

中国省级水贫困的测算及空间关联效应

邓光耀^{1,2}, 张鑫²

(1.兰州财经大学“一带一路”经济研究院, 甘肃 兰州 730020; 2.兰州财经大学统计与数据科学学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 测度中国各省(市)的水贫困情况, 并进行社会网络分析, 为缓解中国水贫困窘境提供决策依据。[方法] 采用熵权法和社会网络分析方法, 对2010—2021年中国各个省(市)的水贫困程度进行测算并分析其空间关联效应。[结果] ①中国省级水贫困指数在考察期内整体呈上升趋势, 水贫困程度逐步下降, 但空间非均衡特征也比较明显。②省级水贫困网络整体呈现出显著的空间关联性和复杂的结构形态, 所有地区都关联其中, 但这种关联性的紧密程度不高。③根据块模型分析结果, 北京、天津等5个省(市)被归类为“净受益”板块, 湖南、海南等13个省(市)则被归类为“净溢出”板块, 广东、重庆等4个城市则被归类为“双向溢出”板块; 而内蒙古、黑龙江等9个省(市)则被归类为“经纪人板块”。此外, 板块内关系稀疏, 板块间联系紧密。④核心边缘密度分析表明, 核心地区的数目频繁波动, 边缘地区的数目则先增加后减少。[结论] 国家应全面认识水贫困指数的空间关联关系和网络结构特征, 制定并推行区域差异化的政策和策略, 以协同促发展, 充分发挥政府和市场作用, 有效改善水贫困窘境, 提升水安全保障。

关键词: 水贫困指数; 空间关联; 社会网络分析

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)05-0204-10

中图分类号: F205

文献参数: 邓光耀, 张鑫. 中国省级水贫困的测算及空间关联效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 204-213. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.022; Deng Guangyao, Zhang Xin. Calculation and spatial correlation effects of water poverty in various provinces of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 204-213.

Calculation and Spatial Correlation Effects of Water Poverty in Various Provinces of China

Deng Guangyao^{1,2}, Zhang Xin²

(1. Economic Research Institute of the Belt and Road Initiative,

Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. School of

Statistics and Data Science, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: [Objective] The water poverty in China's provinces (cities) was measured and social network analysis was conducted in order to provide a decision-making basis for alleviating China's water poverty dilemma. [Methods] The entropy weight method and social network analysis were employed to measure and analyze the spatial correlation effects of water poverty in various Chinese provinces (cities) from 2010 to 2021. [Results] ① The water poverty index of Chinese provinces has shown an overall upward trend during the inspection period, and the degree of water poverty has gradually decreased. However, the spatial non-equilibrium characteristics remain quite evident. ② The provincial water poverty network exhibits significant spatial correlation and complex structural forms as a whole, with all regions interconnected; however, the degree of closeness of this correlation is not high. ③ According to the block model analysis results, 5 provinces (cities) including Beijing and Tianjin are classified as the “net beneficiary” group, 13 provinces (cities) including Hunan and Hainan as the “net spillover” group, 4 provinces (cities) including Guangdong and Chongqing as the “two-way spillover” group, and 9 provinces (cities) including Inner Mongolia and

收稿日期: 2024-04-09

修回日期: 2024-06-05

资助项目: 国家自然科学基金地区项目“增加值贸易视角下虚拟水国际贸易的核算、网络特征及影响因素研究”(72363021); 甘肃省陇原青年英才项目“增加值贸易视角下中国省级虚拟水贸易网络的特征及影响因素研究”(2022); 兰州财经大学丝绸之路经济研究院重点科研项目“黄河流域各省环境效率的空间关联网络特征及其影响因素研究”(JYYZ202102)。

第一作者: 邓光耀(1985—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 教授, 主要从事资源环境统计研究。Email: dgy203316@163.com。

通信作者: 张鑫(1997—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境统计。Email: 2862504789@qq.com。

Heilongjiang as the “broker” group. In addition, the relationships within the plates are sparse, whereas the connections between the plates are strong. ④ Analysis of the core-edge density shows that the number of core areas fluctuates frequently, while the number of edge areas initially increases and then decreases. [Conclusion] The State should develop a comprehensive understanding of the spatial correlation and network structure characteristics of the Water Poverty Index, formulate and implement regionally differentiated policies and strategies, promote coordinated development, give full play to the roles of the government and market, effectively address the challenges of water poverty, and enhance water security.

Keywords: water poverty index; spatial correlation; social network analysis

水资源是维系生态平衡,保障粮食安全,促进经济繁荣和社会稳定的关键因素。然而,《2024 年联合国世界水发展报告》指出:世界 1/4 的人口面临着极高的水资源短缺压力,有 1/2 人口在一年之中总有一段时间面临严重的缺水问题。这足以说明水贫困问题对人类的生存和发展构成了严重威胁。中国早在 2014 年已经将水安全上升为国家战略,并作出了一系列部署,虽取得显著成效,但与经济社会发展要求和各方面需求相比,水安全保障能力仍有待进一步提升。

学术界对水贫困问题的研究也十分重视,期望能够为水资源管理政策提供更多决策依据。早期使用人均水资源量来评估水资源短缺程度的方法,是由瑞典水文学家 Falkenmark^[1]提出的。但单一指标衡量缺水程度存在明显的不足,为了更全面地评价水资源短缺程度,牛津大学的 Sulliva^[2]提出了一种多维评价工具:水贫困指数(Water poverty index, WPI)。该评估体系融合了自然与社会经济维度的各项指标,能够精准且全面地反映一个国家或地区的水资源紧张程度,因此逐渐成为水资源短缺研究领域不可或缺的评估工具。

