

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.005

基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析

孙克¹, 聂坚²

(1. 江西科技师范大学经济管理学院, 江西 南昌 330038; 2. 江西省核工业地质局, 江西 南昌 330046)

摘要:采用引力模型构建了中国2000—2014年省域灰水足迹的空间关联网络,应用社会网络分析法,从关系网络的视角,对省域水污染的空间关联网络结构特征及其效应进行了分析。结果表明:省际灰水足迹空间关联网络化特征明显,2000—2014年空间联系愈发紧密,等级森严的网络结构逐步松动,网络趋于稳定;上海、天津、江苏、北京、浙江等省市处于网络的中心位置,在省际空间关联中发挥了重要的“枢纽桥梁”功能;网络可划分为主受益、净受益、经纪人、主溢出4个功能板块,板块间溢出效应明显,存在互惠、三方传递和循环传导特性,板块地理空间分布呈现出大集聚小分散的特征,板块间存在地理邻近和跨地域边界两种空间关联方式;网络结构对灰水足迹强度具有显著影响,网络密度及节点中心性的提高、网络等级度及网络效率的降低,可以有效促进灰水足迹强度的下降,缩小省际差异。

关键词:灰水足迹;空间关联;社会网络;网络结构效应;省域;中国

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0029-08

Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model // SUN Ke¹, NIE Jian² (1. College of Economics and Management, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China; 2. Jiangxi Nuclear Industry Geology Bureau, Nanchang 330046, China)

Abstract: A spatial correlation network of grey water footprints in China's provinces from 2000 to 2014 is constructed by gravity model. The structural characteristics and effects of spatial correlation network of provincial water pollution are analyzed from the perspective of social network analysis. The results show that the inter-provincial grey water footprint has obvious network characteristics. The spatial connection became more and more close, the hierarchical network structure gradually loosened, and the network tended to be stable from 2000 to 2014. Shanghai, Tianjin, Jiangsu, Beijing, Zhejiang and other provinces are at the center of the network and play an important "hub bridge" function in inter-provincial spatial association. The network can be divided into four functional blocks: main benefit, net benefit, broker and main overflow. The inter-plate spillover effect is obvious with the characteristics of reciprocity, tripartite transmission and circular transmission. The geographical spatial distribution of the plates shows the characteristics of large agglomeration and small dispersion. There are two spatial correlation modes between the plates: geographical proximity and cross-regional boundary. The network structure has a significant impact on the intensity of grey water footprint. The improvement of network density and node centrality, the reduction of network grade and network efficiency can effectively promote the decline of grey water footprint intensity, and reduce the inter-provincial differences.

Key words: grey water footprint; spatial correlation; social network; network structure effect; provincial region; China

水资源是一个国家可持续发展的重要战略性资源。人多水少、水资源时空分布不均、水资源短缺与粗放利用、水污染严重、水生态恶化等已成为当下中国水资源管理面临的突出问题,成为制约国民经济和社会发展的主要瓶颈。2012年1月12日,国务

院出台了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,为水资源的管理提供了政策制度保障。水足迹可以科学有效衡量人类生产生活对水资源的消费占用水平,已成为水资源环境研究领域的重要内容^[1]。然而水足迹理论由于只关注水资源量的问

题,而忽视水资源质的问题,容易低估地区水环境问题^[2-3]。孙克等^[3-4]认为人类的生产生活对水资源的污染威胁,可以用灰水足迹来衡量,具体来说,灰水足迹就是将人类生产生活排放的水污染物质稀释至合理水质标准所需的水资源量,这为量化水量和水质的关系提供了新途径。目前,灰水足迹已成为有效刻画和评价地区水污染的重要指标^[5]。

现有灰水足迹的研究主要集中在灰水足迹的核算及模型改进^[5-7]、环境公平性评价^[8]、要素效率测算及驱动效应^[9-10]、人文影响因素分析^[3]、空间格局演变^[11]等方面,这些研究大都基于地区属性数据(各地区的灰水足迹、GDP、人口等)开展,而忽视地区间的互动关系。事实上,地区水污染环境背后隐藏着复杂的人口资源和经济技术问题,由于人流、物(资源)流、资金流、信息流、技术流等要素在地区间的频繁流动融合,各地水环境想独善其身、互不影响已无可能^[12-13],而是会基于地区间要素流动产生空间关联性^[14-15],空间关联性的进一步深化演绎,就会形成复杂的环境空间关联网络,即各地为空间关联网络的节点,各地灰水足迹之间的相互影响联系(受益和溢出关系)则构成网络的边。根据复杂网络理论,网络结构会影响区域整体水环境的表现,而且也会影响局部地区个体的水环境。囿于本地个体水环境属性视角的区域水资源管理政策,在处理区域水环境协调治理问题上先天不足,政策的科学性、适应性和有效性不可避免地存在局限性^[16-17]。因此,有必要从新的研究视角,即关系网络视角来重新审视区域水资源环境管理政策。

