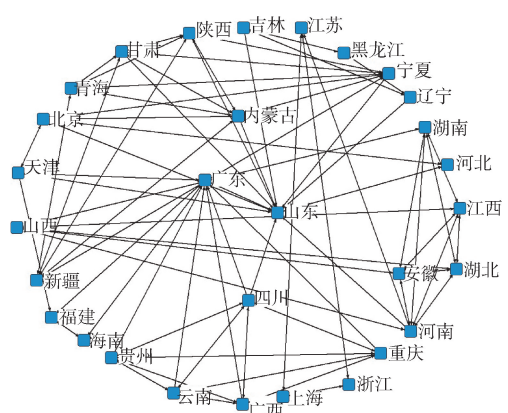
3 水足迹空间关联网络特征分析

由公式(1)~(4)计算出 2002 年、2007 年和 2012 年 30 个省 17 个产业的水足迹。由于测算水足迹的方法较多, 本文采用“自上而下”法的多区域投入产出模型, 并且不包含进出口数据, 加入了进口系数对多区域投入产出表进行进口项剔除, 计算得到的各省水足迹消耗量与已有相关研究结果相近^[1, 15, 18]。

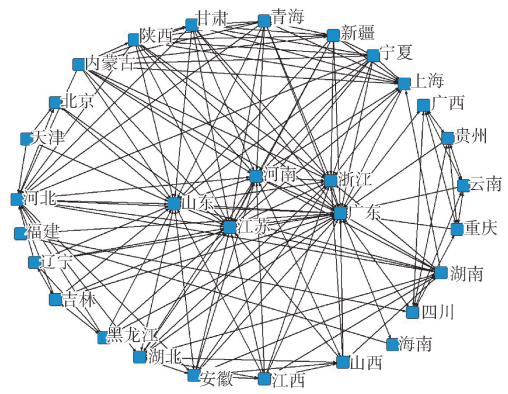
3.1 整体网络变化趋势

根据式(5), 用 Ucinet 软件的可视化工具绘制了 2002 年、2007 年和 2012 年的中国水足迹空间关联网络(图 1), 能够更加清晰地比较水足迹的时空演变趋势。从图 1 可以清晰地看到, 水足迹空间关联网络中没有一个独立的点, 每个省都至少有一条与其他省的联系线, 说明中国的水足迹存在普遍的联系。节点间的链接数量不断增加, 但并不代表节点间的流量也随之增加, 只存在部分节点之间的流量随着链接数量的增加而增加, 且节点与具有相似属性或相邻节点链接的趋势是中国水足迹空间关联网络的一个特征。

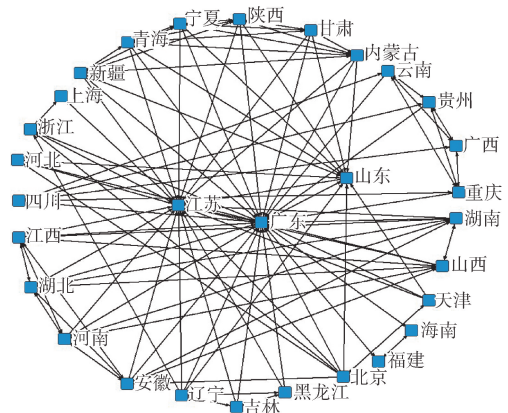
本文研究的水足迹空间关联网络以 30 个省为节点, 可能存在的最大关联关系数为 870 个, 但实际上 2002 年存在的关联关系数为 127 个, 2007 年为



(a) 2002 年



(b) 2007 年



(c) 2012 年

图 1 中国水足迹空间关联网络

Fig. 1 Spatial correlation network of China's water footprint

203 个, 2012 年为 155 个, 因此, 各省水足迹空间联系有待加强。整体网络密度由 0.146 上升到 0.233, 再下降到 0.178(表 1), 虽然水足迹贸易值在 2012 年增长较高, 但水足迹空间关联网络的密度和

表 1 中国水足迹空间关联网络整体特征

Table 1 Overall network characteristics of spatial association of China's water footprint

年份	总水足迹/亿 m ³	网络密度	关联度	关联关系数	等级度	效率
2002	3673.71	0.146	1	127	0.517	0.759
2007	3167.64	0.233	1	203	0.552	0.571
2012	3958.10	0.178	1	155	0.536	0.690