WPI 模型在构建与改进方面,学者们根据研究目的和区域特性进行了不同的尝试。Kini^[3]提出的包容性水贫困指数引入了社会凝聚力的概念,有助于提升水资源管理政策的社会公平性。Pérez-Foguet 等^[4]结合 PSR 模型构建了增强的水贫困指数,以便全面地评估水资源贫困的多维性和复杂性。Wilk^[5]将参与式方法与水贫困模型结合了起来,评估印度中央邦社区层面的水贫困情况。Juran 等^[6]用村级调查方法将特定场景的人为驱动因素考虑在内,探究海啸灾区的水资源贫困情况。Yuan Liang^[7]采用动态赋权法构建长江经济带的多维水贫困框架,这种方法有助于准确地反映水资源的实际状况。

此外,WPI 模型在多个地理尺度上均具有适用性。首先,在社区尺度上,如 Kallio^[8]等在对老挝多个村庄进行水贫困评估时,使用主成分分析和地理加权法来研究水贫困的驱动因素。Korc 等^[9]运用

WPI 模型对美国德克萨斯州西部边境殖民地的水状况进行评估。杨玉蓉^[10]等采用非均衡法对湖南不同地貌类型的村庄进行水贫困评价,并分析其驱动因素。其次,在流域尺度上,WPI 模型也具有适用性,如 Manandhar^[11]和 Thakur^[12]分别对尼泊尔的卡利甘达基河流域、巴格马蒂河上游流域进行水资源状况评估。而邵薇薇等^[13]则用改进的 WPI 均衡计算方法,对中国的七大江河流域的水资源状况都进行了评价。除此之外,还有文章对中国的赣江流域^[14]、石羊河流域^[15]、大凌河流域^[16]等进行水资源贫困水平的评估。最后,在区域尺度上,WPI 模型同样得到了广泛的应用。Wurtz^[17]等使用 TerrSet 软件的多标准评估来计算墨西哥奇瓦瓦州的水贫困指数,提高了 WPI 结果中各种缺水问题的可见性。再启智等^[18]对重庆市水贫困进行了测度。孙才志等^[19-20]不仅评估了大连市水贫困情况,还评估了中国 31 个省(市)的水贫困情况,并对其空间相关性进行了分析。

综上所述,国内外学者在水贫困指数的理论基础和实际应用方面,积累了丰富的研究成果。但是多数文献运用 WPI 模型进行实证分析,旨在详细评估中国各个社区、流域和区域的水资源贫困状况,并在此基础上进一步探究水贫困的时空异质性、障碍因子以及影响因素。已有的研究中,没有文献利用社会网络分析方法对中国各省水贫困的空间关联网络进行详细分析。因此,本文在对中国 31 个省(市)的水贫困进行测度的基础上,构建水贫困空间关联网络,并运用社会网络分析方法进行深入探讨。希望通过相关分析,能够全方位地了解中国各省(市)的水贫困现状及其在地理空间上的关联关系,从而为解决水贫困问题提供更加广阔的视角和决策依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

文章所需数据来源于 2011—2022 年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和 2010—2021 年《中国水资源公报》。

1.2 水贫困指数的测算

WPI 模型的构建具有完备的评价体系,从资源、设施、能力、使用和环境 5 个维度来评估水贫困程度^[21-22]。资源维度用于反映水资源的可获取性,重点考量基本供给状况以明确整体可利用性;设施维度是通过供用水以及污水处理的设施建设水平,评估居民对水资源利用的便捷安全程度;能力维度在经济发展水平、收入水平和教育水平的基础上,评估居民对水资源的利用和管理能力;使用维度通过各部门用水量及整体用水需求压力,来评估水资源对经济发展所作的贡献;环境维度反映生态因素对水质水量的影响。结合中国水资源发展现状,与指标的易获取性,最终选取指标体系详见表 1,并根据熵权法^[19]对指标进行赋权。

表 1 水贫困评价指标体系

Table 1 Water poverty evaluation index system

指标	子指标	指标属性	权重
资源	水资源总量/ 10^8 m^3	正向	0.101 3
	年降水量/mm	正向	0.049 0
	人均水资源量/ m^3	正向	0.406 6
设施	城市日污水处理能力/ 10^4 m^3	正向	0.072 8
	用水普及率/%	正向	0.001 7
	供水日生产能力/ 10^4 m^3	正向	0.075 7
能力	财政自给率/%	正向	0.026 1
	高校在校学生数/ 10^4 人	正向	0.050 2
	科技支持率/%	正向	0.068 9
	城镇居民人均可支配收入(元)	正向	0.047 7
使用	农村居民人均可支配收入(元)	正向	0.045 2
	农业用水量/ 10^8 m^3	负向	0.008 4
	工业用水量/ 10^8 m^3	负向	0.007 2
	人均日生活用水量/L	负向	0.005 5
	万元 GDP 用水量/t	负向	0.010 4
环境	污水处理率/%	正向	0.041 7
	建成区绿化覆盖率/%	正向	0.003 6
	化肥使用量/ 10^4 t	负向	0.010 5
	污水排放量/ 10^4 t	负向	0.004 6

1.3 水贫困空间关联网络的构建

文章用修正的引力模型,构建省级水贫困指数的空间关联网络:

$$y_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i \cdot E_i \cdot G_i} \times \sqrt[3]{P_j \cdot E_j \cdot G_j}}{\left(\frac{D_{ij}}{g_i - g_j}\right)^2} \quad (1)$$

$$k_{ij} = \frac{E_i}{E_i + E_j}$$

式中: i, j 表示不同的城市; y_{ij} 为省份 i 和省份 j 水

贫困之间的引力; E_i 代表 i 城市的水贫困指数; k_{ij} 表示 i 省份对 i 与 j 两省份之间水贫困联系的贡献率,以省份 i 的水贫困指数除 i 与 j 两省份水贫困之和来表征;以各省份年末常住人口(P)、水贫困指数(E)和地区生产总值(G)三者的几何平均值来表征质量;以省份 i 到省份 j 的地理距离(D_{ij})与人均 GDP 的差值($g_i - g_j$)之比,并取其平方来表征省份之间的“经济地理距离”,其中,地理距离以省会城市之间的球面距离表示。