选择中国31个省级行政区(不含港澳台,以下简称“省”)为研究对象,通过引力模型构建省际灰水足迹空间关联网络,在此基础上,采用社会网络分析和计量经济学方法,从关系网络的视角,对2000—2014年省际灰水足迹的空间关联网络结构特征及其效应进行深入分析,以期对制定科学有效的水资源环境管理政策提供参考。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 灰水足迹关联关系的确定

灰水足迹关联关系的确定常用引力模型,本文采用修正的引力模型进行省际灰水足迹空间关联关系强度的测算,计算公式^[18-19]为

$$F_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{G_i w_i P_i} \sqrt[3]{G_j w_j P_j}}{[D_{ij} / (g_i - g_j)^2]} \quad (1)$$

其中

$$k_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j}$$

式中: F_{ij} 为省*i*和省*j*之间的灰水足迹引力; w_i 、 w_j 分别为省*i*和省*j*的灰水足迹; P_i 、 P_j 分别为省*i*和省*j*的人口; G_i 、 G_j 分别为省*i*和省*j*的实际GDP; g_i 、 g_j 分别为省*i*和省*j*的人均GDP; D_{ij} 为省*i*和省*j*之间的地理距离。为了同时考虑地理距离和经济距离因素对灰水足迹空间关联关系的影响,本文以省间的地理距离 D_{ij} 与省间的人均GDP的差值($g_i - g_j$)之比来表征不同省之间的“距离”。 D_{ij} 可采用省会城市之间的距离表示,一般依据省会城市的经纬度计算得到。

根据式(1)可以构建省际灰水足迹的空间关联矩阵(网络)。为了便于进行网络分析和过滤掉相对微弱关联关系的影响,一般会选取合适的阈值对关联矩阵进行二值化处理。参考以往研究,本文以空间关联矩阵各行的平均值作为阈值进行二值化处理,如果关联矩阵中元素的值大于或等于阈值则为1,否则为0。

1.1.2 网络结构分析方法

社会网络分析技术可以有效刻画空间关联网络的结构特征^[20]。一般采用网络密度、网络等级度和网络效率来分析网络的整体特征,采用度数中心度、接近中心度和中介中心度来刻画网络的个体特性,采用块模型对网络各个块(位置)的角色进行分析。具体计算公式和方法见文献[20]。

1.2 数据来源

本文以中国31省(不含港澳台)作为网络节点,样本考察期设定为15年(2000—2014年)。灰水足迹一般包含工业灰水足迹、农业灰水足迹和生活灰水足迹^[3],本研究省际灰水足迹数据直接依据文献[8,10,12]整理计算得到,相关人口、经济、环境数据来源于历年《中国统计年鉴》。

2 结果分析

2.1 网络的可视化分析

根据式(1),可以计算构建省际灰水足迹的空间关联网络。为了便于分析,可以进一步采用Arcgis软件的转线工具对省际灰水足迹的空间关联关系进行可视化表达。限于篇幅本文只对2014年省际灰水足迹空间关联网络的可视化图形(图1)进行分析。从图1可以发现:2014年省际灰水足迹的空间关联关系错综复杂,呈现出网络化特征,没有孤立省份,网络关联程度较高;空间关联关系主要集中在中东部省份之间,西部省份之间的空间关联关系较稀疏,在地理空间上表现出了一定程度的非均衡格局特征;空间关联并非只发生在地理邻近的省份之间,彼此相距较远的省份之间也会发生空间

