

# 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网及形成机制

张明斗, 翁爱华

(东北财经大学经济学院, 大连 116025)

**摘要:** 探讨城市水资源利用效率空间关联网特征及其形成机制可为实现区域用水效率协同提升提供新的政策视角。本文以长江经济带107个地级及以上城市为研究样本, 首先, 利用随机前沿分析法(SFA)测算出其2009—2018年水资源利用效率, 并基于此构建其空间关联矩阵, 继而采用社会网络分析法考察城市水资源利用效率空间关联网的整体结构、个体结构及其空间聚类方式, 最后采用二次指派程序法探讨网络形成机制。结果表明: ①城市水资源利用效率整体仍处于较低水平, 但研究期内提升显著, 空间关联网格局显现, 且整体网络可达性较强, 几乎不存在非对称性可达的联系对, 仍存在关联不紧密、网络结构稳定性欠佳等问题; ②上中下游地区的中心城市发挥着中心行动者、中介沟通者的重要作用, 呈现“中心城市—非中心城市”的“核心—边缘”空间分布特征; ③城市水资源利用效率空间关联板块可划分为净溢出、主受益和双向溢出板块, 各板块成员组成符合长三角城市群、长江中游城市群、成渝城市群的分布特征; ④城市间地理邻近性差异、经济发展水平差异、对外开放程度差异等自然地理条件和社会经济因素对城市水资源利用效率关联网的形成具有显著影响。

**关键词:** 城市水资源利用效率; 空间关联网; 形成机制; 社会网络分析

DOI: 10.11821/dlxb202209015

## 1 引言

流域水生态系统孕育了多彩、繁茂的经济发展带, 紧密的流域经济网络又为跨界水资源利用效率协同提升奠定媒介基础。2009—2019年长江区域水资源总量稳居10个水资源一级分区之首, 到2019年, 长江区域水资源总量更是达到10549.7亿 $m^3$ , 占全国水资源总量的36.33%<sup>[1]</sup>。这为长江流域沿线城市加速城镇化进程、实现经济高质量发展提供了重要资源保障, 但是, 伴随着城市边界扩张及人口大量涌入, 流域水资源总量有限而用水需求日益增长的发展瓶颈横亘眼前<sup>[2-3]</sup>。此外, 跨界水资源污染事故、高密度城镇化聚集趋势也在频繁挑战流域生态环境和用水承载能力极限<sup>[4]</sup>。因此, 在最严格水资源管理制度背景下, 长江流域沿线城市极力推进省、市、县3级行政区域的用水总量控制指标体系建设, 以期借助“用水天花板”倒逼城市水资源利用效率提升。而用水效率提升又会通过要素流动、市场驱动和政府干预等机制在各用水主体之间形成复杂的空间网络结

收稿日期: 2021-10-13; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804021); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2007123); 辽宁省经济社会发展研究项目(2022lsllybkt-004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.71804021; Young Top Talent Foundation of "Rejuvenating Liaoning Talents Program" in Liaoning Province, No.XLYC2007123; Economic and Social Development Research Foundation of Liaoning Province, No.2022lsllybkt-004]

作者简介: 张明斗(1983-), 男, 山东济宁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为城市经济。

E-mail: zhangmingdou537@126.com

构<sup>[5]</sup>。伴随顶层设计的逐步落实,流域城市水资源利用效率提升也愈发呈现出牵一发而动全身的发展格局。习近平总书记在第三次长江经济带发展座谈会上指出,要加强协同联动,推动上中下游地区的互动协作,增强各项举措的关联性和耦合性。有鉴于此,本文从全域城市水资源利用效率提升的角度出发,拟探究以下关键问题:长江经济带城市水资源利用效率处于何种水平?呈现何种趋势?又存在怎样的空间关联性?影响其空间关联网络形成的因素是什么?回答上述问题可为协同推进长江经济带城市水资源利用效率提升、完善跨界水生态治理体系提供政策参考。

城市水资源利用效率相关研究的发展进程显现为:由效率值测度及其影响因素分析向其空间流动和交互关系方面的进一步拓展和延伸。目前,国内外关于水资源利用效率测度的方法已日趋成熟,而对其空间交互关系方面仍存在较大研究空间,已有研究多采用空间计量方法探究城市水资源利用效率的空间溢出效应,如Franczyk等<sup>[6]</sup>利用空间误差模型对俄勒冈州的36个县进行分析发现,水资源利用存在空间自相关。Sohn<sup>[7]</sup>对美国东南部城市的实证研究发现,城市用水呈现空间自相关,重度用水城市呈现空间聚集特征且不存在价格效应。赵良仕等<sup>[8]</sup>采用空间Durbin模型实证检验了中国城市水资源利用效率存在显著的省际空间溢出效应。张国基等<sup>[9]</sup>利用Moran's *I*指数也得到相似的结论;此外,该研究还通过脉冲响应函数发现,中部地区的水资源利用效率提升对其他地区具有良好的带动作用。然而,从“属性角度”出发的传统空间计量工具仅能反映空间聚集方式和特征,在刻画区域整体联动结构和个体微观联系方面仍存在局限性,受到社会网络分析方法的启发,学界开始关注采取合适的方法获取水资源利用效率的“关系数据”以准确刻画其空间关联关系。如秦滕等<sup>[10]</sup>基于安徽省16个城市的用水数据,实证发现区域用水网络结构等级森严,个体网络呈现出明显的“极化效应”和“马太效应”。孙才志等<sup>[11]</sup>利用VAR格兰杰因果分析法构建省际水资源利用效率空间关联矩阵,并实证考察了其整体结构和个体网络特征。秦滕等<sup>[5]</sup>在此基础上,实证检验了城市水资源利用效率空间关联网络的演化因素,发现经济发展水平、信息化水平等因素与省际水资源利用效率空间关联网络呈现出显著的相关关系。颜子明等<sup>[12]</sup>、翟晨阳等<sup>[13]</sup>分别依据水事件强度和国家级水条约数量来构建全球跨境水资源合作关联网络,尽管二者获取关系数据的手段不同,但还是同样发现跨界水合作网络存在区域性与全球性并存的重要特征。而国外直接对水资源利用效率空间关联网络的研究较少,更多见长于运用社会网络分析方法考察虚拟水贸易的空间关联网络<sup>[14-15]</sup>。