根据修正后引力模型的测算结果,可以构建水贫困关系强度矩阵,并对数据进行标准化处理,以矩阵各行的平均值作为阈值,若省份间的水贫困联系强度大于平均值则记为 1,小于平均值的数据则记为 0,从而得到水贫困指数的二值矩阵,此矩阵可用于水贫困空间关联网络分析。

1.4 水贫困空间关联网络结构特征的刻画

1.4.1 整体网络特征 采用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率来刻画整体网络特征^[23]。

①网络密度在数值上体现为实际连接数与潜在最大连接数的比率。若网络密度越高,则说明各省份间互动越频繁。②网络关联度是用来衡量网络稳健性的指标。网络关联度越高的省份对整个网络稳定性的贡献度就越大。③网络等级度是用来衡量网络中各省份间等级性的指标。网络等级度越高,网络中各省份间的层级分化就越明显。④网络效率是衡量网络中各省份间互通性的指标。若网络效率较低,则说明各省份之间的连线较为密集,关联渠道比较多,有利于促进资源在各个省份之间进行流动配置,使得网络结构更加地稳固。

1.4.2 个体网络特征 采用点度中心度、中介中心度和接近中心度等指标刻画个体网络特征^[24]。①点度中心度是通过计算省份间的直接连接数量,来评估其在水贫困空间关联网络中的重要程度。点度中心度越高,意味着与其他省份的联系越密切,更容易产生广泛的影响力。更具体地讲,点入度是指其他省份对该省份产生的影响,点出度是指本省份对其他省份产生的影响。②中介中心度揭示了一个省份控制其他省份关联关系的能力。当一个省份的中介中心度较高时,说明它是多个省份建立关系的桥梁,对于网络的连通和资源信息传递具有重要作用。③接近中心度是衡量某一省份在水贫困空间关联关系中“独立性”的指标。如果一个省份的接近中心度较高,则它与其他省份的互动会更加频繁,同时,相对难以被其他省份影响或主导,具有较强的独立性。

1.4.3 块模型分析 在社会网络空间的聚类分析

中,块模型被视为一种强大的工具。它不仅能够帮助我们将地位与功能相似的省份归为同一板块,提高网络结构特征的可见性,还能揭示各个板块在空间网络中所扮演的角色和发挥的作用。板块通常被划分为 4 种类型^[25]: ①净受益板块。此板块更多地接收来自其他板块的溢出关系,且外部关系的流入显著超过了向外部溢出的关系数。②净溢出板块。此板块向外发出的关系远多于其从外部获得的关系。③双向溢出板块。此板块既向外部发出关系也接收来自其他板块的溢出关系,且不论是发出还是接收的关系数目都不少。④经纪人板块。此板块不仅与其他板块有广泛的联系,还在板块内部成员之间起到了桥梁作用。而且,与其他板块的联系比与内部成员的联系更为紧密。

1.4.4 核心边缘密度分析 参考相关研究^[26],利用 Ucinet6 对水贫困指数二值矩阵进行核心边缘密度分析,量化出每个节点在网络中的地位,即其“核心度”。根据核心度的大小,可以将节点划分为 3 个类别:核心、边缘和半边缘。核心度较高的节点被视为网络的核心,它们通常是空间关联网络中的重要参与者,对要素的集聚和吸引能力较强,地区间相互联系紧密;而核心度较低的节点则被视为边缘节点,扮演着较为次要的角色,地区间相互联系较弱;其余的被视为半边缘节点,它们具有未来向核心节点转变的潜能。通过这种分析,我们可以清晰地了解各地区在空间关联网络中的作用。

2 结果与分析

2.1 水贫困指数测度结果与分析

水贫困指数测度结果详见表 2。2010—2021 年各个省份的水贫困指数年均值从 0.168 上升至 0.226,上升了 34.52%,整体上水贫困指数历年都处于上升趋势,说明随着中国对节水供水重大水利工程的推进与落实,水资源管理制度的逐步完善与规范,以及对水生态的治理与保护,使各个省份的水安全综合保障能力得以显著提高,进而展现出社会发展与水资源利用之间逐步协调的良好趋势。从东、中、西 3 大地区来看水贫困指数,东部地区均值范围为 0.198~0.265,中部地区均值范围为 0.147~0.207,西部地区均值范围为 0.157~0.203,呈现出显著的空间非均衡特征。

2.2 空间关联网络结构特征

2.2.1 网络整体结构特征分析 根据修正过的引力模型,建立各省份水贫困空间关联网络矩阵,并通过

Netdraw 将 2021 年的空间关联网络可视化。从图 1 可以看出,中国各省份的水贫困指数在空间上呈现出紧密的网络联系,没有任何省份是孤立的。理论上,这些省份之间最多可以形成 870 条关联关系,但实际上只有 189 条关联关系存在,说明水贫困空间关联关系的紧密度还有很大的优化空间。此外,水贫困空间关联网络具有高度的通达性和地理集聚性,但其分布并不均衡。广东、福建、浙江、江苏、北京、上海等东部沿海省市占据中心位置,且与其他省份互动频繁。相比之下,中西部省份则位于网络的边缘,围绕着中心省份分布。这样就形成了“中心—外围”式的水贫困空间网络分布格局。

