

# 中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究

孙才志<sup>1</sup>, 马奇飞<sup>2,3</sup>

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029; 3. 大连海事大学航运经济与管理学院, 大连 116029)

**摘要:** 本文从群组前沿的角度出发, 将中国31个省(市、自治区)分为东中西三大群组, 在不同的技术前沿面下利用SBM模型对各省(市、自治区)的水资源绿色效率进行测度, 并利用VAR格兰杰因果检验方法将水资源绿色效率“属性数据”转化为“关系数据”, 在此基础上利用社会网络分析(SNA)方法对中国水资源绿色效率的空间关联网络特征进行研究。结果表明: ① 中国水资源绿色效率区域差异显著, 总体表现为中部>东部>西部的特征。② 没有一个地区独立于水资源绿色效率空间关联网络之外, 网络整体具有较强的稳定性; 个体特征表明, 东部地区以溢出效应为主, 处于“引领者”地位, 而西部地区以接收其他地区的溢出关系为主, 在网络结构中处于边缘位置。③ 块模型分析表明, 北京、天津等10个地区为“净溢出”板块; 青海、新疆等8个地区为“净受益”板块; 河北、重庆等6个地区为“双向溢出”板块; 河南、陕西等7个地区为“经纪人”板块。研究结果为中国各地区水资源绿色效率的提高及协调发展提供了建议。

**关键词:** SBM模型; 群组前沿; 社会网络分析; 水资源绿色效率; 空间关联网络

DOI: 10.11821/dljy020180926

## 1 引言

近年来, 中国的经济发展始终保持着高速增长, 对水资源的需求量也日益增加。然而中国淡水资源贫乏且用水效率低下, 严重阻碍了社会经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。党和国家高度重视水资源短缺问题, 国务院已于2012年发布了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》, 并对用水效率红线的控制进行了全面部署<sup>[2]</sup>。2016年是“十三五”开局之年, 按照中央最新要求, 水利部会同发展改革委等有关部门印发了《“十三五”实行最严格水资源管理制度考核工作实施方案》, 启动“十三五”考核, 旨在建立起节约、循环、高效的水资源利用体系, 全面提高水资源利用效率。

学术界对水资源利用效率的评价主要有单要素和全要素两种视角。后者通过测度水资源的配置效率<sup>[3]</sup> (即生产中水资源与其他要素一起参与生产的有效程度), 有效克服了单要素评价法单一、片面的缺点, 更加符合社会生产过程, 深受研究者的青睐。如孙爱军等<sup>[4]</sup>、佟金萍等<sup>[5]</sup>、买亚宗等<sup>[6]</sup>、邱林等<sup>[7]</sup>、马海良等<sup>[8,9]</sup>学者采用全要素评价法对中国工业、农业、城市以及综合用水效率进行了评价。空间计量分析技术的成熟, 促使广大学者愈发重视空间因素, 针对水资源利用效率空间关联关系的研究也日益增多。例如, 赵良仕等<sup>[10]</sup>基于经济-空间距离函数的空间权重矩阵, 探讨了中国水资源利用效率的空间自相关关系; 孙才志等<sup>[11]</sup>运用空间计量模型研究了考虑和不考虑“非期望”产出的中国省

收稿日期: 2018-09-03; 修订日期: 2019-08-01

基金项目: 国家社会科学重点基金 (编号: 19AJY010)

作者简介: 孙才志 (1970-), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与海洋经济研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

际水资源全局环境技术效率的空间效应；陈磊等<sup>[12]</sup>通过构建基于万有引力定律的空间权重矩阵，分析了“水资源-经济-环境”系统整体技术效率的空间分异规律。上述研究丰富了水资源利用效率评价体系，为本文的研究奠定了良好的基础，但依然存在以下不足：第一，对水资源利用效率空间关联关系的研究局限于空间相关性和时空收敛性两个维度，缺少从更大范围、更大空间关联关系视角的定量测度和刻画，研究结果往往囿于“局部”，缺乏整体性；第二，现有文献多认为全国31个省（市、自治区）处在相同的技术生产前沿面上，忽略了地区差异（资本、劳动力和水资源禀赋等）对水资源利用效率的影响<sup>[13]</sup>，造成测度值出现偏差。第三，除孙才志等<sup>[14-17]</sup>外，鲜有学者考虑水资源利用带来的社会效益，水资源利用的最终目的是提高人类福祉，增加人民幸福感。对此，本文在沈满洪等<sup>[1]</sup>对水资源利用效率定义的基础上，结合绿色发展理念，将水资源绿色效率定义为水资源等生产投入要素和带来的经济、社会、生态环境产出的比率，以此揭示水资源利用的经济、社会和生态环境内涵。因此，在水资源利用效率评价体系中加入社会发展指数以体现人文关怀，更加符合绿色发展理念“以人为本”的要求。