上述研究表明,用水主体的交流互动可为区域水资源利用效率提升提供空间传导路径,城市水资源利用效率空间关联网络研究具有重要现实意义。但梳理相关文献发现仍存在以下不足:①已有研究多采用数据包络法(DEA)对水资源利用效率进行测度,且研究区域多集中在省域或国家层面,鲜有地级及以上城市,尤其是与用水、治水联系最为紧密的流域沿线城市的相关研究,而以大尺度区域为研究对象难以深入挖掘区域内部城市水资源利用效率的分布状况和互动模式。②已有研究多采用VAR格兰杰因果分析法测算城市间水资源利用效率的联系,但是VAR模型对序列平稳性、滞后阶数的选择等条件较为苛刻,难以精确反映城市间水资源利用效率的空间关联性。③已有研究更关注水资源利用效率空间关联网络整体结构和个体网络特征,较少注意到网络结构的形成诱因及机制。基于以上考虑,本文选取长江经济带107个地级及以上城市,采用SFA参数估计法对其水资源利用效率进行测度,并结合水资源利用效率的概念内涵对引力模型进行修正以刻画各城市水资源利用效率的关联程度,继而运用社会网络分析法,系统性分析整体网络关联结构及个体网络特征,深度探寻其形成机制,旨在为解决区域水资源问题提供合理依据,促进水资源的合理利用,进而实现区域的可持续发展。

## 2 水资源利用效率的空间关联及网络化形成机制

水资源利用效率作为单位水资源利用的产出与投入效益之比,已成为衡量用水合理程度的重要标准。在水资源利用的过程中,本城市水资源利用效率提高会对其他城市水资源利用产生一定的影响,也就是说水资源利用效率存在空间溢出效应<sup>[8]</sup>。基于此,各城市水资源利用效率相互影响,事实上构成了区域内部各城市之间水资源利用效率的空间传导路径,表现为各城市节点与节点之间的链路;并且,伴随着各城市用水投入产出过程的联系愈发频繁和深入,区域内部各节点之间的链路逐渐演化出庞杂的水资源利用效率空间关联网络。毫无疑问,在最初的取水阶段,由于水资源具有流动的自然属性,各城市之间便存在着水资源利用的天然联系和空间传导路径。此外,水资源不仅是一项关系国计民生的自然资源、战略资源,还是一项重要的经济资源<sup>[16]</sup>,所以,用水投入要素流动及市场机制也成为驱动水资源利用效率空间关联网络形成的关键因素。但是,由于市场失灵的天然掣肘,取水、用水、排水等水资源利用的全过程中仍存在公共产品的外部性等问题亟需政府干预和协调,以弥补市场这只看不见的手;同时,跨区域流域水资源利用规划与政策的不断落实也在进一步助推各城市水资源利用效率的空间传导。

首先,临近城市、毗邻城市之间的水资源利用效率存在天然的地理联系。因为人类对于水资源的利用主要是通过从河流、湖泊、水库中的取水来实现,而江河湖海具有天然流动的自然属性,这意味着一定的距离范围内各城市在水利设施建设、水源涵养与保护制度建设、污水治理等方面存在固有、紧密的交流与联系。并且,越是毗邻城市,其用水联系越发紧密,也正是这层基础、天然联系构成水资源利用效率空间关联网络的重要传导路径。

其次,用水投入要素的跨区域流动可以突破物理距离限制,带动各用水主体之间的用水交流与互动,从而在各城市之间实现范围更广、内涵更加丰富的区域水资源利用效率联系。水资源利用通常涉及农业、工业和家庭用水3个场景,尤以生产用水为主,但无论是哪个领域用水,其关键在于提高用水的产出投入比,也即提高水资源利用效率。因此,为有效提升本地区水资源利用效率,各用水主体更关注于追求用水投入结构的合理化,但是,不同城市之间因其水利基础设施、市政用水管道建设与维护、工业用水与节水、污水治理等各个环节的要素禀赋不一,存在比较优势的城市往往会不断对外输出要素,对薄弱地区进行补充,从而在要素跨区域对流、传导与辐射的过程中实现城市水资源利用效率交流,进而表现为区域水资源利用效率网络中各个城市节点用水影响力的输出与接收。

再次,水资源的经济属性意味着各城市的用水行为仍需遵循市场机制,市场结构的逐步完善正日渐释放优势地区水资源利用潜力,并不断加强区域水资源利用效率的空间联系。这是因为,在市场机制发挥作用的过程中,价格信号不断引导着区域内各城市实现水资源信息、资金、技术等要素配置最优化,部分试点地区甚至将水权视作具有价格属性的资源,以促成水资源本身的跨区域分配。因此,在价格信号的驱使下,那些用水效率较低的城市将其闲置的水资源要素转让出售给用水边际效益更高的城市,从而提高了区域整体的水资源利用效率。随着市场化改革的纵深推进,由要素资源配置最优化引致的城市水资源利用联系不断突破空间距离限制,区域内各城市之间的用水关联逐步演变为整体关联网络。

最后,政府干预也是水资源利用效率空间关联网络形成的重要机制,适时的政府干预旨在弥补市场失灵、解决水资源公共产品的外部性等问题,在这过程中,政府不断提

高用水科技创新水平, 加强科技投入力度, 整合、协调区域水资源投入要素, 维护区域用水平等与发展平等, 继而促成区域用水交流互补的良好局面。例如, 以政府力量推动建设水资源规划制度、用水总量与效率“双控”制度、取水许可证制度等, 构建“自上而下, 自下而上, 上下沟通”的用水协调途径。伴随着顶层政策规划的落地实施, 由政府牵引的资金、技术、人才、信息等关键用水投入要素不可避免地在各地区进行流通和交换, 以促成区域内各城市水资源利用效率优势互补的良好发展格局, 最终形成由众多城市相连接的水资源利用效率空间关联网。