表 2 2010—2021 年中国省域水贫困指数

Table 2 Provincial water poverty index in China during 2010—2021

地区	水贫困指数		地区	水贫困指数	
	2010 年	2021 年		2010 年	2021 年
北京	0.214	0.274	江西	0.189	0.233
天津	0.133	0.197	河南	0.138	0.243
河北	0.120	0.182	湖北	0.171	0.259
辽宁	0.171	0.203	湖南	0.186	0.250
上海	0.225	0.290	中部均值	0.144	0.206
江苏	0.236	0.333	广西	0.180	0.210
浙江	0.251	0.356	重庆	0.120	0.200
福建	0.200	0.234	四川	0.174	0.283
山东	0.172	0.273	贵州	0.114	0.178
广东	0.319	0.409	云南	0.148	0.186
海南	0.139	0.169	西藏	0.554	0.506
东部均值	0.198	0.265	陕西	0.114	0.185
山西	0.095	0.152	甘肃	0.071	0.111
内蒙古	0.092	0.150	青海	0.101	0.143
吉林	0.120	0.150	宁夏	0.066	0.113
黑龙江	0.121	0.166	新疆	0.103	0.129
安徽	0.181	0.254	西部均值	0.159	0.204

(1) 网络密度与网络关系数。从图 2 可知,样本期内的网络密度与网络关系数变化规律基本一致,总体上都呈先增后减趋势。样本期内的网络关系数均值为 203,远低于最大可能的网络关联关系数 930 (31×30),表明在研究期内,各省份的水贫困指数存在明显的空间关联性,但这种关联性的紧密程度相对较低,有很大的优化空间。样本期内网络密度的均值为 0.219,说明各省市之间的水贫困空间关联网络结构相对松散。但空间网络结构密度过高并非理想状态,它会导致冗余线路增多,降低资源流动效率。因此,只有将网络密度保持在适当水平上才更有利于水资源流动配置。

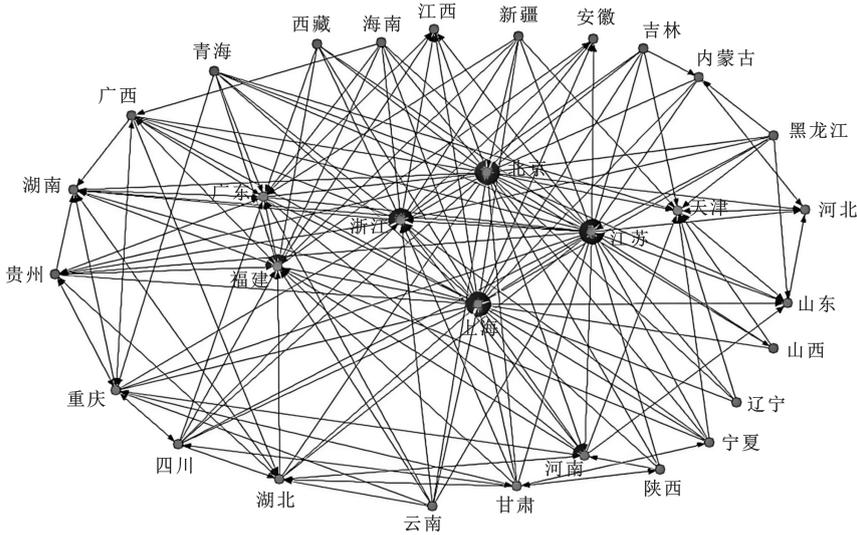


图 1 2021 年中国省域水贫困空间关联网

Fig.1 Spatial correlation network of provincial water poverty in China in 2021

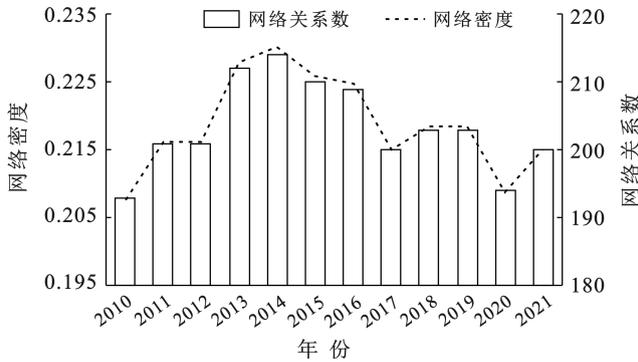


图 2 2010—2021 年网络密度与网络关系数

Fig.2 Network density and number of network relationships during 2010—2021

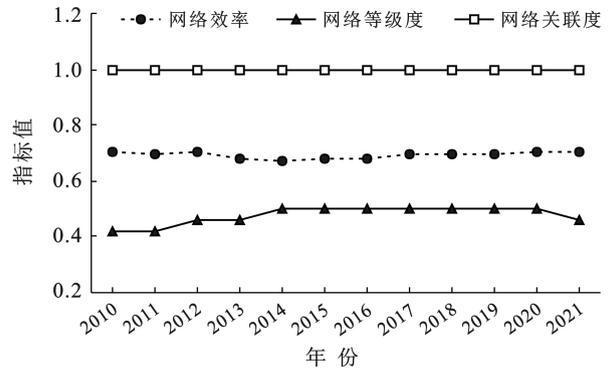


图 3 2010—2021 年网络等级度、网络效率和网络关联度

Fig.3 Network hierarchy, network efficiency and network relevance during 2010—2021

(2) 网络等级度、网络效率和网络关联度。从图 3 可知,网络等级在 0.45 附近波动,表明水贫困空间关联网中,各省市间的空间关联等级制度虽然不是特别严格,但网络层级结构比较稳定。网络效率在从 2010 年的 0.708 降低到 2014 年的 0.674 又在 2021 年回升为 0.701,效率先降后升,但最终效率值与初始值相比还是降低的,说明空间网络中的连线数目虽有波动,但整体都比 2010 年的多,紧密度有所提升。样本期内的水贫困空间网络关联度恒为 1,说明全国各省市在水贫困问题上展现出了高度的相互依赖性,所有地区都关联其中,形成了紧密的水贫困空间关联网结构。也就是说,任何省份的水资源状况都会直接或间接地对其他省份产生影响,这突显出水贫困问题的整体性和联动性。

2.2.2 网络内部个体特征分析 为了明确各省份在省域水贫困空间关联网中的重要性 and 影响力,本文以 2021 年为例,对网络的中心性指标进行量化分析。表 3 为中国水贫困空间关联网的中心性测度结果。