关联关系,如地处偏远的西藏与东部的北京、天津、上海、江苏、浙江、福建等相距较远的省份之间发生了空间关联关系,呈现出跨地域空间关联的特征。

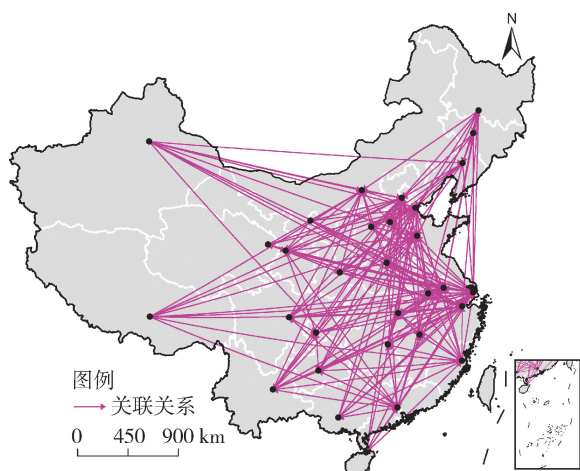


图1 2014年中国省际灰水足迹的空间关联网络

2.2 网络整体结构特征

借助 Ucinet 6 软件,可以计算得到 2000—2014 年省际灰水足迹的空间关联关系和网络的密度、效率和等级度,如图 2 和图 3 所示。

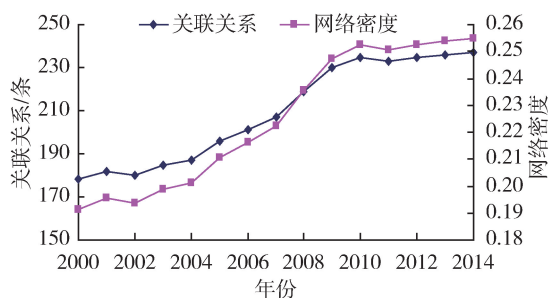


图2 2000—2014年省际灰水足迹空间关联关系与网络密度

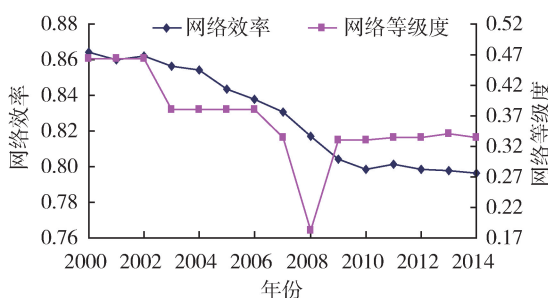


图3 2000—2014年省际灰水足迹空间关联网络效率与等级度

a. 关联关系和网络密度。从图 2 可以看出,省际灰水足迹空间关联的关系数量和网络密度逐年递增,其中关联关系由 2000 年的 178 条增加为 2014 年的 237 条,增长了 33.14%;网络密度由 2000 年的 0.1934 增大为 2014 年的 0.2548,增长了 31.75%。省际灰水足迹的空间关联关系和网络密度呈现逐年上升的趋势,说明省际水污染的空间联系越发紧密。进一步考察关联关系和网络密度的时序变化,可以

发现 2007 年以后省际灰水足迹的空间关联关系和网络密度有较大幅度提升,主要原因应该是这一时期经济不景气(尤其是 2008 年爆发了全球金融危机),国家为应对危机出台了强经济刺激政策,促进了各种经济资源发展要素在各省之间的流动,省际联系空前密切,从而使得省际灰水足迹空间关联发生的概率变大,空间关联得以加强。

b. 网络效率与等级度。从图 3 可以看出,网络效率由 2000 年 0.864 4 逐年下降为 2014 年的 0.796 6,下降了约 8%。网络效率逐年下降说明省际灰水足迹空间关联网络中冗余关系逐年增加,不同省份间水污染空间联系具有更多“渠道”,网络趋于复杂而稳定。网络等级度表现出梯度递减的特征,其主要分 3 个阶段递减,即由 2000—2002 年的 0.46 递减为 2003—2006 年的 0.37,接着进一步递减为 2007—2014 年的 0.33(2008 年除外)。网络等级度的梯度递减说明省际灰水足迹的森严等级结构逐步松动,具有核心边缘格局的空间关联网络逐渐表现出均衡化的趋势,省际水污染的相互关联和互相影响逐年增强,其空间关联格局愈发趋于紧密而均衡。事实上,随着国家多项旨在促进区域协调发展战略的实施,如西部大开发、东北振兴、中部崛起、长江经济带、京津冀协同发展等,区域合作取代区域竞争成为省际经济发展的主流,各地原先基于地方保护主义的市场壁垒与政策壁垒逐步取消,市场一体化进程不断深化,市场成为资源配置的主要力量。市场经济的主要特征就是资源会自动流向效率最高的部门和地方,灰水足迹本质上就是水污染的资源化,因此,随着中国市场化进程的不断推进,灰水足迹在省际“流动”的强度和范围都将不断增大,从而使得省际灰水足迹空间关联网络效率和等级度呈现出下降趋势。

2.3 网络个体中心性分析

借助 Ucinet 6 软件的中心性分析程序,可以计算得到省际灰水足迹的度数中心度、接近中心度和中介中心度。限于篇幅,本文只分析 2014 年的网络中心性计算结果(表 1)。

a. 度数中心度。2014 年省际灰水足迹空间关联网络度数中心度均值为 39.57,其中大于均值的省有 10 个,从大到小依次为上海、天津、江苏、北京、浙江、山东、内蒙古、福建、广东、甘肃,这 10 个省在空间关联网络中与其他省的直接关联关系较多,在网络中具有较大的影响力。同时,通过地域比较,可以发现度数中心度较高的省大部分位于东部地区(内蒙古和甘肃除外),而度数中心度较低的省大部分位于中西部地区,这说明东部地区的省在省际灰