### 3 研究方法 with 数据说明

#### 3.1 城市水资源利用效率测度方法

对于水资源利用效率测度, 国内外已有研究主要采用参数方法和非参数方法, 尤以非参数法, 即DEA为代表<sup>[17]</sup>, 因为非参数法无需估计生产函数、考虑量纲的统一与指标权重, 具有较强的客观性和可比较性。并且, 在此基础上, 许多学者考虑污水排放、废水中化学需氧量和氨氮含量等非期望产出, 将DEA模型进一步改进为DEA模型<sup>[18-20]</sup>、两阶段SBM模型<sup>[21]</sup>等以准确全面地评价水资源利用效率。但囿于市级层面COD和氨氮等主要污染物排放数据获取的局限性, 目前, 采用非参数方法对水资源利用效率进行测度的研究多集中在省域层面。虽然也有研究涉及市级与县域层面<sup>[22-23]</sup>, 但采用非参数估计方法对流域沿线城市, 如黄河流域及长江经济带沿线地级及以上城市的水资源利用效率测度研究较少。此外, 与非参数DEA方法相比, 随机前沿模型的最大优势是考虑了随机因素对于产出的影响, 并且其采用大样本面板数据对技术效率进行测度时可采用一定的计量方法检验所构建生产函数的准确性与可行性, 从而提高测度结果的信度与效度。因此, 本文借鉴相关研究<sup>[24-27]</sup>, 采用随机前沿模型(SFA)对城市水资源利用效率进行测度, 模型一般形式如式(1)所示:

$$Y_{it} = F(X_{it}, \alpha) \exp(V_{it} - U_{it}) \quad (1)$$

式中:  $i$ 表示地区;  $t$ 表示年份 ( $t = 1, 2, \dots, T; T = 10$ );  $X_{it}$ 和 $Y_{it}$ 分别表示用水投入、产出向量;  $F(x)$ 表示随机前沿生产函数;  $\alpha$ 是待估计参数向量;  $V_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$ , 且与 $U_{it}$ 独立, 表示人为不可控的自然因素的影响;  $U_{it} \sim N(m_{it}, \sigma_{\mu}^2)$ , 为技术无效程度, 假定其服从截断正态分布。当 $U_{it} = 0$ 时, 表示水资源利用效率已达到生产前沿面, 处于完全有效状态, 因此,  $U_{it}$ 越大, 表明其越发偏离完全有效状态, 水资源利用效率越低。此外, 计算方差参数 $\gamma = \sigma_{\mu}^2 / (\sigma_{\mu}^2 + \sigma_v^2)$ 以验证模型的准确性,  $\gamma$ 介于 $[0, 1]$ 之间,  $\gamma$ 趋于1时, 表明实际产出与前沿产出之间的差距主要是生产无效率带来的, 此时采用SFA模型对生产函数的测算合理。基于此, 建立基于柯布—道格拉斯生产函数的随机前沿分析模型, 用以描述水资源利用效率, 如式(2)所示:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln K_{it} + \beta_2 \ln L_{it} + \beta_3 \ln W_{it} + v_{it} - \mu_{it} \quad (2)$$

式中:  $W_{it}$ 、 $K_{it}$ 、 $L_{it}$ 为投入向量;  $W_{it}$ 为城市用水总量 (亿 $\text{m}^3$ );  $K_{it}$ 为固定资本存量 (亿元);  $L_{it}$ 为水利、环境和公共设施管理业就业人数 (万人);  $Y_{it}$ 为产出向量, 为各地区的GDP (亿元);  $v_{it}$ 、 $\mu_{it}$ 分别为随机误差项、无效率项。

基于式(1)和式(2), 可通过 $t$ 时期城市水资源利用实际产出的期望值与技术完全有效 ( $U_{it} = 0$ ) 条件下产出期望值之比计算得出 $t$ 时期城市 $i$ 水资源利用效率 ( $WE_{it}$ ), 具体如式(3)所示:

$$WE_{it} = \frac{E(Y_{it}|U_{it}, X_{it})}{E(Y_{it}|U_{it} = 0, X_{it})} = \exp(-U_{it}) \quad (3)$$

### 3.2 城市水资源利用效率空间关联关系测度:修正引力模型

引力模型的思想取自物理学中的“万有引力”定律,其认为两个评价客体之间的引力和联系取决于它们的质量和距离,只要找到相应的变量用以表征城市水资源利用效率的“质量”及其空间距离,便可对模型进行修正,从而更加准确地刻画其空间关联程度。此外,由于传统引力模型不存在方向性,只能反映联系强度的大小,因此,借鉴相关研究<sup>[28]</sup>,以某城市水资源利用效率值占两个关联城市水资源利用效率值之和的比重来修正引力系数K,从而得以识别特定的水资源利用效率提升的空间传导路径,构建的修正引力模型具体如式(4)所示:

$$R_{ij} = K_{ij} \frac{\sqrt{G_i WE_i} \sqrt{G_j WE_j}}{(DIS_{ij})^2}, K_{ij} = \frac{WE_i}{WE_i + WE_j} \quad (4)$$

式中: $R_{ij}$ 表示城市*i*在水资源利用效率提升方面对城市*j*的影响力; $WE$ 表示水资源利用效率; $G$ 表示建成区供水管道密度,反映了城市合理分配和有效利用水资源的程度; $G$ 和 $WE$ 的乘积用以体现城市水资源利用效率的“质量”; $DIS_{ij}$ 表示城市*i*与城市*j*之间的几何中心距离。由公式(4)得出各城市水资源利用效率引力矩阵 $R_{ij}$ 。为确定各城市是否存在用水关联,将初始引力矩阵 $R_{ij}$ 转化为二值矩阵 $B$ ,其中 $B$ 中的元素 $b_{ij}$ 满足式(5)条件:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & R_{ij} > t^* \\ 0, & R_{ij} \leq t^* \end{cases} \quad (5)$$

运用二值矩阵进行社会网络分析时,关键在于选取合适的阈值,参照相关研究<sup>[29]</sup>,本文取阈值 $t^* = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij}$ ,当 $R_{ij} > t^*$ 时,意指城市*i*对城市*j*在水资源利用效率提升方面的影响力要高于所有城市之间影响力的均值,此时 $b_{ij} = 1$ ,表示在水资源利用效率提升方面,城市*i*对城市*j*存在单向关联关系,而当 $b_{ij} = 0$ 时,则表示城市*i*对城市*j*不存在单向关联关系。