(1) 点度数中心度。2021 年全国 31 个省份中有 10 个省份的点度中心度超过均值 34.409,依次是江苏、上海、北京、浙江、福建、广东、天津、河南、重庆和湖北地区,说明这些省份与众多其他省份保持着紧密的联系。特别值得关注的是江苏、上海和北京地区,点度中心度都在 85 以上,说明这 3 个省份在空间关联网中处于中心地位。进一步分析点出度和点入度,这两个指标的均值都是 6.450,点入度与点出度差值排名前 6 的省份是上海、北京、江苏、浙江、福建和天津,同时它们的点入度都远高于全国点入度的均值,说明了这些省份主要接收来自其他省份的溢出效应。其中,京津沪地区属于极度缺水地区,其人均水资源量低于 500 m³/人,江浙沪闽位于东部沿海地区,水资源时间空间分布极其不均,丰水期大部分水资源以洪水形式宣泄入海,水资源供水蓄水能力有限,由于这些地区优质水资源承载能力不足以支撑区域经济高质量发展,需进行必要的跨区域跨流域的水资源配置,使得水资源依存度较高,接收来自其他省

份的水贫困溢出通道就比较多。点入度与点出度差值排名前 6 名的省份是四川、黑龙江、新疆、海南、青海、云南,并且它们的点出度都高于全国点出度均值,说明这些省份对其他省份的溢出效应较强。

表 3 2021 年中国水贫困空间关联网络的中心性

Table 3 Centrality of spatial correlation networks of water poverty in China in 2021

省份	点出度	点入度	点入度-点出度	点度中心度	排序	中介中心度	排序	接近中心度	排序
北京	5	26	21	86.667	3	18.151	1	88.235	3
天津	3	11	8	36.667	7	2.267	6	61.224	7
河北	2	5	3	16.667	27	0.136	24	53.571	29
山西	4	1	-3	13.333	30	0.067	29	53.571	30
内蒙古	4	2	-2	20.000	23	0.243	22	55.556	23
辽宁	4	0	-4	13.333	31	0.067	30	53.571	31
吉林	6	0	-6	20.000	24	0.235	23	55.556	24
黑龙江	7	0	-7	23.333	19	0.338	15	56.604	19
上海	6	27	21	90.000	2	15.182	3	90.909	2
江苏	7	26	19	90.000	1	16.327	2	90.909	1
浙江	5	18	13	60.000	4	4.814	4	71.429	4
安徽	4	4	0	16.667	28	0.088	28	54.545	27
福建	7	15	8	56.667	5	3.830	5	68.182	5
江西	6	5	-1	20.000	25	0.106	26	55.556	25
山东	5	6	1	23.333	21	0.297	17	56.604	21
河南	8	9	1	36.667	8	1.454	8	61.224	8
湖北	7	7	0	36.667	10	0.589	11	61.224	10
湖南	7	6	-1	33.333	13	0.274	19	60.000	13
广东	9	11	2	50.000	6	1.869	7	66.667	6
广西	9	4	-5	33.333	12	0.385	13	60.000	12
海南	7	0	-7	23.333	22	0.106	25	56.604	2
重庆	9	6	-3	36.667	9	0.780	9	61.224	9
四川	9	2	-7	30.000	14	0.295	18	58.824	14
贵州	9	3	-6	30.000	15	0.249	20	58.824	15
云南	8	0	-8	26.667	17	0.249	21	57.692	17
西藏	6	0	-6	20.000	26	0.106	27	55.556	26
陕西	5	1	-4	16.667	29	0.048	31	54.545	28
甘肃	10	4	-6	33.333	11	0.668	10	60.000	11
青海	8	0	-8	26.667	16	0.461	12	57.692	16
宁夏	7	1	-6	23.333	18	0.353	14	56.604	18
新疆	7	0	-7	23.333	20	0.313	16	56.604	20

(2) 中介中心度。全国有 5 个省份的中介中心度都超过均值 2.269,依次为北京、江苏、上海、浙江和福建,说明这些省份是网络空间中的重要“交通枢纽”。其中,北京的中介中心度高达 18.151,这显示出北京作为中国的首都,在水贫困空间关联网络中占据着核心地位。随着北京在经济发展、科技创新、资源贸易等领域的中心地位不断加强,其在网络中的控制和支配能力也将更加凸显。此外,2021 年 30 个省份的中介中心度总量为 70.347,而排名前 5 位省份的中介中心度之和比例达到 83%,说明这些省份在网络空间中是大部分关联关系的中介者,具有一定的控制和支配能力,是确保网络连通性的重要节点。而安

徽、陕西、山西和辽宁 4 个省份的中介中心度均小于 0.1,说明它们在网络空间中只能处于依附地位。

(3) 接近中心度。全国有 6 个省份的接近中心度都超过均值 61.591,依次是江苏、上海、北京、浙江、福建和广东,说明这些省份能够快速有效地与其他省份建立联系,并展现出强大的影响力。这种影响力的根源在于这些省份位于中国的东南沿海地区,经济发展水平较高,政府调控能力较强,更容易与其他省份建立资源流动通道。而排在后 5 名的省份接近中心度都不到 55,依次为安徽、陕西、河北、山西、辽宁,这些省份受其经济发展水平和地理位置的限制,很难在水贫困空间关联网络中影响其他地区。

2.2.3 块模型分析 块模型分析能够显著提高网络结构特征的可见性。

本研究以最大分割深度为 2,集中度为 0.2 的标

准,把全国 31 个省份划分为 4 个板块,以便更清晰地呈现和认识它们之间的板块关联关系。板块划分结果详见表 4。

表 4 中国省域水贫困空间关联网络的板块结构

Table 4 Plate structure of spatial correlation networks of water poverty in China's provincial areas