关联系数却不是以相同的速率增加,只有 17.8% 的链接存在于网络当中,说明省份之间的流量增加较多,并且网络中显示的流量占水足迹总流量的 59.49%,较高的占比表明了中国水资源转移对水足迹空间关联网络的依赖程度较高。由表 1 可知 3 个年度的网络关联度都为 1,说明中国水足迹空间关联网络通达性强,每个省的水足迹都与其他省存在直接或间接的联系。网络等级度由 0.517 上升到 0.552,再下降到 0.536,这一趋势说明水足迹空间关联性逐渐增强,各省之间的链接数量分布更加均匀,使得水资源转移更加均匀分布,但并不意味着省间的流量分布更加均匀,从整体来看,等级度的数值较高,表明中国水足迹空间关联网络仍然存在较大的等级差异,存在少数的核心省份,网络结构需要加强优化。网络效率在 2012 年为 0.690,数值较大,表明水足迹网络中流量较多的集中在少数链接路径上,分散路径较少,具有较高的有序性和组织性,但是,网络的高效率低冗余,使得水足迹空间关联网络在面对内部或外部的动态变化时,韧性不够,容易发

生崩塌和变形,因此,网络稳定性有待加强,需要适度的降低网络效率,增加流量的路径选择。

表 2 为水足迹空间关联网络中节点链接数量变化较大、较小和几乎不变的辽宁、江苏、山东和四川 4 省与其他省水足迹流量的变化(不包括省内的流量变化,其中江苏和山东变化较大,辽宁变化较小,四川基本不变),辽宁省水足迹流量主要集中在吉林和黑龙江,江苏省水足迹流量主要集中在上海和浙江,山东省水足迹流量主要集中在河北,而四川省水足迹流量主要集中在重庆、贵州、云南和广西。可以看出无论节点链接数量怎样变化,各省的水足迹流量主要集中在少数链接路径上,且这些链接路径大多集中在相邻或相近的省,这也使得中国水足迹空间关联网络的韧性和稳定性较弱。

3.2 中心性分析

各省在水足迹空间关联网络中的地位和作用变化通过关联网络的中心性特征来具体分析,表 3 为 2002 年、2007 年和 2012 年中国水足迹空间关联网络中心性特征值。

表 2 辽宁、江苏、山东和四川与其他省水足迹流量变化

Table 2 Changes in water footprint flow in Liaoning, Jiangsu, Shandong, Sichuan and other provinces 10^8 m^3

省级行政区	辽 宁			江 苏			山 东			四 川		
	2002 年	2007 年	2012 年	2002 年	2007 年	2012 年	2002 年	2007 年	2012 年	2002 年	2007 年	2012 年
辽 宁				0.61	0.44	2.71	1.68	1.13	1.69	1.73	0.88	2.00
吉 林	26.09	32.43	30.02	0.29	0.35	1.35	0.79	0.89	0.84	0.82	0.69	1.00
黑 龙 江	44.47	28.89	35.20	0.49	0.31	1.59	1.35	0.79	0.99	1.39	0.61	1.17
北 京	2.61	2.07	3.25	1.66	0.45	2.27	8.18	4.29	2.43	1.95	0.63	2.10
天 津	1.18	1.04	2.10	0.75	0.23	1.47	3.68	2.15	1.57	0.88	0.32	1.36
河 北	1.48	4.94	2.93	2.18	1.13	2.23	45.40	32.29	43.77	1.92	1.94	2.38
山 东	2.63	9.47	5.32	3.89	2.17	4.05				3.42	3.72	4.32
上 海	0.31	2.46	3.32	48.21	26.71	36.83	0.91	2.29	1.86	1.07	1.81	2.22
江 苏	0.54	4.73	7.23				1.56	4.40	4.05	1.85	3.48	4.84
浙 江	0.37	3.72	5.06	57.41	40.44	56.02	1.08	3.46	2.83	1.28	2.74	3.38
福 建	0.23	1.53	2.77	0.79	1.40	1.65	0.32	1.37	1.31	1.42	3.38	1.82
广 东	0.74	4.87	8.92	2.53	4.43	5.33	1.01	4.36	4.21	4.51	10.73	5.85
海 南	0.03	0.22	0.47	0.11	0.20	0.28	0.05	0.20	0.22	0.20	0.48	0.31
山 西	0.25	1.24	1.38	1.35	0.99	1.50	0.62	2.32	0.94	0.66	1.27	1.01
河 南	0.66	3.32	1.38	3.64	2.65	1.50	1.67	6.20	0.94	1.76	3.39	1.01
安 徽	0.38	2.16	3.61	2.11	1.72	3.92	0.97	4.03	2.45	1.02	2.21	2.65
湖 北	0.56	2.22	1.92	3.09	1.77	2.08	1.41	4.15	1.30	1.49	2.27	1.41
湖 南	0.51	2.40	2.36	2.83	1.91	2.56	1.30	4.48	1.60	1.37	2.45	1.74
江 西	0.30	1.50	2.48	1.63	1.20	2.69	0.74	2.80	1.68	0.79	1.53	1.82
内 蒙 古	1.09	0.86	1.88	0.75	0.45	2.46	1.32	1.22	1.25	2.66	1.17	1.38
陕 西	1.23	0.91	1.88	0.84	0.48	2.46	1.48	1.30	1.25	2.99	1.24	1.38
宁 夏	0.24	0.18	2.15	0.16	0.09	2.83	0.28	0.26	1.43	0.57	0.25	1.58
甘 肃	0.83	0.52	0.38	0.56	0.27	0.50	1.00	0.74	0.25	2.01	0.71	0.28
青 海	0.23	0.15	1.03	0.15	0.08	1.36	0.27	0.22	0.69	0.55	0.21	0.76
新 疆	1.03	0.60	0.33	0.70	0.32	0.43	1.24	0.86	0.22	2.50	0.82	0.24
四 川	0.47	2.19	3.24	0.86	1.02	3.41	0.39	1.68	1.80			
重 庆	0.20	0.89	3.24	0.36	0.41	3.41	0.17	0.68	1.80	31.92	17.39	54.32
贵 州	0.15	0.76	1.45	0.27	0.36	1.52	0.12	0.59	0.80	23.53	14.93	24.28
云 南	0.23	1.09	1.05	0.41	0.51	1.11	0.19	0.84	0.59	36.34	21.35	17.70
广 西	0.25	1.25	1.77	0.45	0.58	1.87	0.21	0.96	0.98	39.73	24.36	29.76