### 3.3 城市水资源利用效率空间关联网络特征分析:社会网络分析法

社会网络通过一系列节点以及节点之间的连线形成关系,并由此构建整个关联网络;而社会网络分析法正是借助网络关联模型将定性结构属性数据矩阵化,以便分析节点之间长期的关联与互动发展模式<sup>[30]</sup>。伴随社会网络分析方法的发展,其已被广泛运用于数学、空间地理学、社会学、心理学等多个不同学科领域。因此,本文采用社会网络分析法,基于公式(5)获取的水资源利用效率0-1关系矩阵,从整体网络特征、个体网络特征与块模型三方面探究长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络特征。

**3.3.1 整体网络结构特征** 本文选用网络密度、网络关联度、网络效率、网络等级度等指标刻画长江经济带城市水资源利用效率的整体网络特征<sup>[31]</sup>。其中,网络密度,顾名思义,就是用以反映各城市水资源利用效率联系紧密程度的测度指标,它等于实际存在的关系系数与理论最大连接关系系数的比重;网络关联度为任意两个城市节点可以实现直接或间接联系的程度,表征城市水资源利用效率整体网络结构的稳定性和脆弱性;网络效率可以反映各用水主体进行交流互动实现水资源利用效率提升过程中存在多大程度的冗余联系;网络等级度衡量水资源利用效率网络中非对称性可达的程度,网络等级度越高表示网络成员间的等级秩序越分明。

**3.3.2 个体网络结构特征** 借鉴相关研究<sup>[32-33]</sup>, 本文采用度数中心度、中介中心度、接近中心度等指标用以反映各节点的地位和作用。其中, 度数中心度分为外向度数中心度、内向度数中心度, 可以测算某个体在网络中与其他个体进行直接连接的路径数量, 从而反映其在网络中的重要程度, 度数中心度越高说明该成员在整体网络中愈发充当中心行动者的角色而不受其他成员的约束, 拥有较大权力与话语权。中介中心度刻画了用水主体在区域水资源利用效率关联网络中发挥的中介作用, 若某用水主体处于任意两个个体之间的最短连接路径上, 则表示该用水主体起到中介传导作用, 且出现次数越多, 中介作用越显著; 接近中心度用以刻画某成员与其他所有成员的最短路径距离, 表征该成员与所有其他成员实现快速交流的能力与协同的紧密程度。上述整体网络结构与个体网络结构的相关测度指标计算公式参见表1。

表1 城市水资源利用效率空间关联网络特征分析的主要指标测算与说明

Tab. 1 Calculation and explanation of main indicators of spatial correlation network characteristic analysis of urban water utilization efficiency

指标	计算公式	公式说明
整体网络		
网络密度	$D = M / N(N-1)$ (6)	$M$ 代表网络中实际拥有的关系数目; $N$ 代表节点城市总数(后面指标中 $N$ 的含义均为此)
网络关联度	$C = 1 - V / [N(N-1)/2]$ (7)	$V$ 代表网络中不可建立联系的节点城市数
网络等级度	$H = 1 - T / \max(T)$ (8)	$T$ 表示网络中对称可达的节点城市数
网络效率	$G = 1 - E / \max(E)$ (9)	$E$ 表示网络中多余线的总数
个体网络		
度数中心度	$RD_i = \sum_{j \in N} x_{ij} / (N-1)$ (10)	若城市 $i$ 与 $j$ 之间存在空间关联, 则记 $x_{ij}=1$ , 反之则为0
接近中心度	$CC_i = (N-1) / \sum_{j=1}^N d_{ij}$ (11)	$d_{ij}$ 为两节点城市间最短路径的距离
中介中心度	$RB_i = \frac{2}{N^2 - 3N + 2} \sum_{j \in N, k \in N} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$ (12)	$g_{jk}(i)$ 为城市 $j, k$ 之间经过城市 $i$ 的最短路径数量; $g_{jk}$ 为城市 $j, k$ 间最短路径数量

**3.3.3 块模型分析** 块模型是用来分析城市水资源利用效率关联网络空间聚类特征的重要手段, 可识别网络中存在的“派系”并深入探讨其空间关联关系。“派系”是社会网络分析法的重要概念之一, 指的是至少包含3个节点的最大完备子集<sup>[34]</sup>。而问题在于, 应该采用何种方法才能找到这些结构对等的节点子集? 典型的例子是, 依据区位环境、要素资源禀赋等因素, 在长江流域内部设立长三角城市群、长江中游城市群、成渝城市群等“节点子集”, 从而针对不同区域, 因地制宜, 制定各城市群的发展政策以实现高质量发展。然而, 如此划分并不意味着这些板块内部存在水资源利用效率的空间聚类现象。例如, 在水资源利用效率提升方面, 长三角城市群、长江中游城市群是否存在“抱团取暖现象”? 上游地区又是否因其区位优势不显著而成为被“孤立”的团体。因此, 本文通过块模型分析, 采用CONCOR迭代相关收敛法, 以不同的方法和视角对城市水资源利用效率整体网络的不同板块进行划分, 并分析板块内部及板块间的交互关系, 进而揭示网络子群的宏观图式。参考相关研究<sup>[35]</sup>, 本文拟将各板块划分为净受益、净溢出、双向溢出与经纪人四种角色类型。

### 3.4 研究对象与研究数据

本文以长江经济带地级及以上城市为节点, 样本数据时间跨度为2009—2018年, 由于行政体制变化, 剔除2006—2016年期间撤并或者新增的巢湖、毕节、铜仁、普洱, 并对数据口径进行一致性处理, 最终获得长江经济带107个地级及以上城市作为研究样本

(图1)。此外,本文水资源利用效率测算和引力模型部分所涉及的固定资产投资、国民生产总值、产业结构等社会经济数据均来源于2010—2019年《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》以及各省市相应年份的国民经济与社会发展统计公报。相关经济数据均按照价格指数转换为2009年不变价格,对资本存量的计算和处理方法参见文献[36-37],各城市空间距离采用其几何中心的直线距离,由ArcGIS 10.2平台运算获得。