板块划分	板块成员	成员数量/个
板块 1	北京、天津、江苏、浙江、上海	5
板块 2	广东、重庆、福建、湖北	4
板块 3	内蒙古、黑龙江、安徽、辽宁、河北、山东、山西、吉林、陕西	9
板块 4	湖南、江西、海南、河南、广西、贵州、云南、四川、西藏、甘肃、青海、宁夏、新疆	13

由表 5 可知,在空间关联网络中共有 200 条关联关系。其中,23 条属于板块内部的关联关系,占据了总联系的 11.5%,而剩余的 177 条关联关系则发生在不同的板块之间,占据了总联系的 88.5%。相比板块

内部的关联关系,板块之间的关联关系占据了绝对的主导地位。这进一步说明,中国省域水贫困指数的空间溢出效应更多地体现在不同板块之间,而非板块内部的溢出。

表 5 中国水贫困板块空间关联关系

Table 5 Spatial correlation of water poverty panels in China

板块	接收关系数		发出关系数		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块属性
	板块内部	板块外部	板块内部	板块外部			
板块 1	8	100	8	18	13.79	30.77	净受益板块
板块 2	3	36	3	29	10.34	9.38	双向溢出板块
板块 3	5	14	5	36	27.59	12.20	经纪人板块
板块 4	7	27	7	94	41.38	6.93	净溢出板块

(1) 板块 1。内部关系数 8 个,从板块外接收的关系数 100,向板块外发出的关系数 18,实际内部关系比例 30.77%,远超过预期的 13.79%,同时,该板块接收的外部关系数远大于其发出的关系数,因此第一板块 1 属于“净受益板块”。

(2) 板块 2。内部关系数 2 个,从板块外接收的关系数 36,向板块外发出的关系数 29,尽管实际内部关系比例 9.38%,略低于期望的 10.34%,但该板块与外部的关系互动非常活跃,接收和发出的关系数目都相当多且相差不大。因此板块 2 属于“双向溢出板块”。

(3) 板块 3。内部关系数 5 个,从板块外接收的关系数 14,向板块外发出的关系数 36,实际内部关系比例 12.20%,小于期望内部关系比例 27.59%,该板块不仅接收外部板块的关系溢出,还积极向外部板块发出更多的关系,扮演积极互动的角色,因此板块 3

为“经纪人”板块。

(4) 板块 4。内部关系数 7 个,从板块外接收的关系数 27,向板块外发出的关系数 94,实际内部关系比例仅为 6.93%,远低于期望的 41.38%,此外,该板块发出的关系数明显多于接收的关系数,因此板块 4 属于“净溢出板块”。

为了深入研究水贫困空间网络板块之间的关联关系,文章基于各板块间关联关系的分布情况,计算出各个板块的密度矩阵(表 6),并以 2021 年中国省域水贫困空间关联网络密度(0.216)作为临界值,若板块密度大于 0.216,则在像矩阵中该板块对应的值设为 1;反之,则在像矩阵中该板块对应的值设为 0。通过这种处理方式,获得了一个水贫困空间关联板块的像矩阵(表 6),它能够直观地展现出各个板块在水贫困问题上存在的关联关系。

表 6 中国水贫困的板块间密度矩阵与像矩阵

Table 6 Interplate density matrix and image matrix for water poverty in China

密度矩阵	板块 1	板块 2	板块 3	板块 4	像矩阵	板块 1	板块 2	板块 3	板块 4
板块 1	0.400	0.000	0.244	0.108	板块 1	1	0	1	0
板块 2	0.500	0.250	0.028	0.346	板块 2	1	1	0	1
板块 3	0.756	0.000	0.069	0.017	板块 3	1	0	0	0
板块 4	0.862	0.692	0.017	0.045	板块 4	1	1	0	0