鉴于此，本文在保持投入指标不变的情况下，在产出指标中加入社会发展指数作为期望产出，利用群组数据对各地区水资源绿色效率进行科学测度，并从网络化的角度出发，采用VAR格兰杰因果检验方法将水资源绿色效率“属性数据”转化为“关系数据”，在此基础上利用SNA方法探索中国水资源绿色效率的空间关联网络特征，目的在于为中国水资源绿色效率空间格局的整体优化，实现水资源绿色效率的跨区域协同提升提供理论支撑。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 SBM模型

SBM模型是非径向、非角度基于松弛变量的DEA模型，其优点在于不仅能够将非期望产出考虑其中，而且能够通过克服松弛变量对测度值的影响来提高效率值的准确性<sup>[18]</sup>。因此本文选用SBM模型对中国水资源绿色效率进行测度。具体公式请参阅文献<sup>[19]</sup>，在此不再赘述。

### 2.2 社会网络分析法

**2.2.1 水资源绿色效率空间关联网络的构建** 社会网络分析是研究行动者之间的关系，对各种关系进行量化分析的有效工具，因此，在进行网络分析之前，要先对“关系”进行确定<sup>[20]</sup>。引力模型和VAR格兰杰因果检验是目前确定行动者之间关系的两种最常用方法，由于本文水资源绿色效率是由各投入产出指标测度出的相对效率，涉及的参数较多，采用引力模型不能全面、客观的衡量各地区水资源绿色效率的“关系”。因此，选择VAR格兰杰因果检验方法来确定各地区水资源绿色效率之间的关系。公式请详见参考文献<sup>[21]</sup>。

为满足VAR格兰杰因果关系检验对滞后期数的要求，根据LR、PRE、AIC、SC、HQ五种方法进行最优滞后期数的选择，并以 $F$ 统计量在5%以下检验水平上显著来确定两地区之间存在关系。

**2.2.2 网络结构特征的刻画** 对于水资源绿色效率空间关联网络的整体结构特征，可以用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率4个指标来衡量<sup>[22]</sup>，分别测度水资源绿色效率空间关联网络的效益大小、网络稳健性、节点的非对称可达程度以及节点间关联渠道的多少。

中国水资源绿色效率空间关联网的个体特征可以用度数中心度、接近中心度和中介中心度3个指标来度量<sup>[23]</sup>, 分别度量各节点在网络中的地位、各节点“不受其他节点控制”的程度以及某一节点控制其他节点的能力。各指标的相关解释以及公式请参阅文献[22, 23]。

**2.2.3 块模型分析** 块模型(block models)分析最早由怀特、布尔曼和布雷格于1976年提出, 是社会网络空间聚类分析的重要手段<sup>[24]</sup>。块模型分析能够探究网络的内部结构状态及各地区在板块中的位置和作用, 可以具体考察各个板块之间发送和接收信息的途径, 并进行描述性分析。根据已有研究<sup>[25]</sup>, 本文将水资源绿色效率空间关联网中的板块划分为“净受益”、“净溢出”、“双向溢出”和“经纪人”板块4种类型。对4种板块定义的介绍请详见参考文献[20], 在此不再赘述。

### 2.3 指标选取与数据来源

本文选用水足迹<sup>[26,27]</sup>、资本存量<sup>[28]</sup>和劳动力作为投入指标, 选用GDP、社会发展指数作为期望产出, 选用灰水足迹<sup>[29,30]</sup>作为非期望产出, 对1997—2016年中国31个省(市、自治区)的水资源绿色效率进行测度, 文中所涉及的数据均来源于《中国统计年鉴》(1998—2017年)《中国环境年鉴》(1998—2017年)以及《中国水资源公报》(1997—2016)等资料。其中, 社会发展指数的构成包括人口、城市化、科技、教育、医疗等5个方面, 具体指标选取及计算过程请参阅文献[31], 在此不再赘述。

## 3 结果分析

### 3.1 水资源绿色效率测度结果分析

水资源绿色效率测度结果如表1所示, 由表1可知, 东部水资源绿色效率均值处于

表1 中国水资源绿色效率测度结果

Tab. 1 Measure result of water resources green efficiency in China

	1997年	2002年	2007年	2012年	2016年		1997年	2002年	2007年	2012年	2016年
北京	0.853	0.824	0.921	0.816	1.000	湖北	0.469	0.545	0.805	1.000	1.000
天津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	湖南	1.000	0.521	0.553	0.601	0.741
河北	0.259	0.269	0.266	0.243	0.254	内蒙古	1.000	0.628	0.539	0.537	1.000
辽宁	0.940	0.790	0.577	0.429	0.375	广西	0.170	0.224	0.245	0.265	0.277
上海	0.496	0.598	1.000	0.797	1.000	重庆	1.000	0.392	0.545	1.000	1.000
江苏	0.286	0.321	0.354	0.274	0.326	四川	0.119	0.182	1.000	1.000	1.000
浙江	0.405	0.473	0.435	0.367	0.431	贵州	0.186	0.220	0.278	0.356	0.367
福建	0.349	0.480	0.546	0.372	0.400	云南	0.161	0.208	0.259	0.248	0.227
山东	1.000	0.370	0.374	0.239	0.225	西藏	1.000	1.000	0.809	1.000	1.000
广东	0.301	0.372	1.000	0.458	0.360	陕西	0.295	0.328	0.347	0.387	0.425
海南	0.700	1.000	1.000	0.702	1.000	甘肃	0.421	0.393	0.449	0.434	0.442
山西	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	青海	0.617	0.611	0.685	1.000	1.000
吉林	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	宁夏	0.550	0.496	0.572	0.509	0.520
黑龙江	0.536	0.677	1.000	1.000	0.939	新疆	0.393	0.419	0.421	0.415	0.346
安徽	0.448	0.826	1.000	0.839	1.000	东部均值	0.599	0.591	0.679	0.518	0.579
江西	0.526	0.576	0.555	0.637	0.828	中部均值	0.669	0.697	0.803	0.825	0.873