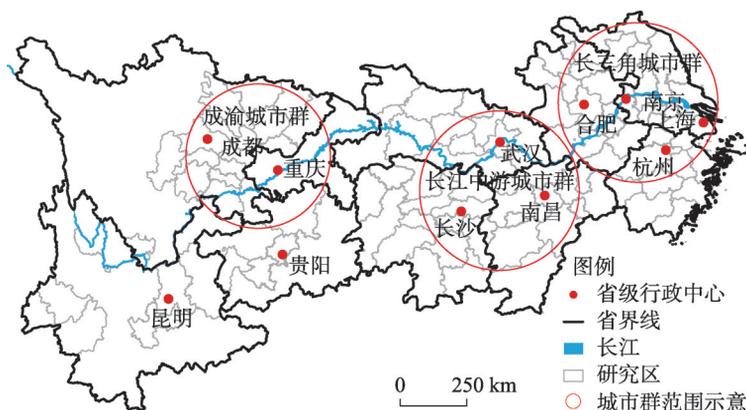


图1 长江经济带

Fig. 1 Yangtze River Economic Belt

## 4 长江经济带水资源利用效率的空间关联网分析

### 4.1 水资源利用效率测度结果分析

本文运用Frontier4.1程序,依据随机前沿生产函数(3)对长江经济带城市水资源利用效率进行计算,参数估计结果如表2所示,其中,变差率 $\gamma = 0.8839$ ,并且在1%的水平下显著,说明该模型的拟合程度较高,运用该模型对长江经济带城市水资源利用效率测度较为合理。

囿于篇幅限制,本文仅汇报2009年、2012年、2015年、2018年的效率值,结果见表3。总体来看,长江经济带107个地级及以上城市水资源利用效率呈现逐年递增的发展

表2 随机前沿分析参数估计结果

Tab. 2 Parameter estimation results of stochastic frontier analysis

估计变量	极大似然估计		普通最小二乘估计	
	系数值	$t$ 统计量	系数值	$t$ 统计量
截距项	0.9478***	4.8704	1.4348***	15.7502
$\ln K_{it}$	0.4279***	28.5940	0.6094***	39.7012
$\ln L_{it}$	0.1127***	9.0604	0.1535***	9.6623
$\ln W_{it}$	0.2715***	15.8888	0.2493***	18.0460
$\sigma^2$ 组合方差	0.0809***	8.2248	0.1664	
$\gamma$ 变差率	0.8839***	94.5326	0.9100	
对数似然函数		724.9501		-95.4548
似然比检验单侧值		1640.8010		

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%的显著性水平下通过 $t$ 检验。

表3 长江经济带城市水资源利用效率测度结果

Tab. 3 Measurement results of urban water efficiency of the Yangtze River Economic Belt

城市	2009年	2012年	2015年	2018年	城市	2009年	2012年	2015年	2018年
上海市	0.762	0.787	0.809	0.830	十堰市	0.379	0.425	0.470	0.513
南京市	0.507	0.549	0.589	0.627	宜昌市	0.613	0.649	0.683	0.714
无锡市	0.872	0.886	0.899	0.910	襄阳市	0.567	0.606	0.643	0.677
徐州市	0.592	0.629	0.665	0.697	鄂州市	0.314	0.360	0.405	0.451
常州市	0.628	0.663	0.696	0.726	荆门市	0.436	0.481	0.524	0.565
苏州市	0.982	0.984	0.986	0.987	孝感市	0.472	0.516	0.557	0.597
南通市	0.707	0.736	0.763	0.788	荆州市	0.391	0.437	0.481	0.524
连云港市	0.357	0.403	0.449	0.493	黄冈市	0.465	0.509	0.551	0.591
淮安市	0.369	0.415	0.461	0.505	咸宁市	0.401	0.446	0.491	0.534
盐城市	0.699	0.729	0.757	0.782	随州市	0.339	0.385	0.431	0.476
扬州市	0.642	0.676	0.708	0.737	长沙市	0.637	0.672	0.704	0.733
镇江市	0.560	0.599	0.636	0.671	株洲市	0.450	0.494	0.537	0.578
泰州市	0.748	0.774	0.798	0.819	湘潭市	0.416	0.461	0.505	0.547
宿迁市	0.471	0.515	0.557	0.596	衡阳市	0.523	0.564	0.603	0.640
杭州市	0.701	0.731	0.758	0.783	邵阳市	0.348	0.394	0.440	0.484
宁波市	0.739	0.765	0.790	0.812	岳阳市	0.572	0.611	0.647	0.681
温州市	0.773	0.797	0.818	0.838	常德市	0.740	0.767	0.791	0.813
嘉兴市	0.632	0.667	0.700	0.730	郴州市	0.489	0.532	0.573	0.611
湖州市	0.514	0.556	0.595	0.633	永州市	0.326	0.372	0.418	0.463
绍兴市	0.686	0.717	0.746	0.772	怀化市	0.454	0.498	0.541	0.581
金华市	0.863	0.878	0.892	0.904	娄底市	0.454	0.498	0.541	0.581
衢州市	0.417	0.462	0.506	0.548	重庆市	0.573	0.611	0.648	0.682
舟山市	0.377	0.423	0.468	0.512	成都市	0.504	0.546	0.586	0.624
台州市	0.598	0.635	0.670	0.702	自贡市	0.481	0.524	0.565	0.605
丽水市	0.486	0.529	0.570	0.609	攀枝花市	0.284	0.330	0.376	0.421
合肥市	0.432	0.477	0.520	0.562	泸州市	0.388	0.434	0.479	0.522
芜湖市	0.382	0.427	0.472	0.516	德阳市	0.395	0.440	0.485	0.528
蚌埠市	0.271	0.316	0.362	0.408	绵阳市	0.326	0.372	0.418	0.463
淮南市	0.266	0.311	0.356	0.402	广元市	0.167	0.206	0.248	0.292
马鞍山市	0.303	0.349	0.395	0.440	遂宁市	0.332	0.378	0.423	0.468
淮北市	0.332	0.378	0.423	0.469	内江市	0.577	0.616	0.652	0.686
铜陵市	0.303	0.348	0.394	0.440	乐山市	0.426	0.471	0.514	0.556
安庆市	0.372	0.418	0.463	0.507	南充市	0.365	0.411	0.456	0.500
黄山市	0.196	0.237	0.281	0.326	眉山市	0.383	0.428	0.473	0.517
滁州市	0.365	0.411	0.456	0.500	宜宾市	0.526	0.567	0.606	0.643
阜阳市	0.484	0.527	0.568	0.607	广安市	0.523	0.564	0.603	0.640
宿州市	0.446	0.491	0.533	0.574	达州市	0.410	0.455	0.499	0.542
六安市	0.330	0.376	0.422	0.467	雅安市	0.225	0.268	0.313	0.359
亳州市	0.438	0.482	0.526	0.567	巴中市	0.275	0.320	0.366	0.412
池州市	0.260	0.305	0.350	0.396	资阳市	0.542	0.583	0.621	0.657