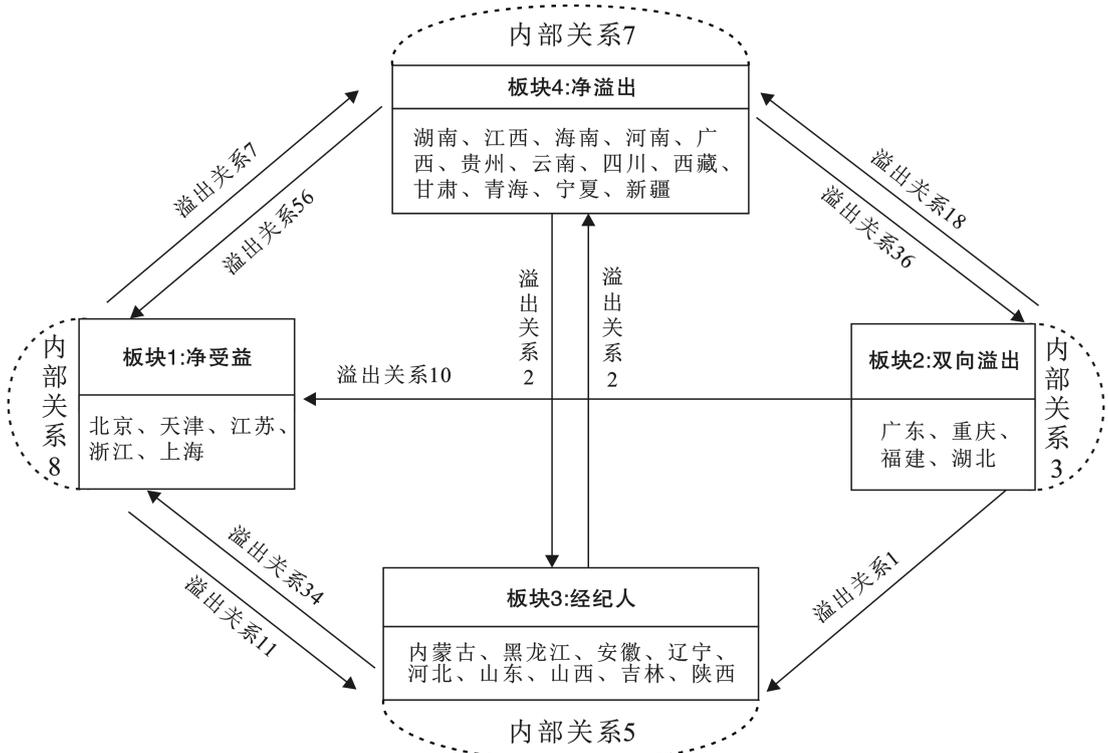


图 4 中国水贫困板块间的相关关系

Fig.4 Correlations between water poverty panels of China

从表 6 和图 4 可以看出,第 4 板块净溢出板块,与第 1,2,3 板块都存在着关联关系,此板块省份主要分布在西部地区,资源型缺水与工程型缺水并存,然而,得益于西部大开发战略的深入推进,该板块向其他板块的溢出通道多样且丰富,为地区发展带来了更多可能性;第 2 板块(双向溢出板块)就主要接收来自第 4 板块(净溢出板块)的水贫困程度溢出,还向其他各个板块进行传递。第 1 板块(净受益板块)不仅存在内部指向关系,与其余 3 个板块均有关联关系,主要吸收来自第 4 板块(净溢出板块)和第 3 板块(经纪人板块)的溢出关系,究其原因,是京津地区和江浙沪地区经济发展水平高,水资源承载能力难以支撑经济高质量发展,亟须跨区域跨流域布局水资源配置,导致对其他省份的水资源依存度比较高,接收来自其他省份水贫困程度的影响通道就比较多。

2.2.4 核心边缘密度分析 利用 Ucinet6 对水贫困指数二值矩阵进行核心边缘密度分析,将核心度 0.2 以上的省(市)记为核心地区,低于 0.1 的省(市)记为边缘地区,在 0.1~0.2 之间的省(市)记为半边缘地区。按照以上划分标准,31 个省(市)在 2010,2013,2016,2019 和 2021 年的核心、边缘和半边缘地区的数目如表 7 所示,可以看出各年度核心、半边缘和边缘(地区)的数目并不一致。在 2010—2021 年,核心地区的数目频繁波动,边缘地区数目则先增加后减少。

表 7 中国水贫困代表年份核心、边缘和半边缘地区的数目
Table 7 Number of core, marginal and semi-marginal areas in representative years of water poverty in China

项目	地区数目/个				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	2021 年
核心	7	11	9	11	9
半核心	19	9	10	6	11
边缘	5	11	12	14	11

3 结论

文章基于 2010—2021 年中国 31 个省(市)面板数据,不仅对各个省(市)的水贫困程度进行评估,还利用修正的引力模型构建省域水贫困空间关联网络,并进行社会网络分析,最终得到如下结论:

(1) 中国水贫困地区差异明显,呈现出显著的空间非均衡特征。从整体上看,考察期内各个省份的水贫困指数都处于上升趋势。

(2) 中国省域水贫困网络整体呈现出显著的空间关联性和复杂的结构形态,所有地区都关联其中,但这种关联性的紧密程度不高,仍然有很大的优化空间。个体特征表明,东部地区以接收效应为主,而中西部地区以溢出效应为主。

4 讨论

首先,全面认识水贫困指数的空间关联关系和网

络结构特征。省级水贫困指数存在较强的空间关联性,但其紧密程度不高,所以我们应积极探寻能够促进空间关联性的有效路径,增加互联互通的关联关系数目,提高其紧密程度,为缓解水贫困跨区域协同发展创造更多的可能。其次,制定并推行区域差异化的政策和策略,以协同促发展。在水贫困空间关联网中,任何省份都无法孤立发展,因此必须秉持协同发展的理念,促进边缘地区和半边地区的水贫困指数的提升,增强网络的韧性和适应力,实现共同繁荣和可持续发展。最后,充分发挥政府和市场作用,有效改善水贫困窘境,提升水安全保障。政府作为“有形的手”,应积极有效落实相关政策文件,建立健全节水制度政策,为水安全保障提供制度保障和政策支持。此外,市场机制作为“看不见的手”能够发挥的作用也不容小觑,我们应充分发挥市场机制在水资源配置中的决定性作用^[27]。

该研究成功地将空间关联网分析方法应用到了水贫困领域,不仅拓宽了空间网络分析的应用范畴,也为水贫困问题的研究提供了新的视角和工具。然而,研究也存在不足之处,主要在于未能深入分析水贫困的影响因素,削弱了研究的深度和广度。但是随着空间网络分析方法的不断完善和发展,以及水贫困问题日益受到重视,相信这一研究领域将会取得更多的突破和进展,为解决全球水资源短缺和水贫困问题提供更加有力的支持。

参考文献(References)