表3 2002年、2007年和2012年中国水足迹空间关联网络中心性

Table 3 Centrality of China's water footprint spatial association network in 2002, 2007 and 2012

省级 行政区	关联省份数			点出度			点入度			点度中心度			接近中心度			中间中心度		
	2002年	2007年	2012年	2002年	2007年	2012年	2002年	2007年	2012年	2002年	2007年	2012年	2002年	2007年	2012年	2002年	2007年	2012年
北京	8	7	8	3	4	7	5	3	1	17.4	13.7	24.1	42.0	47.5	55.8	1.3	0.1	0.6
天津	6	4	5	4	3	4	2	1	1	13.8	10.3	13.8	43.3	45.3	52.7	3.5	0.0	0.0
河北	4	19	5	2	8	3	2	11	2	6.9	58.6	13.8	38.7	70.7	52.7	0.0	6.4	0.0
山西	10	13	12	5	8	7	5	5	5	17.2	27.6	24.1	34.5	56.9	55.8	0.0	0.0	0.0
内蒙古	12	15	12	7	10	7	5	5	5	24.1	41.4	27.6	42.7	63.0	56.9	3.4	0.1	0.1
辽宁	5	8	8	3	6	6	2	2	2	10.3	20.6	20.7	39.7	55.8	54.7	3.3	0.0	0.4
吉林	5	8	6	3	6	4	2	2	2	10.3	20.7	13.8	39.7	55.8	52.7	3.3	0.0	0.0
黑龙江	4	8	6	2	6	4	2	2	2	6.9	20.7	13.8	29.0	55.8	52.7	0.0	0.0	0.0
上海	4	13	4	2	3	2	2	10	2	6.9	37.9	6.9	26.1	60.4	45.3	0.0	0.2	0.0
江苏	5	24	25	2	3	3	3	21	22	10.3	72.4	75.9	34.5	78.4	78.4	13.3	7.5	21.1
浙江	4	18	7	2	3	2	2	15	5	6.9	55.2	17.2	26.1	69.1	53.7	0.0	1.7	1.3
安徽	10	16	13	5	9	7	5	7	6	17.2	34.5	27.6	34.5	60.4	56.9	0.0	0.2	0.4
福建	5	4	4	2	2	2	3	2	2	10.3	10.3	6.9	33.3	50.9	50.0	0.2	0.1	0.0
江西	10	14	12	5	9	7	5	5	5	17.2	31.0	24.1	34.5	59.2	55.8	0.0	0.1	0.0
山东	15	27	14	3	9	3	12	18	11	41.3	69.0	41.4	60.4	76.3	61.7	74.0	9.1	2.3
河南	12	24	12	7	10	7	5	14	5	24.1	58.6	24.1	48.3	70.7	55.8	45.1	1.9	0.0
湖北	10	16	12	5	9	7	5	7	5	17.2	34.5	24.1	34.5	60.4	55.8	0.0	0.2	0.0
湖南	10	17	12	5	10	7	5	7	5	17.2	37.9	24.1	34.5	61.7	55.8	0.0	0.4	0.0
广东	11	34	31	3	7	5	8	27	26	31.0	93.1	93.1	46.8	93.6	93.6	21.6	44.5	56.1
广西	9	10	8	5	5	4	4	5	4	17.2	17.2	13.8	33.7	52.7	36.7	0.0	0.0	0.0
海南	4	3	4	2	2	2	2	1	2	6.9	6.9	6.9	32.6	50.0	50.0	0.0	0.0	0.0
重庆	9	9	9	5	5	5	4	4	4	17.2	17.2	17.2	33.7	52.7	53.7	0.0	0.0	1.5
四川	10	11	9	6	5	5	4	6	4	20.7	20.7	17.2	44.6	53.7	53.7	10.2	0.5	1.5
贵州	9	9	9	5	5	5	4	4	4	17.2	17.2	17.2	33.7	52.7	53.7	0.0	0.0	1.5
云南	9	9	9	5	5	5	4	4	4	17.2	17.2	17.2	33.7	52.7	53.7	0.0	0.0	1.5
陕西	11	15	12	6	10	7	5	5	5	20.7	41.4	27.6	42.0	63.0	56.9	2.7	0.1	0.1
甘肃	11	15	11	6	10	7	5	5	4	20.7	41.4	24.1	42.0	63.0	55.8	2.7	0.1	0.0
青海	10	11	12	5	11	7	5	0	5	17.2	37.9	27.6	31.5	61.7	56.9	0.0	0.1	0.1
宁夏	12	11	12	7	11	7	5	0	5	24.1	37.9	27.6	42.7	61.7	56.9	3.4	0.1	0.1
新疆	10	14	7	5	9	7	5	5	0	17.2	37.9	24.1	31.5	61.7	55.8	0.0	0.1	0.0
平均值	8.0	13.5	10.3	3.0	6.8	5.2	5.0	6.8	5.2	17.2	34.7	24.6	42.0	60.6	56.0	6.3	2.5	3.0