表 1 2014 年省际灰水足迹空间关联网络的中心性

省级行政区	度数中心度				接近中心度		中介中心度	
	点出度	点入度	中心度	排序	数值	排序	数值	排序
北 京	5	23	80.000	4	83.333	4	10.396	3
天 津	5	24	83.333	2	85.714	2	11.196	1
河 北	6	6	23.333	25	55.556	29	0.194	26
山 西	6	6	23.333	26	55.556	30	0.194	27
内 蒙 古	6	12	46.667	7	65.217	7	2.183	7
辽 宁	9	3	33.333	12	60.000	11	0.779	12
吉 林	6	2	20.000	31	54.545	31	0.078	31
黑 龙 江	9	2	30.000	15	57.692	22	0.505	18
上 海	10	25	86.667	1	88.235	1	10.558	2
江 苏	4	25	83.333	3	85.714	3	9.366	4
浙 江	7	20	70.000	5	76.923	5	5.605	5
安 徽	3	10	33.333	13	60.000	12	0.779	13
福 建	11	7	46.667	8	65.217	8	1.355	10
江 西	8	6	26.667	24	57.692	23	0.356	21
山 东	8	15	56.667	6	69.767	6	2.614	6
河 南	7	11	36.667	11	61.224	10	1.044	11
湖 北	7	6	30.000	16	58.824	14	0.180	28
湖 南	9	4	30.000	17	58.824	15	0.473	20
广 东	9	10	40.000	9	57.692	24	2.050	8
广 西	7	2	23.333	27	56.604	25	0.279	22
海 南	7	1	23.333	28	56.604	26	0.279	23
重 庆	9	3	30.000	18	58.824	16	0.234	24
四 川	9	2	30.000	19	58.824	17	0.545	16
贵 州	9	3	30.000	20	58.824	18	0.483	19
云 南	10	2	33.333	14	60.000	13	0.715	14
西 藏	9	0	30.000	21	58.824	19	0.544	17
陕 西	9	1	30.000	22	58.824	20	0.198	25
甘 肃	10	5	40.000	10	62.500	9	1.425	9
青 海	7	1	23.333	29	56.604	27	0.136	29
宁 夏	7	0	23.333	30	56.604	28	0.136	30
新 疆	9	0	30.000	23	58.824	21	0.637	15
均 值	8	8	39.570		63.210		2.110	

水足迹空间关联网络中的位置比中西部地区的省更接近中心。进一步分析点入度和点出度,可以发现大部分度数中心度较高的省其点入度大于点出度,尤其是上海、天津、江苏、北京、浙江 5 省的点入度不仅远高于点出度均值,而且也远大于自身的点出度,这说明 5 省对灰水足迹空间关联网络的影响力,主要体现在对灰水足迹的“吸纳转化”方面。产品生产一般会产生一定量的污染物质,需要消耗一定的水资源进行污染物稀释,因此,可以认为产品中含有一定量的“灰水足迹”(虚拟水形式),而这些灰水足迹会随着产品的流通从生产地转移到产品的消费地,从而影响灰水足迹空间关联关系的产生。上海、天津、江苏、北京、浙江属于经济发达省份,经济规模较大、人口密集,资源类产品和农产品需求量大,而这类产品一般在生产过程中会产生大量的污染物,需要耗费大量的水资源进行稀释,且此类产品本地一般产量不足,需要从其他省份大量输入,因此消费此类产品就相当于输入接收了大量“灰水足迹”,从而使得这 5 省在省际灰水足迹空间关联网络中具有

较大的点入度;另一方面,这 5 省的产业等级和技术水平平均优于中西部地区的省份,产品和服务一般使用清洁生产技术,其输出产品和服务的“灰水足迹”含量较低,从而使得其具有较小的点出度。河北、山西、广西、海南、青海、宁夏和吉林 7 省的度数中心度排名靠后,说明这 7 省在省际灰水足迹空间关联网络中影响力较小,处于网络边缘,而其点出度大于点入度,则说明这 7 省的经济技术能力不强,其输出的产品和服务“灰水足迹”含量较高。

b. 接近中心度。2014 年省际灰水足迹空间关联网络接近中心度均值为 63.210,高于均值的省有 8 个,由高到低依次为上海、天津、江苏、北京、浙江、山东、内蒙古、福建,说明这些省在省际灰水足迹空间关联网络中与其他省的网络距离较短,从这些省出发可以非常便捷地与其他省建立联系,属于网络中的中心行动者。省际灰水足迹空间关联网络实质就是以产品和服务贸易联系为基础而构建的,上述省大都经济发达,与其他省之间存在很多便捷的沟联“渠道”,可以进行大量而频繁的产品和服务贸