0.518~0.679 之间,中部地区在 0.669~0.873 之间,西部地区在 0.425~0.634 之间,总体表现为中部 > 东部 > 西部的特征,呈现出显著的空间非均衡性。这与马海良等<sup>[9]</sup>的研究结果有所不同(东部 > 中部 > 西部),原因在于:第一,本文在指标的选取上与马海良等有本质区别,在测度水资源利用效率时,马海良等仅考虑了水资源利用所带来的经济效益和环境效益,而没有考虑社会效益。本文在马海良等的研究基础上,将社会发展指数作为期望产出以体现人文关怀,从而造成测度值出现差异。已有研究表明<sup>[14]</sup>,社会发展指数对水资源利用效率有较大影响,水资源绿色效率的高低与经济发展水平没有明显的正相关关系。第二,本文在测度水资源绿色效率时,从群组前沿的角度出发,考虑地区差异的影响把中国分为东中西部三大群组,由于东部地区距离共同前沿面近,因此效率变化不大,中西部距离共同前沿面远,在各自新的前沿面下,会由各自组内效率最高的决策单元构成新的前沿包络面,从而使效率值出现不同程度的提高,这也是本文测度结果中部大于东部的根本原因,相关研究成果已经证实群组前沿下水资源绿色效率测度值更为合理<sup>[11]</sup>。

### 3.2 空间关联网络结构特征

#### 3.2.1 网络整体结构特征分析

采用 VAR 格兰杰因果关系检验法对 31 个省(市、自治区)(节点)的水资源绿色效率数据进行检验,在构造的中国省际水资源绿色效率空间关联关系矩阵的基础上,利用 Ucinet 软件的可视化工具 Netdraw 绘制出中国 31 个省(市、自治区)的空间关联网络,如图 1 所示。

中国水资源绿色效率空间关联网络以 31 个省(市、自治区)为节点,节点之间最大可有 930 条溢出关系,根据格兰杰因果检验结果,实际存在的关系总数为 297 条,整体网络密度为 0.3194,表明在研究期内,中国水资源绿色效率虽呈现出显著的空间关联关系,但从数值来看紧密程度并不高(密度越大,联系越紧密),因此,各省市需要加强水资源绿色效率的空间联系,从而提升空间关联网络的稳定性。网络关联度计算结果为 1,表明中国省域间水资源绿色效率发展均有联系,没有一个地区独立于水资源绿色效率空间关联网络之外,网络节点之间连通性较好,即中国省际水资源绿色效率之间具有明显的空间关联关系和溢出效应,所有地区之间都存在直接或间接的关联关系。网络等级度为 0.734,表明中国水资源绿色效率的等级度较高,省际间水资源绿色效率联系程度呈现出较强的层级特征,网络结构还有待进一步优化(等级度越高,地区差异越大)。网络效率为 0.386,表明网络中的冗余连线较少,反映出水资源绿色效率空间溢出路径较多,网络稳定性较好。

#### 3.2.2 网络内部个体特征分析

本文对中国 31 个省(市、自治区)的个体网络特征进行了测度,以揭示各省份在空间关联网络中的作用和地位,并绘制了中国省际水资源绿色效率空间关联网络的净溢出关系图,以此来说明中国水资源绿色效率空间关联网络的个体特征。结果如表 2、图 2(见第 58 页)所示。

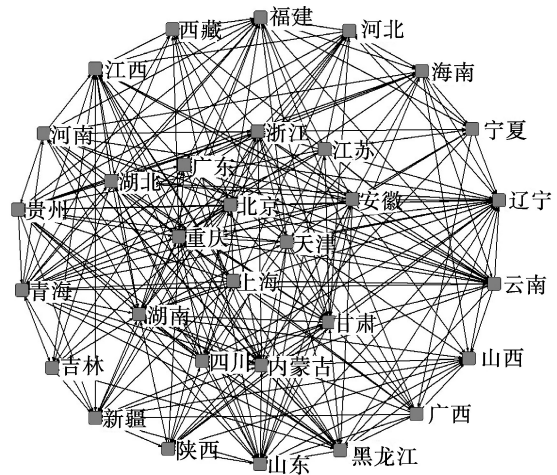


图 1 中国省际水资源绿色效率空间关联网络  
Fig. 1 Spatial correlation network of water resources green efficiency in China