a. 点度中心度。由表3可知2002年的点度中心度的平均值为17.2,有20个省高于或等于平均值,这些省一部分是经济比较发达的地区,如东部沿海和南部沿海地区,其点入度要远高于点出度,说明这些省的水足迹接收其他省的溢出关系较多,原因在于这些省经济发展较快,吸引了其他省的劳动力、资金和资源等;另一部分是经济发展相对落后的地区,或是资源较丰富的地区,如西北、西南和中部地区,点出度高于点入度,原因在于这些省为了自身的发展,向其他省输出资源。2007年点度中心度的平均值为34.7,有14个省高于平均值,大多位于西北地区,并且点出度要高于点入度。2012年点度中心度的平均值为24.6,有8个省高于平均值,与之前相比,高于平均值的省不断减少,存在少数省数值较高,说明各个省的关联系数的差距不断缩小,中国水足迹空间关联网络逐渐趋于均衡发展。结合整体网络特征以及表2的水足迹流量变化,可以看出节点间的链接数量增多,节点的强度增加,但并不代表

节点间的流量增多,流量更多地集中在少数主要的链接路径上。

b. 接近中心度。2002年30个省的水足迹接近中心度的平均值为42.0,有10个省高于或等于平均值;2007年的平均值为60.6,有13个省高于平均值;2012年的平均值为56.0,有8个省高于平均值。接近中心度的数值增加,说明中国水足迹空间关联网络产生的溢出关系不断增多,而高于平均值的这些省,在网络中发挥着重要的传输作用,即在关联网络中这些省份与网络中其他省的“链接距离”较短,能够更加密切和快捷地与其他省发生溢出关系。从2002年到2012年高于接近中心度平均值的省有所减少,存在少数永久性活跃的链接路径,个别省的链接数量有所增加或者消失,并且到2012年各个省的接近中心度的数值都接近于平均值,说明中国水足迹空间关联网络会产生更多的溢出关系,网络结构不断优化,水资源转移也逐渐向均匀分布发展。

c. 中间中心度。从2002年、2007年和2012年

表4 中国水足迹空间关联网络板块划分

Table 4 China's water footprint spatial association network plate division

板 块	成 员	板块特征
第一板块	北京、天津、河北、陕西、内蒙古、青海、宁夏、黑龙江、新疆、甘肃	净溢出板块
第二板块	江苏、广东、山东、辽宁、吉林、上海、海南、浙江、福建	净受益板块
第三板块	湖北、安徽、湖南、河南、江西、山西	双向溢出板块
第四板块	贵州、广西、云南、重庆、四川	经纪人板块