易,因此,其在省际灰水足迹空间关联网络中的接近中心度自然也就较高。广西、海南、青海、宁夏、河北、山西和吉林7省接近中心度排名靠后,说明这些省在省际灰水足迹空间关联网络中属于边缘行动者,这与度数中心度的分析一致。

c. 中介中心度。2014 年省际灰水足迹空间关联网络接近中心度均值为 2.110,高于均值的省有 7 个,由高到低依次为天津、上海、北京、江苏、浙江、山东、内蒙古,说明这些省在省际灰水足迹空间关联网络中居于“中介”位置,很多省份之间的联系需要通过这些省才能建立起来,这些省在省际空间关联中发挥了重要的“枢纽桥梁”功能。进一步考察各省中介中心度数值分布特征,可以发现,全国中介中心度的总量为 65.516,其中天津、上海、北京、江苏和浙江 5 省的总量为 47.121,占全国中介中心度总量的 71.92%,说明在中国很大一部分的省际灰水足迹空间关联是通过上述少数几个省完成的。河北、山西、湖北、青海、宁夏、吉林 6 省中介中心度排名靠后,说明大量省际灰水足迹的空间关联无须通过这 6 省,此 6 省与其他省之间的联系更多是直接的,而非间接的,其对网络的影响主要体现在局部,而对全局的影响很小。

2.4 网络块模型分析

2.4.1 角色分析

使用 Ucinet 6 软件中 Concor 方法,以 2 为最大切割深度,0.2 为收敛标准,将 2014 年省际灰水足迹空间关联网络中的 31 省划分为主受益、净受益、经纪人、主溢出 4 个板块(表 2)。

a. 网络可划分第一、二、三、四 4 个板块(表 2)。第一板块包括北京、天津、江苏、内蒙古、上海和山东 6 个成员,这 6 省之间的空间关联关系有 10 条,向其他板块发出关联关系 28 条,接收其他板块关联关系 114 条,该板块具有较高的内部关联关系比例,接收到其他板块的关联关系远远多于向其他板块发出的关系,属于主受益板块;第二板块包括广东、福建和浙江 3 个成员,这 3 省之间的空间关联关系只有 1 条,向其他板块发出关联关系 26 条,接收其他板块关联关系 36 条,该板块内部关联关系比例

低,接收到其他板块的关联关系多于向其他板块发出的关联关系,属于净受益板块;第三板块包括江西、河北、安徽、河南、湖北、湖南和山西 7 个成员,这 7 省之间的空间关联关系有 4 条,向其他板块发出关联关系 42 条,接收其他板块关联关系 45 条,该板块具有较低的内部关联关系比例,接收到其他板块的关联关系较多,同时,向其他板块发出的关联关系也较多,在省际灰水足迹空间关联网络中扮演着桥梁和中介的角色,属于经纪人板块;第四板块包括吉林、黑龙江、辽宁、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆 15 个成员,这 15 省之间的空间关联关系有 19 条,向其他板块发出关联关系 107 条,接收其他板块关联关系 8 条,该板块的内部关联关系比例不高,接收到其他板块的关联关系较少,而向其他板块发出的关联关系多,属于主溢出板块。

b. 板块间溢出效应明显,存在互惠、三方传递和循环传导特性(表 3 和图 4)。为了进一步揭示板块之间空间关联的具体传导路径,计算板块间的密度矩阵,将密度矩阵中的值与临界值进行比较,一般选关联网络的整体密度(0.2548)作为临界值,根据比较的结果创建像矩阵(即如果密度矩阵中的值大于临界值,则像矩阵中对应位置的值为 1,否则为 0,如表 3 所示)。将像矩阵可视化则得到更为直观的板块间关系互动图(图 4)。分析表 3 和图 4 可知:①板块间存在明显的溢出效应。从像矩阵来看,第一板块和第三板块之间、第二板块和第三板块之间、第三和第四板块与第一和第二板块之间的值均为 1,说明这些板块间存在溢出效应。②板块间存在三方传递和循环传导特性(图 4)。在省际灰水足迹空间关联网络中存在明显的互惠特性,第一板块和第三板块、第二板块和第三板块之间的关系互惠;网络中存在三方传递特性,第四板块分别向第二板块和第一板块发出关系,同时第二板块也向第一板块发出关系,即为一个传递三方组;网络中还存在三方循环特性,第一板块向第三板块发出关系,第三板块向第二板块发出关系,而第二板块又向第一板块发出关系,这便形成了一个闭环。此外,还可以发现,像

表 2 2014 年省际灰水足迹空间关联网络板块角色分析

板 块	关系矩阵					期望的内部 关系比例/%	实际内部 关系比例/%	接收其他板块 关系数	向其他板块 发出关系数	板块特征
	第一板块	第二板块	第三板块	第四板块	板块成员数					
第一板块	10	1	26	1	6	16.67	26.32	114	28	主受益板块
第二板块	5	1	14	7	3	6.67	3.71	36	26	净受益板块
第三板块	33	9	4	0	7	20.00	8.69	45	42	经纪人板块
第四板块	76	26	5	19	15	46.67	15.08	8	107	主溢出板块