表2 中国省际水资源绿色效率空间关联网的中心性  
Tab. 2 Network centrality of water resources green efficiency in China

地区	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	中心度	排序	中心度	排序
北京	12	5	53.333	15	56.928	17	1.881	17
天津	10	6	50.000	18	56.119	21	1.996	16
河北	9	7	46.667	22	55.088	22	1.276	21
山西	4	10	40.000	27	52.059	27	0.324	30
内蒙古	9	14	63.333	6	60.761	8	4.352	6
辽宁	9	14	70.000	4	61.455	5	5.188	5
吉林	7	5	26.667	31	49.300	30	0.647	28
黑龙江	11	12	60.000	11	61.250	7	2.957	11
上海	12	1	43.333	24	48.905	31	0.308	31
江苏	8	3	30.000	30	53.302	25	0.833	25
浙江	13	8	63.333	7	60.217	10	3.429	9
安徽	12	5	50.000	19	56.474	20	1.132	24
福建	9	14	63.333	8	60.761	9	5.586	4
江西	9	11	60.000	12	57.714	15	1.760	19
山东	9	15	63.333	9	61.636	4	3.646	8
河南	11	7	50.000	20	58.914	13	2.466	15
湖北	13	8	56.667	14	59.552	11	2.493	14
湖南	12	18	76.667	2	66.327	2	5.603	3
广东	14	8	53.333	16	59.188	12	2.716	12
广西	9	5	43.333	25	52.112	26	0.804	26
海南	8	6	46.667	23	54.058	24	1.305	20
重庆	18	19	83.333	1	71.469	1	9.636	1
四川	9	7	53.333	17	56.624	18	4.134	7
贵州	8	12	60.000	13	57.885	14	1.244	22
云南	10	10	63.333	10	57.148	16	1.792	18
西藏	4	6	33.333	28	50.126	28	0.424	29
陕西	9	7	43.333	26	56.624	19	2.517	13
甘肃	10	18	66.667	5	64.561	3	6.228	2
青海	10	15	70.000	3	61.455	6	3.408	10
宁夏	6	6	33.333	29	49.617	29	1.169	23
新疆	3	15	50.000	21	54.461	23	0.723	27
均值	9.581	9.581	52.366	—	57.487	—	2.644	—

注: 表中的排序是对各中心度的排序, 对点出度和点入度没有进行排序。

(1) 关联关系分析。在表2中, 点出度和点入度分别对应溢出关系系数和接收关系系数。根据表2结果, 溢出关系大于平均值的地区共有14个, 其中重庆、广东、浙江、湖北、北京、上海等地区排名靠前, 新疆、山西、西藏、宁夏等地区溢出关系较少。从接收关系来看, 共有14个地区大于平均值, 排名在前列的省份有重庆、湖南、甘肃、山东、青海、新疆等地区, 而上海、江苏、北京、吉林等地区接收关系较少。从净受益关

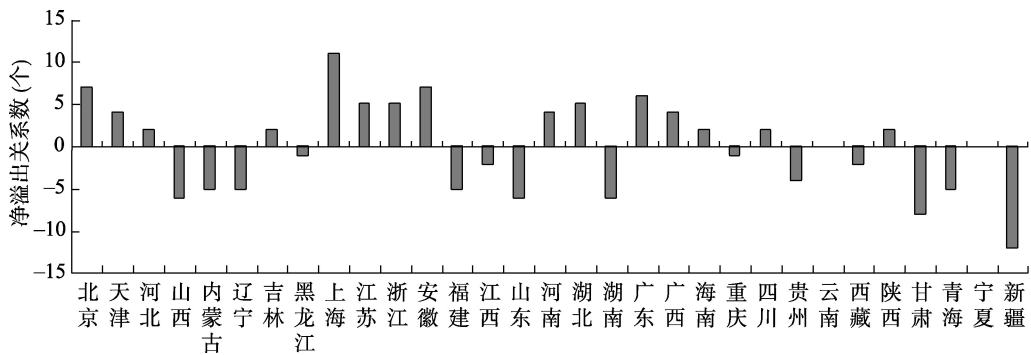


图2 中国水资源绿色效率的净溢出关系

Fig. 2 Net spillover relationship of water resources green efficiency in China

系来看(图2),上海、安徽、北京、广东、湖北、江苏、浙江、天津等15个地区净溢出关系系数为正,表现为溢出效应,新疆、甘肃、山西、山东、湖南、内蒙古、辽宁、福建、青海等14个地区净溢出关系系数为负,表现为受益效应;云南和宁夏的溢出关系等于接收关系。从地区分布来看,东部地区以溢出效应为主,而中西部地区主要接受其他地区的溢出。

(2) 度数中心度。由表2可知,度数中心度的均值为52.366,共有17个地区高于平均值,排名靠前的有重庆、湖南、青海、辽宁等地区,表明这些地区的水资源绿色效率具有较高的空间关联及空间溢出效益。原因在于这些地区主要分布于中西部地区,经济较为落后,主要以资源输出谋求地区发展,如劳动力输出、虚拟水贸易等,从而向发达地区产生外溢效应;吉林、江苏、宁夏、西藏和山西等地区排名靠后,说明这些地区水资源绿色效率与其他省份之间的关系系数较少,需要通过提高与其他地区的关联程度来增加水资源绿色效率的溢出通道。