的中间中心度的平均值依次为 6.3、2.5、3.0。中间中心度的数值不断下降,说明网络中一些省在控制其他省关于水足迹关联方面的能力不断下降,体现了中国水足迹在空间上更加趋于均衡发展。这些省在中国水足迹空间关联网络的形成中,起着关键的桥梁作用,对其他省的水足迹关联有着较强的控制力。由表3可见,大部分省的中间中心度在不断下降(如山东等),少数省的中间中心度在不断上升(如广东),使得个别中间中心度较高的省在网络中处于“垄断”的地位。中间中心度上升说明这些省在网络中发挥的作用越来越大,不再只是依赖于其他的核心省份。对比这3年的变化,绝大部分省的中间中心度都处于下降的趋势,表明中国水足迹空间关联网络的等级差异在不断缩小,网络内部逐渐向合理化方向发展。

综上得出,网络的等级差异在不断缩小,网络内部逐渐向合理化方向发展,水足迹空间关联网络处在动态变化中,网络中的链接只有一部分是永久保持活跃的,流量更多地集中在少数主要的链接路径上,并且,随着一些省份链接数量的增加,会削弱其他省的链接数目,表明网络具有较强的可塑性特征,即其在结构和功能上能随时改变。因此,可以通过改变水足迹空间关联网络的结构和功能,达到合理配置水资源空间分布和提高水资源利用率的目标,缓解水贫困地区的水资源短缺问题。

3.3 块模型分析

采用 CONCOR 方法,选取 2 为最大分割深度,0.2 为收敛标准,以 Wasserman 和 Faust 的划分标准^[30]将水足迹空间关联网络划分为 4 个板块:净受益板块、净溢出板块、经纪人板块和双向溢出板块。以 2012 年为例,将中国水足迹空间关联矩阵中的 30 个省份划分为 4 大板块如表 4 所示,并将板块间的溢出效应列于表 5,可更加清晰地分析板块内部和板块间的溢出关系。

由表 5 可知,2012 年我国水足迹空间关联网络中存在 155 条溢出关系,其中板块内部 105 条,板块外部 50 条,说明板块之间的溢出关系主要是以板块内部的溢出为主,主要原因是板块内部的省份之间距离较近,产品转移方便,运输成本较低。第一板块

有 10 名成员,接收的关系总数为 28 条,其中来自板块内 27 条,来自其他板块 1 条,溢出的关系总数为 60 条,向其他板块的溢出关系较多,实际内部关系比例略高于期望值,溢出关系远多于接收关系,为净溢出板块;第二板块有 9 名成员,接收的关系总数为 76 条,其中来自板块内 28 条,来自其他板块 48 条,溢出的关系总数为 29 条,其中溢出到其他板块的为 1 条,实际内部关系比例大大高于期望值,为净受益板块;第三板块有 6 名成员,接收的关系总数为 31 条,其中来自板块内 30 条,来自其他板块 1 条,溢出的关系总数为 42 条,其中向板块内的溢出关系为 30 条,溢出到其他板块的为 12 条,实际内部关系比例要高于期望值较多,该板块向板块内部以及其他板块发出的关系较多,为双向溢出板块;第四板块有 5 名成员,接收的关系总数为 20 条,均来自板块内部,溢出的关系总数为 24 条,其中向板块内的溢出关系为 20 条,溢出到其他板块的为 4 条,实际内部关系比例要大大高于期望值,为经纪人板块。

为了更深入地探讨各板块之间的空间联系,根据块模型之间的空间溢出关系,计算出各板块之间的密度矩阵,如果密度值高于整体网络密度 0.178,则赋值为 1,若低于 0.178,则赋值为 0。由此得到各水足迹板块的密度矩阵和像矩阵如表 6 所示。

第一板块发出的溢出关系主要集中在板块内部,其次是第二和第三板块,与第四板块没有溢出关系,接收来自板块内部和第二板块的溢出关系,主要原因是其中一部分板块成员经济发展较为落后,为了满足自身经济的发展,与其他的地区存在较多的溢出关系,并且通过溢出的水足迹向其他省输出了大量水资源;另一部分成员由于其便利的地理位置