注:期望内部关系比例 $L = (n-1)/(N-1)$,其中 n 为板块内省份个数, N 为省份总数;实际内部关系比例为板块内部关系数与板块发出关系总数之比。

矩阵对角线中的元素只有第一板块的值为 1,其他都为 0,说明只有第一板块存在“俱乐部”效应,具有较强的自反性,而其他板块不具有自反性。

表 3 2014 年省际灰水足迹空间关联网络板块的密度矩阵和像矩阵

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	0.333	0.056	0.619	0.011	1	0	1	0
第二板块	0.278	0.167	0.667	0.156	1	0	1	0
第三板块	0.786	0.429	0.095	0.000	1	1	0	0
第四板块	0.844	0.578	0.048	0.090	1	1	0	0

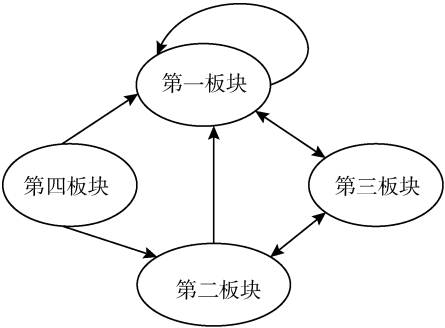


图 4 不同板块之间的溢出和受益关系

2.4.2 空间聚类分析

采用 Arcgis 软件可对 4 个板块的空间分布进行可视化表达,结果见图 5。

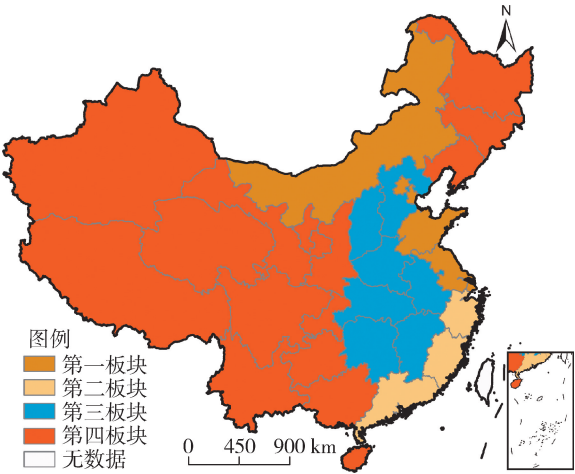


图 5 2014 年省际灰水足迹空间关联网络板块的空间分布

a. 板块地理空间分布呈现出大集聚小分散的特征。第一板块(内蒙古除外)和第二板块主要聚集在东部沿海地区,说明在省际灰水足迹空间关联

网络中受益省主要聚集在沿海地带;第三板块聚集在中部地区,该位置可以便捷地沟通南北方和联系东西部,具有承担中介桥梁功能的区位优势;第四板块主要聚集在西部地区和东北地区,该板块成员受限于自身经济技术水平,其输出的产品和服务“灰水足迹”含量较高,在省际灰水足迹空间关联关系中发挥着主溢出效应。

b. 板块间存在地理邻近和跨地域边界两种空间关联方式。主溢出板块和受益板块之间只有少数成员地理相邻,但却存在大量的空间关联关系,这充分说明地理邻近并不是空间关联的唯一方式,还有大量的空间关联关系是跨地域边界产生的。事实上,第四板块和第三板块之间虽然存在较多地理邻近的成员,但这两个板块间的空间关联关系却很少,只有 5 条。

2.5 网络结构效应分析

网络结构会影响节点属性。本文通过建立计量经济学模型从整体网络结构和个体网络结构两方面检验省际灰水足迹空间关联网络的结构效应。

2.5.1 整体网络结构效应

地区灰水足迹强度即单位 GDP 所耗灰水足迹可以有效表征地区在灰水足迹“利用”上的经济技术效率水平,具有重要的研究价值。本文以全国灰水足迹强度和省际灰水足迹强度标准差为被解释变量,分别以网络密度、网络等级度和网络效率 3 个反映网络整体结构特性的指标为解释变量,采用 OLS 方法(解释变量和被解释变量取自然对数)进行简单回归,结果见表 4。

a. 对灰水足迹强度的影响效应。网络密度对灰水足迹强度具有显著负向影响,而网络等级度和网络效率则有显著正向影响,这表明随着省际灰水足迹空间关联网络密度的提升和网络等级度及网络效率的降低,可以有效促进全国灰水足迹强度的降低。网络密度的提升和网络等级度及网络效率的降低一方面意味着省际灰水足迹空间关联关系更加紧密,省际灰水足迹的相互影响和作用更加频繁而复杂,增加了省际水污染协同治理的难度;但另一方面由于省际空间关联“管道”更多了,使得省际经济技术溢出和交流,尤其是水污染防治技术、清洁生产技