续表3

城市	2009年	2012年	2015年	2018年	城市	2009年	2012年	2015年	2018年
宣城市	0.359	0.405	0.450	0.495	贵阳市	0.323	0.369	0.415	0.460
南昌市	0.379	0.425	0.470	0.514	六盘水市	0.522	0.563	0.603	0.640
景德镇市	0.276	0.321	0.367	0.413	遵义市	0.559	0.598	0.636	0.670
萍乡市	0.304	0.350	0.396	0.441	安顺市	0.374	0.419	0.464	0.508
九江市	0.434	0.479	0.522	0.563	昆明市	0.339	0.385	0.431	0.476
新余市	0.322	0.368	0.414	0.459	曲靖市	0.543	0.583	0.621	0.657
鹰潭市	0.393	0.438	0.483	0.526	玉溪市	0.722	0.750	0.776	0.799
赣州市	0.482	0.525	0.566	0.605	保山市	0.353	0.399	0.444	0.489
吉安市	0.399	0.444	0.489	0.532	昭通市	0.376	0.422	0.467	0.511
宜春市	0.506	0.548	0.588	0.626	丽江市	0.162	0.201	0.242	0.286
抚州市	0.328	0.374	0.420	0.465	临沧市	0.388	0.433	0.478	0.521
上饶市	0.483	0.526	0.567	0.606	上游地区	0.588	0.622	0.654	0.685
武汉市	0.509	0.551	0.591	0.629	中游地区	0.434	0.478	0.520	0.561
黄石市	0.360	0.406	0.451	0.495	下游地区	0.439	0.482	0.523	0.563
张家界市	0.299	0.345	0.390	0.436	总体	0.461	0.502	0.542	0.580
益阳市	0.463	0.506	0.549	0.589	均值				

态势,水资源利用效率提升显著。2018年城市水资源利用效率达到峰值,但整体水平仍然偏低,存在较大的提升空间,且存在区域发展不均衡现象。

从时间变化趋势来看,长江经济带城市水资源利用效率由2009年的0.461上升至2018年的0.580,年均增长幅度为2.58%,且历年均值逐步提升。这表明,由中央到地方,伴随《长江经济带发展规划纲要》等各领域规划政策体系的不断完善,在“共抓大保护、不搞大开发”的生态优先发展理念之下,长江流域沿线城市在推动实现新型城镇化及经济高质量发展的进程中能较好地兼顾城市水文生态体系的建设和维护,在水源涵养、水污染治理、技术性节水与用水等方面取得的重大成效。然而,城市水资源利用效率提升步伐缓慢、区域整体水资源利用效率仍然偏低,这反映了部分区域“先发展后治理”的陈旧观念仍未得到根除。例如,上游地区的嘉陵江流域,作为10余座城市的重要水源地,流域周边仍布局了大量采矿冶炼企业,这对整个长江流域的用水安全产生了极大威胁,而一旦水源地生态安全无法得到保障,水资源利用效率提升将是空中楼阁,难以为继。

从空间分布来看,本文采用自然断点分级法将研究期内城市水资源利用效率测度值分成4类(图2)。长江经济带上中下游地区城市水资源利用效率存在显著差异,研究期内,上中下游地区效率均值分别为0.502、0.498、0.638,下游地区最高,上游地区次之,中游地区最低,下游地区能够依托自身经济发展水平、产业结构、技术水平、社会用水节水观念等方面的优势率先实现水资源利用效率提升,如上海、无锡、苏州、杭州等城市,其水资源利用效率均值分别为0.797、0.892、0.985、0.744,长期居于流域沿线城市的首位。而中、上游城市水资源利用效率偏低,这是因为长江经济带中游地区是传统老工业基地,产业结构布局欠佳,受制于落后的发展观念,其水资源利用效率提升缓慢。如黄石、十堰、九江,其水资源利用效率均值分别为0.428、0.447、0.500,低于整体均值,且处于流域沿线城市的后部席位。这些城市布局了大量重能耗、高污染的资源型产业,且污水处理和工业技术较为落后,城市水资源利用效率提升步伐缓慢,因此,该地区未来应该逐步转移用水投入方向和力度,淘汰经济效益欠佳而需要大量生产用水

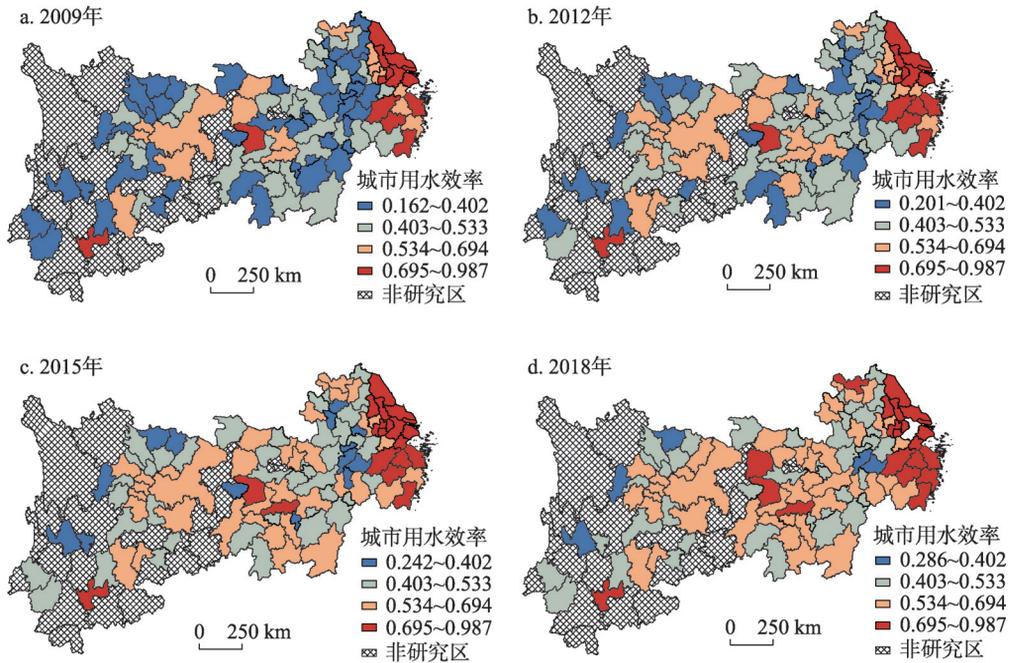


图2 长江经济带城市水资源利用效率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of urban water utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt

的高能耗企业。值得借鉴的是，传统老工业基地城市株洲，以产业结构转型升级为契机，推动新旧能源转换，培育壮大风电能源、生物医药等智能制造产业，从而一改过去因污染而成的“五颜六色”湖为清水明镜塘，其用水安全得到重要保障，水资源利用效率也从2009年的0.450提升至2018年的0.578，增长幅度为28.37%，提升效果显著。因此，应树立“一盘棋”的发展理念，注重提升区域水资源利用效率的空间关联度，依托东部沿海城市的高新技术水平和人才储备及其培养体系的优势，以点带面，推动中游城市群实现水资源利用效率协同提升的发展格局。

4.2 空间关联网络结构特征分析

为深入刻画城市水资源利用效率空间关联路径及其联系强度，本文利用ArcGIS 10.2绘制出2018年城市水资源利用效率双向空间关联网络图。如图3所示，图3a、3b分别为

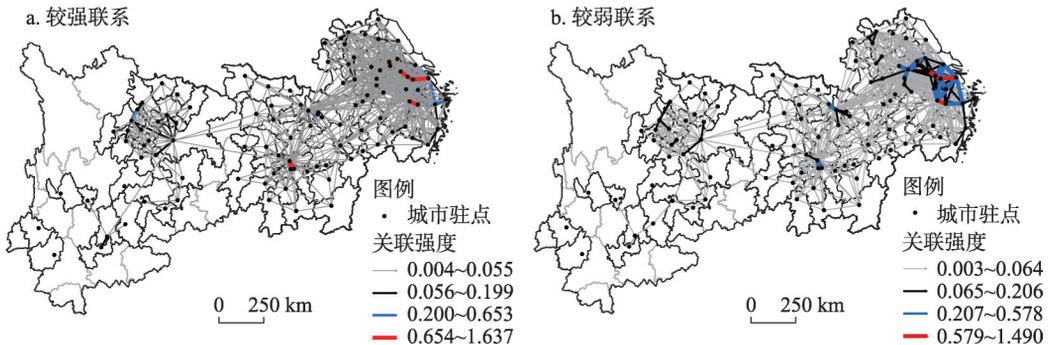


图3 长江经济带城市水资源利用效率双向空间关联网络

Fig. 3 Two way spatial correlation network of urban water utilization efficiency of the Yangtze River Economic Belt

每对城市水资源利用效率联系中较强联系和较弱联系的图示,箭头方向表示水资源利用效率联系方向。此外,为了达到更好的图示效果,参考相关研究<sup>[35]</sup>,依据适当比例,分别删去0.004以及0.003以下的联系对,并采用自然断点分级法对联系强度进行分类。由图3可知,长江经济带城市水资源利用效率呈现显著的网络结构特征,其空间关联强度和广度正日益提升,这意味着在协同提升区域用水效率过程中,不能再延续过去单打独斗、各自为营的局面,仍需在工业生产技艺、用水节水技术及社会观念等多方面搭建区域交流渠道,注重水资源利用效率提升的总体推进。此外,网络联系强度存在明显的空间分异特征,下游地区城市水资源利用效率空间关联网络较为紧密,且联系强度较大,而上、中游地区联系较弱,如保山、临沧、丽江等与其他城市的联系均小于0.004,说明这些城市与其他城市在提高水资源利用效率方面的关联度较低,几乎不参与水资源利用效率空间关联网络内部的交流。在此基础之上,进一步分析城市水资源利用效率整体网络结构和个体网络特征。

**4.2.1 整体网络特征分析** 2009—2018年间,长江经济带城市水资源利用效率网络密度整体呈现先下降后上升的“U”型变动趋势,网络密度于2012年降至谷底,而后逐年上升,且提升幅度较大(图4)。到2018年,整体网络密度已上升至0.1158。这表明,在国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》等国家级发展战略蓝图的指引下,长江经济带上中下游三大区域之间以及区域内部城市水资源利用效率的空间联系愈发紧密,各用水主体在提高水资源利用效率方面的互动协作也愈发频繁。然而,10年内,其整体网络密度均值为0.1118,仍处于较低水平,因此,流域沿线各省市仍需进一步加强城市水资源利用效率的空间联系。同时,网络关联度呈现阶梯状上升态势,2009—2018年间,网络关联度由0.8565上升至0.9263,这表明长江经济带各城市节点之间的可达性处于较高水平,且正在向完全可达的方向发展,由此也说明了该流域沿线城市水资源利用效率空间关联网络具有较高的互惠性,任意两个城市几乎总能直接或间接地通过其他城市融入整体网络中。然而,其网络关联度仍小于1,说明仍存在个别被“孤立”的网络节点,并未实质参与水资源利用效率的空间交互网络。此外,由于整体网络关联度指数无法反映网络中各节点连接是否为独立路径,难以检验各用水主体之间的交流是否都要经过少数几个度数较高的城市,因此,需要进一步分析各节点中心度,以准确评价长江经济带城市水资源利用效率网络的凝聚度。

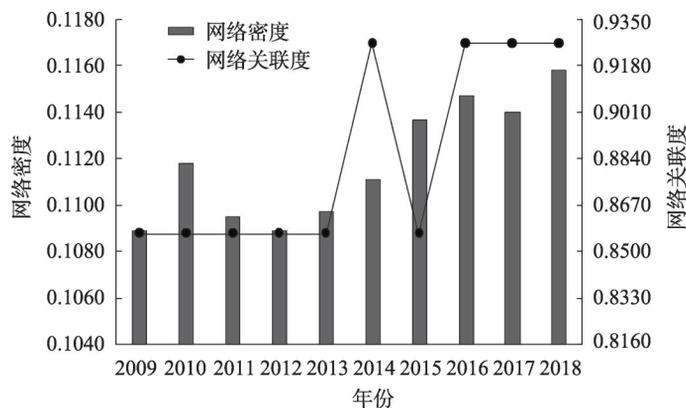


图4 城市水资源利用效率空间关联网络密度与网络关联度

Fig. 4 Density and connectedness of spatial correlation network of urban water utilization efficiency