表5 各水足迹板块之间的溢出效应

Table 5 Spillover effects between water footprint plates

板 块	板块成员数目	接收关系				溢出关系		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%
		第一板块	第二板块	第三板块	第四板块	板块内	板块外		
第一板块	10	27	1	0	0	27	33	31.03	45.00
第二板块	9	32	28	12	4	28	1	27.59	96.55
第三板块	6	1	0	30	0	30	12	20.69	71.43
第四板块	5	0	0	0	20	20	4	17.24	83.33

表6 各水足迹板块的密度矩阵和像矩阵

Table 6 Density matrix and image matrix of each water footprint plate

板 块	密度矩阵				像矩阵			
	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块
第一板块	0.411	0.233	0.017	0.000	1	1	0	0
第二板块	0.022	0.389	0.000	0.000	0	1	0	0
第三板块	0.000	0.222	1.000	0.000	0	1	1	0
第四板块	0.000	0.089	0.000	1.000	0	0	0	1

和较高的经济地位,使其与其他省有较强的经济联系,因此,向其他省发出了较多的溢出关系。第二板块发出的溢出关系主要集中在板块内部,其次为第一板块,与第三和第四板块没有发生溢出关系,接收的溢出关系依次为板块内部、第一板块、第三板块和第四板块,主要原因是板块成员多为经济发达省份,需要大量的资源来满足发展所需,所以向其他板块发出的溢出关系较少,接收其他板块的溢出关系较多,并且通过接收的水足迹,满足了当地的生产和生活所需的水资源量,但是由于这些地区的水资源紧缺程度较低,接收较多的溢出关系,从整体上加剧了全国水资源短缺的现状。第三板块主要向板块内部发出溢出关系,向第二板块发出的溢出关系较少,与第一和第四板块没有发生关系,只接收板块内部和第一板块的溢出关系。第四板块发出的溢出关系主要指向板块内部,然后指向第二板块,与第一和第三板块没有发生溢出关系,接收的溢出关系也只在板块内部,发挥着“中介”的作用。

4 结 论

a. 各省间的链接数量并没有随水足迹贸易值的增加而增加,但链接路径上的流量不断增加,使得水资源转移更加均匀分布;中国水资源转移对水足迹空间关联网络的依赖程度较高,但是网络的韧性不够,应对内外部变化的能力较弱,网络结构存在一定的等级差异,稳定性有待增强。应加大不同经济发展水平省份的经济联系,缩小经济发展的等级差异,转变消费结构和类型,使链接路径上的流量能够均匀分布。

b. 水足迹空间关联网络是动态的,各省链接数量、强度的增加,不代表流量也随之增加,网络中只存在一部分永久性活跃的链接路径,并且流量主要集中在这些路径上,一些省份链接的增加,会削弱其他省的链接数目,网络的这种可塑性特征,表明可以通过改变水足迹空间关联网络的结构和功能,达到合理配置水资源空间分布和提高水资源利用率的目标。可以明确每个省的经济定位,保证其在发展的同时能较少地干扰其他省的发展,这样不仅可以增

加各省的链接数量,同时还可以确保流量的增加,进而增加活跃链接路径的数量。

c. 把水足迹空间关联网络分为4个板块,板块间的溢出关系主要是以板块内部为主,并且少数板块之间没有任何的溢出关系。未来经济的发展可能会加强水资源在全国范围内的流动,这种不平衡的溢出关系,在很大程度上会使“富人越富”的现象更加显著,加剧了大多数地区对少数水足迹贸易中心的依赖,不利于水资源在全国范围内的合理配置。因此,在进行水资源管理的时候,不仅要考虑各省的水资源压力,更重要的是要考虑到水资源利用的空间转移问题,水足迹较高的省,水资源压力却不是很大,可以调整产业结构,提高本地或输入资源与产品的利用率,发展循环经济;与之相应的,水足迹较低但水资源压力较大的省,应重新制定经济发展战略,依靠自身的资源或位置优势,发展特色产业来代替初级产品的输出。

参考文献:

- [1] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade [R]. Delft, The Netherlands: IHE, 2003.
- [2] 黄凯,王梓元,杨顺顺,等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 78-83. (HUANG Kai, WANG Ziyuan, YANG Shunhun, et al. Theory, calculation method and application progress of water footprint [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 78-83. (in Chinese))
- [3] 王新华,徐中民,龙爱华. 中国2000年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土, 2005(5): 774-780. (WANG Xinhua, XU Zhongmin, LONG Aihua. Estimation of water footprint of China in 2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005(5): 774-780. (in Chinese))
- [4] 盖美,吴慧歌,曲本亮. 新一轮东北振兴背景下的辽宁省水资源利用效率及其空间关联格局研究[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1336-1349. (GAI Mei, WU Huige, QU Benliang. Water resource utilization efficiency and disparities in spatial correlation pattern research in Liaoning under the background of new round revitalization of Northeast China [J]. Resources Science, 2016, 38(7):