表 4 整体网络结构效应计量结果

解释变量	全国灰水足迹强度回归系数			省际灰水足迹强度标准差回归系数		
	模型 I	模型 II	模型 III	模型 I	模型 II	模型 III
常数项	-13.360 *	-2.138 *	0.041	-11.152 *	-1.743 *	0.198 *
网络密度	-6.225 *			-5.269 *		
网络等级度		1.837 *			1.467 *	
网络效率			21.614 *			18.321 *
R ²	0.962	0.327	0.962	0.928	0.280	0.931

注: * 表示通过了 5% 的显著性水平检验,下同。

术和循环经济技术的推广也更加容易,从而有利于全国灰水足迹强度的整体降低。

b. 对省际灰水足迹强度差异的影响效应。网络密度对省际灰水足迹强度差异具有显著负向影响,而网络等级度和网络效率则有显著正向影响,这说明随着省际灰水足迹空间关联网络密度的提升和网络等级度及网络效率的降低,可以有效缩小灰水足迹强度的省际差距。网络加密意味着网络整体关联性的强化,可以为抑制省际灰水足迹强度的极化趋势创造有利条件;网络中双向链接关系的增加即网络等级度的降低,使得空间关联网络更加均衡,各省的经济技术交流更加畅通,反馈也更加及时,可以有效促进缩小省际灰水足迹经济技术效率水平的差异即灰水足迹强度的差异;增加网络冗余即降低网络效率,可以降低少数网络节点对灰水足迹经济技术的垄断风险,提高网络的稳定性,有效抑制省际灰水足迹强度的两极分化。

2.5.2 个体网络结构效应

以 2000—2014 年各省的灰水足迹强度为被解释变量(取自然对数),分别以各省在省际灰水足迹空间关联网络中的度数中心度、中介中心度和接近中心度为解释变量(取自然对数)建立面板数据计量模型。面板数据模型一般分为固定效应和随机效应两种,本文采用 Hausman 检验程序进行效应检验,通过计算拒绝了随机效应模型,故而选择固定效应模型。表 5 为固定效应模型的计量结果。

表 5 个体网络结构效应计量结果

解释变量	灰水足迹强度回归系数		
	模型 I	模型 II	模型 III
常数项	0.7868 *	-4.230 *	16.179 *
度数中心度	-1.2510 *		
中介中心度		-0.354 *	
接近中心度			-4.802 *
R ²	0.491	0.451	0.552

如表 5 所示,度数中心度、中介中心度和接近中心度对省际灰水足迹强度具有显著的负向影响,说明随着某省网络中心性的提高,其灰水足迹强度将显著降低。事实上,某省中心性的提高,往往意味着以该省为中心的局部网络关联性的增大,从而使得该省可以利用其在省际灰水足迹空间关联网络中的“中心区位”优势,更加便利地从周边省获取先进的生产技术促进产业升级或转移淘汰一些落后产业产能,进而有效促进其灰水足迹强度的降低。

3 结 论

a. 省际灰水足迹空间关联网络化特征明显,

2000—2014 年空间联系愈发紧密,等级森严的网络结构逐步松动,网络趋于稳定。

b. 上海、天津、江苏、北京、浙江等省处于网络的中心位置,在省际空间关联网络中发挥了重要的“枢纽桥梁”功能。

c. 网络可划分为主受益、净受益、经纪人、主溢出 4 个功能板块;板块间溢出效应明显,存在互惠、三方传递和循环传导特性,板块地理空间分布呈现出大集聚小分散的特征,板块间存在地理邻近和跨地域边界两种空间关联方式。

d. 网络结构对灰水足迹强度具有显著影响,其中,网络密度及节点中心性的提高、网络等级度及网络效率的降低,可以有效促进灰水足迹强度的下降,缩小省际差异。

参考文献:

[1] 尚海洋,宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护,2018,34(2): 15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, concepts, and policy responses[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 15-21. (in Chinese))

[2] 曾昭,刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报,2013,28(7): 1169-1177. (ZENG Zao, LIU Junguo. Historical trend of grey water footprint of Beijing, China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1169-1177. (in Chinese))

[3] 孙克,徐中民. 基于地理加权回归的中国灰水足迹人文驱动因素分析[J]. 地理研究,2016,35(1): 37-48. (SUN Ke, XU Zhongming. The impacts of human driving factors on grey water footprint in China using a GWR model[J]. Geographical Research, 2016, 35(1): 37-48. (in Chinese))

[4] ENE S A, TEODOSIU C. Grey water footprint assessment and challenges for its implementation[J]. Environmental Engineering and Management, 2011, 10(3): 333-340.