(3) 接近中心度。表2显示,全国31个省(市、自治区)的接近中心度平均值为57.487,重庆、湖南、甘肃、山东、辽宁等16个省市高于全国平均水平,说明上述16个地区在水资源绿色效率空间关联网络中扮演着“中心行动者”的角色,即这些地区在网络中与其他地区之间的距离较短,能够更快速地与其他地区产生联系。原因在于,这些地区大多分布在中西部地区,经济水平虽然偏低,但在资源输出方面与其他省份联系较强,这不仅受惠于中部崛起和西部大开发的政策机遇,也得益于这些省份处于沿海和内地交流的关键通道上。上海、吉林、宁夏、西藏、山西等地区的接近中心度较低,在网络中处于边缘地位。

(4) 中介中心度。中介中心度的平均值为2.644,大于平均值的省市共有12个,分别是重庆、甘肃、湖南、福建、辽宁、内蒙古、四川、山东、浙江、青海、黑龙江和广东,说明这些地区在中国水资源绿色效率空间关联网络中发挥着“中介”和“桥梁”的作用,是网络中的关键节点,对促成其他省域间的连接有较强的控制力,一旦这些节点出现问题,将会导致网络中出现断裂并产生“结构洞”。上海、山西、西藏、吉林、新疆等地区的中介中心度远低于平均值,除上海外,其他地区的经济发展水平相对滞后,且地理位置较为偏僻,从而导致这些地区在中国省际水资源绿色效率空间关联网络中很难影响和控制其他地区。

### 3.3 块模型分析

块模型分析是社会网络空间聚类分析的常用方法,可以从板块个数、板块成员构

成、板块关联关系等视角揭示和刻画水资源绿色效率空间关联网的内部结构特征。本文采用Ucinet软件中的CONCOR模块,以最大分割深度为2,集中度为0.2的标准,对中国水资源绿色效率空间关联网进行块模型分析,将中国31个省(市、自治区)划分为4个板块(表3),以清晰表达水资源绿色效率空间关联网的板块关联关系。

表3 中国水资源绿色效率空间关联板块的溢出效应

Tab. 3 The spillover effect of spatial correlation plate of water resources green efficiency in China

板块	接收关系矩阵(个)				接收关系数(个)		溢出关系数(个)		期望内部关系比例(%)	实际内部关系比例(%)
	板块一	板块二	板块三	板块四	板块内	板块外	板块内	板块外		
板块一	27	25	36	33	27	29	27	94	30	22
板块二	8	16	15	9	16	61	16	32	17	33
板块三	16	21	24	6	24	81	24	43	20	36
板块四	5	15	30	11	11	48	11	50	23	18

划分结果显示,北京、天津、吉林、上海、江苏、浙江、安徽、四川、湖北、广东10个地区属于第一板块;山西、福建、山东、湖南、广西、甘肃、青海和新疆8个地区属于第二板块;河北、黑龙江、重庆、贵州、云南、宁夏6个地区属于第三板块;辽宁、内蒙古、江西、河南、海南、陕西和西藏7个地区为第四板块。

由表3可知,在中国省际水资源绿色效率空间关联网的297条关联关系中,有78条为板块内部关联关系,其余219条为板块间关联关系,占比分别为26.26%和73.74%,板块间关联关系比例远大于板块内比例,表明中国省际水资源绿色效率的空间溢出效应以区域间溢出为主。在第一板块中,内部关系总数为27条,接收其他板块的溢出关系总数为29条,向其他板块发出的关系总数高达94条,溢出关系明显多于接收关系,且实际内部关系比例(22%)小于期望内部关系比例(30%),因此,第一板块属于“净溢出”板块;第二板块的内部关系总数为16条,接收其他板块的溢出关系总数为61条,而向其他板块发出关系总数仅为32条,接收关系明显大于溢出关系,且实际内部关系比例(33%)大于期望内部关系比例(17%),因此,第二板块具有“净受益”板块特征;第三板块的内部关系总数为24条,接收其他板块的溢出关系总数为81条,发出的关系总数为43条,实际内部关系比例为36%,大于期望内部关系比例20%,该板块成员向板块内部成员、其他板块成员均发出较多关系,具有“双向溢出”板块特征;在第四板块中,内部关系总数为11条,接收其他板块的溢出关系(48条)与发出的关系总数(50条)大致相等,实际内部关系比例为18%,小于期望内部关系比例23%,属于“经纪人”板块。

根据表3结果,本文计算出了板块的网络密度矩阵,以此来考察板块之间水资源绿色效率增长动能的传递规律。根据板块密度大于整体网络密度赋值为1,反之赋值为0的规则,得到水资源绿色效率空间关联板块的密度矩阵和像矩阵(表4),并以此绘制出四大板块之间的关系图,如图3所示。