- 1336-1349. (in Chinese))
- [5] ZHAO C, CHEN B. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21):12723-12731.
- [6] OKADERA T, CHONTANAWAT J, GHEEWALA S H. Water footprint for energy production and supply in Thailand[J]. Energy, 2014, 77:49-56.
- [7] 潘安娥, 陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析:基于水足迹视角[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 328-333. (PAN Ane, CHEN Li. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in Hubei[J]. Resources Science, 2014, 36(2):328-333. (in Chinese))
- [8] 潘文俊, 曹文志, 王飞飞, 等. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价[J]. 资源科学, 2012, 34(10): 1905-1912. (PAN Wenjun, CAO Wenzhi, WANG Feifei, et al. Evaluation of water resource utilization in the Jiulong River Basin based on water footprint theory[J]. Resources Science, 2012, 34(10):1905-1912. (in Chinese))
- [9] 杨子江, 韩伟超. 基于水足迹理论的昆明市水资源可持续利用研究[J]. 生态经济, 2017, 33(6): 196-200. (YANG Zijiang, HAN Weichao. Study on sustainable utilization of water resources in Kunming based on the theory of water footprint[J]. Ecological Economy, 2017, 33(6):196-200. (in Chinese))
- [10] HU T, HUANG K, YU Y, et al. Measuring water footprint on a lake basin scale: a case study of Lake Dianchi, China [J]. CLEAN: Soil, Air, Water, 2016, 44(10): 1296-1305.
- [11] JIAN L, JIHUI Z. Trend forecast and dynamic adjustment for water footprint of Tianjin [J]. Areal Research and Development, 2011(5): 131-134.
- [12] FENG K, CHAPAGAIN A, SUH S, et al. Comparison of bottom-up and top-down approaches to calculating the water footprints of nations [J]. Economic Systems Research, 2011, 23(4): 371-385.
- [13] LEONTIEF W, FORD D. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach [J]. Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3): 262-271.
- [14] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6481-6488. (CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20):6481-6488. (in Chinese))
- [15] 吴兆丹, 赵敏, 石常峰, 等. 基于生产视角的江苏省与中国其他省区水足迹比较[J]. 水利经济, 2017, 35(2): 16-21. (WU Zhaodan, ZHAO Min, SHI Changfeng, et al. Comparison of water footprints in Jiangsu Province and other provinces in China from production perspective[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(2): 16-21. (in Chinese))
- [16] 柳雅文, 赵旭, 刘俊国. 天津市最终产品本地用水量测度及其驱动机理研究[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1913-1924. (LIU Yawen, ZHAO Xu, LIU Junguo. Changes and mechanism of internal water use of products in Tianjin [J]. Resources Science, 2016, 38(10): 1913-1924. (in Chinese))
- [17] FENG K, SIU Y L, GUAN D, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: a consumption based approach[J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 691-701.
- [18] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较:基于“总量-相关指标-结构”分析框[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 76-87. (WU Zhaodan, ZHAO Min, TIAN Ze, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: in the analytical framework of “amount-relative index-structure” [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1):76-87. (in Chinese))
- [19] 吴兆丹, 王张琪, LALL U. 生产视角下的中国水足迹空间差异研究:基于经济区域分析层次[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2039-2050. (WU Zhaodan, WANG Zhangqi, LALL U. Spatial difference of water footprint in China in the production perspective based on the analytical hierarchy of economic regions [J]. Resources Science, 2015, 37(10):2039-2050. (in Chinese))
- [20] ZHANG C, ANADON L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China[J]. Ecological Economics, 2014, 100:159-172.
- [21] DENG G, MA Y, LI X. Regional water footprint evaluation and trend analysis of China: based on interregional input-output model [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:4674-4682.
- [22] DONG H, GENG Y, FUJITA T, et al. Uncovering regional disparity of China's water footprint and inter-provincial virtual water flows[J]. Science of The Total Environment, 2014, 500/501:120-130.
- [23] CAZCARRO I, HOEKSTRA A Y J, CHÓLIZ S. The water footprint of tourism in Spain [J]. Tourism Management, 2014, 40(1):90-101.
- [24] 马丽君, 龙云. 基于社会网络分析法的中国省际入境旅游经济增长空间关联性[J]. 地理科学, 2017, 37(11): 1705-1711. (MA Lijun, LONG Yun. The spatial correlation of economic growth of inbound tourism in China based on social network analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(11):1705-1711. (in Chinese))