[5] 张郁,张峥,苏明涛. 基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(7): 28-32. (ZHANG Yu, ZHANG Zheng, SU Mingtao. Research on grey water footprint based on chemical fertilizer use in the grain production in Heilongjiang reclamation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(7): 28-32. (in Chinese))

[6] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. 水资源保护,2018,34(2): 22-27. (WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 22-27. (in Chinese))

[7] 付永虎,刘黎明,起晓星,等. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价[J]. 农业工程学报,2015,31(10): 152-160. (FU Yonghu, LIU Liming, QI Xiaoxing, et al. Environmental effects evaluation for grain production

- based on grey water footprint in Dongting Lake area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 152-160. (in Chinese))
- [8] 孙才志, 白天骄, 韩琴. 基于基尼系数的中国灰水足迹区域与结构均衡性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2047-2059. (SUN Caizhi, BAI Tianjiao, HAN Qin. The regional and structural equilibrium analysis of grey water footprint in China based on Gini coefficient [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2047-2059. (in Chinese))
- [9] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998—2012 年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. (HAN Qin, SUN Caizhi, ZOU Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012 [J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1179-1191. (in Chinese))
- [10] 孙才志, 白天骄, 韩琴. 要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1490-1502. (SUN Caizhi, BAI Tianjiao, HAN Qin. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1490-1502. (in Chinese))
- [11] 孙才志, 韩琴. 中国省际灰水足迹测度及其灰水足迹荷载系数的空间关联格局分析[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 86-97. (SUN Caizhi, HAN Qin. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading coefficient in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 86-97. (in Chinese))
- [12] 白天骄. 中国灰水足迹研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [13] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Lianshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582. (in Chinese))
- [14] 李敬, 陈澍, 万广华, 等. 中国区域经济增长的空间关联及其解释: 基于网络分析方法[J]. 经济研究, 2014, 49(11): 4-16. (LI Jin, CHEN Shu, WAN Guanghua, et al. Study on the spatial correlation and explanation of regional economic growth in China: based on analytic network process [J]. Economic Research Journal, 2014, 49(11): 4-16. (in Chinese))
- [15] 徐振宇. 社会网络分析在经济学领域的应用进展[J]. 经济学动态, 2013(10): 61-72. (XU Zhenyu. Progress in the application of social network analysis in economics [J]. Economics Information, 2013(10): 61-72. (in Chinese))
- [16] 刘华军, 何礼伟. 中国省际经济增长的空间关联网结构: 基于非线性 Granger 因果检验方法的再考察[J]. 财经研究, 2016, 42(2): 97-107. (LIU Huajun, HE Liwei. The spatial network structure of China's provincial economic growth: re-examination based on nonlinear granger causality test [J]. Journal of Finance and Economics, 2016, 42(2): 97-107. (in Chinese))
- [17] 孙克, 聂坚, 游细斌, 等. 长江中游城市群生产性服务业的分工特征及空间效应分析[J]. 经济地理, 2018, 38(2): 123-132. (SUN Ke, NIE Jian, YOU Xibin, et al. Spatial division and spatial effect of producer service in the urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River [J]. Economic Geography, 2018, 38(2): 123-132. (in Chinese))
- [18] 汤放华, 汤慧, 孙倩, 等. 长江中游城市群经济网络结构分析[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1357-1366. (TANG Fanghua, TANG Hui, SUN Qian, et al. Analysis of the economic network structure of urban agglomerations in the middle Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1357-1366. (in Chinese))
- [19] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济, 2015(5): 83-95. (LIU Huajun, LIU Chuangming, SUN Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effects in China [J]. China Industrial Economics, 2015(5): 83-95. (in Chinese))
- [20] 刘军. 整体网分析[M]. 上海: 上海人民出版社, 2014. (收稿日期: 2018-12-17 编辑: 熊水斌)

(上接第 13 页)

- [18] 任尚岗. 土壤水力参数测算方法及其空间变异性研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2011.
- [19] 于东升, 史学正. 用 Guelph 法研究不同土地利用方式下富铁土的土壤渗透性[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998(4): 14-19. (YU Dongshen, SHI Xuezheng. Study on Ferri-soils infiltration under different land-use by using Guelph permeameter in South China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998(4): 14-19. (in Chinese))
- [20] 林俊宏. 厦门市水资源可持续利用评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 51-56. (LIN Junhong. Assessment of sustainable utilization of urban water resources in Xiamen City [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 51-56. (in Chinese))
- [21] ZANGAR C N. Theory and problems of water percolation [M]. Denver: Technical Information Office Denver Federal Center, 1956.
- [22] REYNOLDS W, ELRICK D. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph Permeameter [J]. Soil Science, 1985, 140: 292-302.
- [23] ZHANG Z F, GROENEVELT P H, PARKIN G W. The well-shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 49(3): 219-221.
- [24] YANG J L, ZHANG G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(5): 751-761. (收稿日期: 2019-03-17 编辑: 彭桃英)