由表4和图3可知,第一板块不仅存在内部指向关系,还主要指向第二、第四板块,扮演了“发动机”的角色,从而将水资源绿色效率增长的动能传递给具有“中介”“桥梁”作用的第四板块,即“经纪人”板块;第四板块又将水资源绿色效率增长的动能传递给具有“双向溢出”效应的第三板块和“净受益”效应的第二板块;第二板块虽然也指向第四板块,但主要接受来自其他三个板块的溢出关系,在水资源绿色效率空间关联网中扮演“跟随者”的角色;从整体上看,第一板块(“净溢出”板块)中的地区大多位于中国东部,第二板块(“净受益”板块)成员多位于西部地区,而具有“双向溢

表4 中国水资源绿色效率空间关联板块的密度矩阵和像矩阵  
 Tab. 4 The density matrix and image of water resources green efficiency in China

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块一	板块二	板块三	板块四	板块一	板块二	板块三	板块四
板块一	0.356	0.667	0.100	0.375	1	1	0	1
板块二	0.200	0.167	0.281	0.417	0	0	0	1
板块三	0.329	0.443	0.405	0.300	1	1	1	0
板块四	0.213	0.542	0.471	0.146	0	1	1	0

注：“1”表示行指向列，“0”表示没有关联关系。

出”效应的第三板块和具有“桥梁”作用的第四板块成员多位于中西部地区，中国水资源绿色效率空间关联网络中各板块的传递关系具有明显的“梯度”特征。

### 4 结论与建议

通过本文研究得到以下结论：

(1) 中国水资源绿色效率地区差异性显著，总体表现为中部>东部>西部的特征，呈现出显著的空间非均衡性。

(2) 中国省际水资源绿色效率的空间关联关系呈现出较为复杂的网络结构，所有地区均处于空间关联网络中，网络整体具有较强的稳定性；个体特征表明，东部地区以溢出效应为主，在全国水资源绿色效率优化中扮演“发动机”的角色，而中西部地区以接收其他地区的溢出关系为主，在网络结构中处于边缘位置。

(3) 块模型分析表明，北京、天津等10个地区属于“净溢出”板块，在网络中处于核心地位；青海、新疆等8个地区属于“净受益”板块，在网络中处于边缘地位；河北、重庆等6个地区属于“双向溢出”板块，具有双向“引领”作用；河南、陕西等7个地区属于“经纪人板块”，起“中介”、“桥梁”作用。

根据上述结论提出以下建议：

(1) 重视中国水资源绿色效率的空间差异性问题。中国各地区水资源利用情况差异性较大，东中西部距离技术生产前沿的距离不同，因此各地区应因地制宜地制定适合本地区水资源可持续发展的政策及策略，政府也应加大对中西部地区政策、资金的扶持力度，全面落实“西部大开发”“中原崛起”等相关地域政策，促进区域公平，缩小地区差异，实现各区域水资源绿色效率的协调发展。

(2) 全面认识水资源绿色效率增长的空间关联关系及其网络结构特征。中国省际水资源绿色效率增长存在较强的空间关联性和复杂的网络结构形态，因此需要不断地调整和优化水资源绿色效率增长的空间关联网络结构，提高水资源绿色效率的空间配置效率。市场是资源配置和区域协调发展的基础，通过宏观调控和市场机制为水资源利用跨区域合作交流和空间优化配置创造更多的有利条件，打破地区间的行政壁垒，建立全国统一市场，促进地区间各种生产要素的流动，发展具有比较优势的产业，从而在全国性生产活动中获得比较利益。

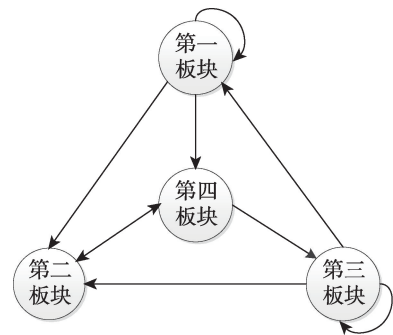


图3 中国水资源绿色效率板块之间的关联关系

Fig. 3 The relationship between the green efficiency plates of China's water resources



(3) 从全局出发, 建立区域协调发展机制, 实现区域协调发展。在水资源绿色效率空间关联网中, 所有省份均不能独善其身, 要实现区域水资源绿色效率的协调发展, 必须从全局出发, 以协同的理念推动整体效能发展。在水资源绿色效率发展过程中, 东部地区主要扮演“发动机”角色, 例如京津、苏沪浙以及广东等地区可以利用资金和技术优势, 深化区域合作交流, 探寻更多的空间溢出通道, 从而发挥引领者的带头作用, 促进中西部水资源绿色效率的提高; 中部地区作为连接东、西部的桥梁和纽带, 承接东西部资金、技术和人才的转移, 战略位置极为重要, 而中部大多数地区在水资源绿色效率空间关联网中属于具有“桥梁”作用的“经纪人”板块, 因此中部地区应强化中部战略意识, 确立区域协调发展理念, 从转变观念、重新规划、创新制度和机制中解决问题, 例如河南、江西等地可以通过加大全方位对外开放的力度, 促进中部和国内其他地区, 尤其是国外市场的对接, 实现两个双赢; 西部地区(新疆、青海等)作为空间溢出关系的“受益者”, 一方面要扩大对外开放程度, 积极运用东中部的溢出资金和技术, 促进地区水资源绿色效率的提高, 另一方面要加大区域创新力度, 借鉴发达地区的发展经验, 努力改善自身发展环境, 实现从“被动接受”向“主动溢出”的转变, 为区域水资源绿色效率的提高注入新的活力。