- [25] 邹晴晴,王勇,李广斌. 基于 SNA 的新型集中社区公共空间网络结构优化[J]. 地理科学进展,2016,35(7): 829-838. (ZOU Qingqing, WANG Yong, LI Guangbin. Network structure optimization of public space in new concentrated communities based on SNA[J]. Progress in Geography,35(7):829-838. (in Chinese))
- [26] 付琼鸽,刘大均,胡静,等. 湖北省旅游流网络结构的特征与优化[J]. 经济地理,2015,35(3): 191-196. (FU Qiongg, LIU Dajun, HU Jing, et al. Network structure and optimization research on the Hubei Province tourist flow [J]. Economic Geography, 2015, 35 (3): 191-196. (in Chinese))
- [27] 叶强,张丽璇,彭鹏,等. 基于百度迁徙数据的长江中游城市群网络特征研究[J]. 经济地理,2017,37(8):53-59. (YE Qiang, ZHANG Lixuan, PENG Peng, et al. The network characteristics of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River based on Baidu migration data [J]. Economic Geography, 2017, 37 (8): 53-59. (in Chinese))
- [28] 张德钢,陆远权. 中国碳排放的空间关联及其解释:基于社会网络分析法[J]. 软科学,2017,31(4):15-18. (ZHANG Degang, LU Yuanquan. Study on the spatial correlation and explanation of carbon emission in China: based on social network analysis[J]. Soft Science, 2017, 31(4):15-18. (in Chinese))
- [29] 王金莹,吴晋峰,唐澜,等. 亚洲入境旅游流地理分布及网络结构特征分析[J]. 资源科学,2013,35(8):1701-1709. (WANG Jinying, WU Jinfen, TANG Lan, et al. Distribution of Asian inbound tourist flows and structural characteristics [J]. Resources Science, 2013, 35 (8): 1701-1709. (in Chinese))
- [30] 马丽君,肖洋. 典型城市居民国内旅游流网络结构特征[J]. 经济地理,2018,38(2):197-205. (MA Lijun, XIAO Yang. The structure characteristics of domestic tourist flow network in typical urban dweller [J]. Economic Geography, 2018, 38(2):197-205. (in Chinese))
- [31] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 29-36. (in Chinese))

(收稿日期:2019-04-26 编辑:熊水斌)

(上接第 8 页)

- [63] FAJARDO C, ORTÍZ L T, RODRÍGUEZ-MEMBIBRE M L, et al. Assessing the impact of zero-valent iron (ZVI) nano technology on soil microbial structure and functionality: a molecular approach [J]. Chemosphere, 2012, 86:802-808.
- [64] GOU N, YUAN S H, LAN J Q. A quantitative toxicogenomics assay reveals the evolution and nature of toxicity during the transformation of environmental pollutants [J]. Environment Science Technology, 2014, 48:8855-8863.
- [65] 滕应,骆永明,高军,等. 多氯联苯污染土壤茵根真菌-紫花苜蓿-根瘤菌联合修复效应[J]. 环境科学,2008, 29(10):2925-2930. (TENG Ying, LUO Yongming, GAO Jun, et al. Combined remediation effects of arbuscular mycorrhizal fungi-legumes-rhizobium symbiosis on PCBS contaminated soils [J]. Environmental Science, 2008, 29 (10):2925-2930. (in Chinese))
- [66] 杨静. PAHs 污染土壤植物修复的根际效应及机制 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [67] 薛南冬,李发生. 持久性有机污染物 (POPs) 污染场地风险控制与环境修复[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [68] 范小欢. 老化多氯联苯的生物可利用性及其在土壤体系中的厌氧修复[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [69] LIU S H, ZENG G M, NIU Q Y, et al. Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: a mini review [J]. Bioresource Technology, 2017, 224:25-33.
- [70] 单稼琪. 多环芳烃对生物滞留系统的影响及微生物的生态效应研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [71] 王东琦,单稼琪,李怀恩,等. 生物滞留系统去除城市地表径流中多环芳烃的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):1-8. (WANG Dongqi, SHAN Jiaqi, LI Huaen, et al. Advance on removal of polycyclic aromatic hydrocarbon by bioretention system in urban surface runoff [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(5):1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-29 编辑:彭桃英)