- [1] Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches [J]. *Natural Resources Forum*, 1989,13(4):258-267.
- [2] Sullivan C. Calculating a water poverty index [J]. *World Development*, 2002,30(7):1195-1210.
- [3] Kini J. Inclusive water poverty index: A holistic approach for helping local water and sanitation services planning [J]. *Water Policy*, 2017,19(4):758-772.
- [4] Pérez-Foguet A, Giné Garriga R. Analyzing water poverty in basins [J]. *Water Resources Management*, 2011,25(14):3595-3612.
- [5] Wilk J, Jonsson A C. From water poverty to water prosperity: A more participatory approach to studying local water resources management [J]. *Water Resources Management*, 2013,27(3):695-713.
- [6] Juran Luke, MacDonald M C, Basu N, et al. Development and application of a multi-scalar, participant-driven water poverty index in post-tsunami India [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2017, 33:955-975.
- [7] Yuan Liang, Yang Dongquan, Wu Xia, et al. Development of multidimensional water poverty in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,325:116608.
- [8] Kallio M, Guillaume J H A, Kumm M, et al. Spatial variation in seasonal water poverty index for Laos: An application of geographically weighted principal component analysis [J]. *Social Indicators Research*, 2018,140(3):1131-1157.
- [9] Korc M E, Ford P B. Application of the Water Poverty Index in border colonias of West Texas [J]. *Water Policy*, 2013,15(1):79-97.
- [10] 杨玉蓉,张青山,邹君.基于村级尺度的湖南农村水贫困比较研究[J].*长江流域资源与环境*,2014,23(7):1027-1034.
Yang Yurong, Zhang Qingshan, Zou Jun. A comparative study of Hunan rural water poverty based on village scale [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014,23(7):1027-1034.
- [11] Manandhar S, Pandey V P, Kazama F. Application of water poverty index (WPI) in Nepalese context: A case study of Kali Gandaki River basin (KGRB) [J]. *Water Resources Management*, 2012,26(1):89-107.
- [12] Thakur J K, Neupane M, Mohanan A A. Water poverty in upper Bagmati River basin in Nepal [J]. *Water Science*, 2017,31(1):93-108.
- [13] 邵薇薇,杨大文.水贫乏指数的概念及其在中国主要流域的初步应用[J].*水利学报*,2007,38(7):866-872.
Shao Weiwei, Yang Dawen. Water poverty index and its application to main river basins in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,38(7):866-872.
- [14] 曹茜,刘锐.基于 WPI 模型的赣江流域水资源贫困评价[J].*资源科学*,2012,34(7):1306-1311.
Cao Qian, Liu Rui. Assessment of water poverty in Ganjiang Basin based on WPI model [J]. *Resources Science*, 2012,34(7):1306-1311.
- [15] 陈莉,石培基,魏伟,等.干旱区内陆河流域水贫困时空分异研究:以石羊河为例[J].*资源科学*,2013,35(7):1373-1379.
Chen Li, Shi Peiji, Wei Wei, et al. Water poverty temporal-spatial differentiation in the Shi Yang River basin [J]. *Resources Science*, 2013,35(7):1373-1379.
- [16] 王克龙.大凌河流域水贫困时空分异特征及影响因素分析[J].*黑龙江水利科技*,2023,51(8):70-74.
Wang Kelong. Spatial and temporal differentiation of water poverty and its influencing factors in Daling River Basin [J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2023,51(8):70-74.
- [17] Wurtz M, Angeliame A, Herrera M T A, et al. A

- spatial application of the water poverty index (WPI) in the state of Chihuahua, Mexico [J]. *Water Policy*, 2019, 21(1):147-161.
- [18] 冉启智,廖和平.西南地区水贫困测度和空间格局分析:以重庆市为例[J].*中国农业资源与区划*, 2021, 42(11): 109-120.
Ran Qizhi, Liao Heping. Measurement and spatial pattern analysis of water poverty in South West China: A case study of Chongqing Municipality [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(11):109-120.
- [19] 孙才志,吴永杰,刘文新.基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J].*水资源保护*, 2017, 33(4):1-8.
Sun Caizhi, Wu Yongjie, Liu Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(4):1-8.
- [20] 孙才志,王雪妮.基于 WPI-ESDA 模型的中国水贫困评价及空间关联格局分析[J].*资源科学*, 2011, 33(6): 1072-1082.
Sun Caizhi, Wang Xueni. Research on the assessment and spatial correlation pattern of water poverty in China based on WPI-ESDA model [J]. *Resources Science*, 2011, 33(6):1072-1082.
- [21] 苟凯歌,蒋辉,刘兆阳.2000—2017 年中国农村水资源贫困与经济贫困的耦合协调状态及其影响因素[J].*水土保持通报*, 2021, 41(5):255-263.
Gou Kaige, Jiang Hui, Liu Zhaoyang. Coupling coordination and influencing factors of rural water resource poverty and economic poverty in China during 2000—2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5):255-263.
- [22] 王淑贺,王利军.黄河流域水贫困与经济高质量发展的耦合协调关系[J].*水土保持通报*, 2022, 42(3):199-207.
Wang Shuhe, Wang Lijun. Coupling and coordination between water poverty and high-quality economic development in Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):199-207.
- [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[J].*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 [J]. *China Industrial Economics*, 2015(5):83-95.
- [24] 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[J].*资源科学*, 2018, 40(4):759-772.
Huang Jie. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China [J]. *Resources Science*, 2018, 40(4):759-772.
- [25] 孙才志,马奇飞.中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J].*地理研究*, 2020, 39(1):53-63.
Sun Caizhi, Ma Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1):53-63.
- [26] 刘军.整体网分析:UCINET 软件实用指南[M].3 版.上海:格致出版社,2019.
Liu Jun. Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET [M]. 3rd. Shanghai: Gezhi Publishing House, 2019.
- [27] 戴向前,周飞,杨彦明,等.关于水利领域发挥市场机制作用的思考[J].*水利发展研究*, 2023, 23(7):3-6.
Dai Xiangqian, Zhou Fei, Yang Yanming, et al. Thoughts on the role of market mechanism in the field of water conservancy [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(7):3-6.
- [28] 白淑英,王莉,史建桥.长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应[J].*中国农业气象*, 2012, 33(4):579-586.
Bai Shuying, Wang Li, Shi Jianqiao. Time lag effect of NDVI response to climatic change in Yangtze River basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4):579-586.
- [29] 张顾萍.近 20 年横断山区植被覆盖时空变化及驱动力研究[D].成都:成都理工大学,2021.
Zhang Guping. Spatial-temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hengduan Mountains in past 20 years [D/OL]. Chengdu, Sichua; Chengdu University of Technology, 2021.
- [30] 徐勇,卢云贵,戴强玉,等.气候变化和土地利用变化对长江中下游地区植被 NPP 变化相对贡献分析[J].*中国环境科学*, 2023, 43(9):4988-5000.
Xu Yong, Lu Yungui, Dai Qiangyu, et al. Assessment of the relative contribution of climate change and land use change on net primary productivity variation in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9):4988-5000.

(上接第 192 页)