### 参考文献(References)

- [1] 沈满洪, 陈庆能. 水资源经济学. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. [Shen Manhong, Chen Qingneng. Water Resources Economics. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.]
- [2] 左其亭, 胡德胜, 窦明, 等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系. 资源科学, 2014, 36(5): 906-912. [Zuo Qiting, Hu Desheng, Dou Ming, et al. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of Human-Water Harmony. Resources Science, 2014, 36(5): 906-912.]
- [3] 由沙丘. 我国工业绿色全要素水资源效率研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2017. [You Shaqiu. Research on green total factor efficiency of water resource in China. Harbin: Doctoral Dissertation of Harbin Institute of Technology, 2017.]
- [4] 孙爱军, 董增川, 王德智. 基于时序的工业用水效率测算与耗水量预测. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 547-553. [Sun Aijun, Dong Zengchuan, Wang Dezhi. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 547-553.]
- [5] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板数据的实证研究. 资源科学, 2014, 36(9): 1765-1772. [Tong Jinping, Ma Jianfeng, Wang Huimin, et al. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel data. Resources Science, 2014, 36(9): 1765-1772.]
- [6] 买亚宗, 孙福丽, 石磊, 等. 基于DEA的中国工业水资源利用效率评价研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 42-47. [Mai Yazong, Sun Fuli, Shi Lei, et al. Evaluation of China's industrial water efficiency based on DEA model. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(1): 42-47.]
- [7] 邱林, 田景环, 段春青, 等. 数据包络分析在城市供水效率评价中的应用. 人民黄河, 2005, 27(7): 33-39. [Qiu Lin, Tian Jinghuan, Duan Chunqing, et al. Application of data envelopment analysis in urban water supply efficiency evaluation. Yellow River, 2005, 27(7): 33-39.]
- [8] 马海良, 黄德春, 张继国. 考虑非合意产出的水资源利用效率及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(10): 35-42. [Ma Hailiang, Huang Dechun, Zhang Jiguo. Study on the water resources utilization efficiency and influence factors of the non-acceptable output. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10): 35-42.]
- [9] 马海良, 丁元卿, 王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 406-417. [Ma Hailiang, Ding Yuanqing, Wang Lei. Measurement and convergence analysis of green water utilization efficiency. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 406-417.]
- [10] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度. 地理学报, 2014, 69(1): 121-133. [Zhao Liangshi, Sun Caizhi, Zheng Defeng. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(1): 121-133.]
- [11] 孙才志, 赵良仕, 邹玮. 中国省际水资源全局环境技术效率测度及其空间效应研究. 自然资源学报, 2014, 29(4): 553-563. [Sun Caizhi, Zhao Liangshi, Zou Wei. The interprovincial water resources global environmental technology effi-

- ciency measurement in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 553-563.]
- [12] 陈磊, 吴继贵, 王应明. 基于空间视角的水资源经济环境效率评价. *地理科学*, 2015, 35(12): 1568-1574. [Chen Lei, Wu Jigui, Wang Yingming. Efficiency evaluation of water resource-economic-environment system based on spatial perspective. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1568-1574.]
- [13] 生延超, 周玉姣. 适宜性人力资本与区域经济协调发展. *地理研究*, 2018, 37(4): 797-813. [Sheng Yanchao, Zhou Yujiao. Appropriate human capital and coordinated development of regional economy. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 797-813.]
- [14] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于SBM-Malmquist生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究. *资源科学*, 2018, 40(5): 993-1005. [Sun Caizhi, Ma Qifei, Zhao Liangshi. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model. *Resources Science*, 2018, 40(5): 993-1005.]
- [15] 孙才志, 马奇飞, 李素娟. 中国水资源绿色效率TFP变化趋势预测. *人民黄河*, 2018, 40(2): 42-48. [Sun Caizhi, Ma Qifei, Li Sujuan. Prediction of water resources green efficiency TFP in China. *Yellow River*, 2018, 40(2): 42-48.]
- [16] 孙才志, 郜晓雯, 赵良仕. “四化”对中国水资源绿色效率的驱动效应研究. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2018, 18(1): 57-67. [Sun Caizhi, Gao Xiaowen, Zhao Liangshi. Driving effect of “Four Modernizations” on green efficiency of water utilization in China. *Social Science Edition Journal of China University of Geosciences*, 2018, 18(1): 57-67.]
- [17] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 1999-2011. [Sun Caizhi, Jiang Kun, Zhao Liangshi. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 1999-2011.]
- [18] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [19] 郑德凤, 郝帅, 孙才志, 等. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测. *地理研究*, 2018, 37(5): 1034-1046. [Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi, et al. Spatio-temporal pattern evolution of eco-efficiency and the forecast in mainland of China. *Geographical Research*, 2018, 37(5): 1034-1046.]
- [20] 刘华军, 何礼伟. 中国省际经济增长的空间关联网络结构: 基于非线性Granger因果检验方法的再考察. *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. *Journal of Finance Economics*, 2016, 42(2): 97-107.]
- [21] 黄杰. 中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素. *资源科学*, 2018, 40(4): 759-772. [Huang Jie. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China. *Resources Science*, 2018, 40(4): 759-772.]
- [22] 方大春, 裴梦迪. 房价空间关联网络结构实证分析. *上海经济研究*, 2018, (1): 63-73. [Fang Dachun, Pei Mengdi. The empirical analysis of the spatial correlation network structure of housing price. *Shanghai Economic Review*, 2018, (1): 63-73.]
- [23] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究. *中国工业经济*, 2015, (5): 83-95. [Liu Huajun, Liu Chuanming, Sun Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China. *China Industrial Economics*, 2015, (5): 83-95.]
- [24] White, H. C., Boorman, S. A., Breiger, R. L. Social structure from multiple networks. I. Blockmodels of roles and positions. *American Journal of Sociology*, 1976, 81(4): 730-780.
- [25] 张鹏, 于伟. 基于社会网络分析的我国绿色全要素生产率增长空间特征及其动因研究. *经济问题探索*, 2017, (2): 39-46. [Zhang Peng, Yu Wei. Spatial characteristics and motivation of green total factor productivity growth in China based on social network analysis. *Inquiry into Economic Issues*, 2017, (2): 39-46.]
- [26] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6546-6554. [Huang Jing, Song Zhenwei, Chen Fu. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6546-6554.]
- [27] 王新华, 徐忠民, 李应海. 甘肃省2003年的水足迹评价. *自然资源学报*, 2005, 6(20): 909-915. [Wang Xinhua, Xu Zhongmin, Li Yinghai. A rough estimate of water footprint of Gansu province in 2003. *Journal of Natural Resources*, 2005, 6(20): 909-915.]
- [28] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年. *数量经济技术经济研究*, 2008, (10): 17-31. [Shan Haojie. Re-estimating the capital stock of China: 1952 to 2006. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, (10): 17-31.]
- [29] 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析. *生态学报*, 2016, 36(1): 86-97. [Sun Caizhi, Han Qin, Zheng Defeng. The spatial correlation analysis of gray water footprint and load factor in Chinese provinces. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 86-97.]

- [30] 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. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. [Han Qin, Sun Caizhi, Zou Wei. Gray water footprint efficiency measure and driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012. Resources Science, 2016, 38(6): 1179-1191.]
- [31] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析. 地理科学进展, 2018, 37(7): 901-911. [Sun Caizhi, Ma Qifei, Zhao Liangshi. Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis. Progress in Geography, 2018, 37(7): 901-911.]

## Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China

SUN Caizhi<sup>1</sup>, MA Qifei<sup>2,3</sup>

(1. Marine Economic and Sustainable Development Research Center of Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 3. School of Maritime Economics and Management of Dalian Maritime University, Dalian 116029, Liaoning, China)

**Abstract:** In recent years, China's economic development has maintained rapid growth, and the demand for water resources is also increasing day by day. However, shortage of water resources and inefficient use of water have become an obstacle to the sustainable development of China's social economy. The research on spatial correlation network characteristics of China's water resources green efficiency can lay a foundation for optimizing the overall spatial pattern of China's water resources green efficiency and realizing the cross-regional synergistic promotion of it. Therefore, from the perspective of Group Frontier, this paper divides 31 provincial-level regions in China into three groups: eastern, central and western. It uses SBM model to measure the green efficiency of water resources in different areas, and uses VAR Granger causality test to transform "attribute data" of water resources green efficiency into "relational data". On this basis, the spatial correlation network characteristics of water resources green efficiency in China are studied by means of social network analysis. The results show that the regional differences in China's water resources green efficiency are significant, and the overall performance is characterized by central > eastern > western region. The spatial correlation of the water resources green efficiency of between provinces of China presents a more complex network structure, all regions are in the spatial correlation network of water resources green efficiency, and the network overall has the strong stability. The individual characteristics show that the eastern region is dominated by spillover effect, which plays a role of "engine" in the optimization of national water resources green efficiency, while the western region is dominated by the spillover from other regions, which is in the edge position in the network structure. Block model analysis shows that there are 10 provinces in "net overflow" plate such as Beijing and Tianjin, and 8 in "net benefit" plate such as Qinghai and Xinjiang, and 6 provinces in "two-way overflow" plate such as Hebei and Chongqing, and 7 in "brokers" such as Henan and Shaanxi. The results provide suggestions for the improvement of water resources green efficiency and the coordinated development in different regions of China.

**Keywords:** SBM model; group frontier; social network analysis; green efficiency of water resources; spatial association network