其次,通过网络效率、网络等级度进一步分析整体网络结构(图5)。研究期内网络效率并未呈现明显的变动趋势,而是围绕其均值0.8755上下波动,说明长江经济带城市水资源利用效率空间关联网络的冗余路径较少,关联效率高,但也意味着关联网络的路径较为单一,缺乏多样性,从而导致整体网络稳定性无法得到有效保障。另外,网络等级度表现为先下降后上升、而后下降再上升的“W”型变动趋势。网络等级度于2014年达到峰值0.1118,但10年均值仍小于0.1000,并未呈现等级秩序分明的网络结构特征,任意两个城市之间几乎都是对称可达的,在水资源利用效率空间关联网络中,几乎所有城市都存在对外输出影响力的关联途径,然而,其关联强度在不同用水主体之间的差距仍有待深入挖掘。

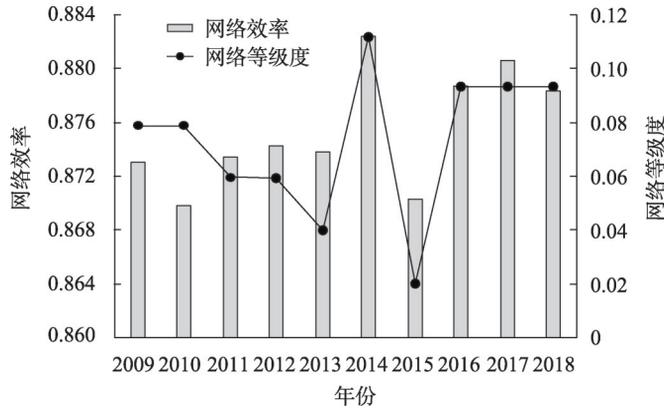


图5 城市水资源利用效率空间关联网络效率与等级度

Fig. 5 Efficiency and hierarchy of spatial correlation network of urban water utilization efficiency

最后,从整体网络结构特征分析来看,各项指标均在2013年或2014年的时间节点发生较大变动,自长江经济带战略正式上升为国家级战略之后,各城市在供水能力、污染排放治理、水旱灾害防御水资源开发与保护方面的关联关系系数逐年上升,区域协同用水、治水技术溢出格局显现,用水资本、设备投入的空间流动性也在逐步增强。同时,网络结构的等级秩序持续保持在较低水平,说明尽管存在跨界水资源冲突等用水矛盾,各城市节点可以做到取长补短助力实现整体水资源利用效率提升。然而,网络结构关联稳定性仍然欠佳,各城市关联路径单一,不利于整体网络长期稳定发展。

**4.2.2 个体网络特征分析** 上述整体网络结构特征分析仅反映长江经济带水资源利用效率网络的整体全貌,无法对节点中心度进行深入探讨,因此,需要对城市水资源利用效率个体网络特征进行测度以反映各城市节点在空间关联网络的地位和作用。通过测算历年的城市节点中心性指标,并以矩阵行均值代替式(5)中的阈值 $t^*$ 进行重复计算,发现各年份指标数据并未发生明显变化,因此,本文分别计算了各城市节点在水资源利用效率空间关联网络中的度数中心度、中介中心度与接近中心度。囿于篇幅限制,本文基于自然断点分级法对节点中心度测度值进行分类,并采用ArcGIS 10.2绘制各节点中心性的空间分布图以汇报测度结果(图6)。

(1) 度数中心度。长江经济带城市水资源利用效率网络度数中心度均值为24.542,高于均值水平的城市有37个,点出度高于点入度的城市仅有36个,说明城市水资源利用效率网络呈现出受益多于溢出的特征(图6a、6b)。点出度排名前10的城市分别为南京、上海、武汉、苏州、杭州、合肥、无锡、长沙、常州、绍兴,其中,武汉、长沙均

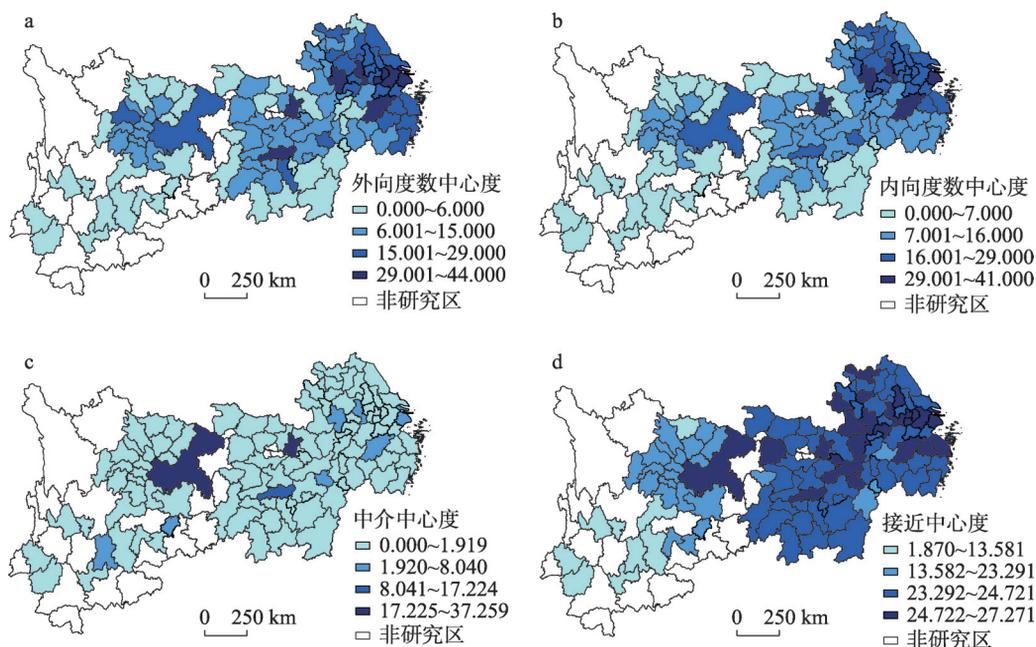


图6 长江经济带城市水资源利用效率网络城市中心度

Fig. 6 Centrality of urban water utilization efficiency network of the Yangtze River Economic Belt

为长江经济带中游地区的中心城市,其余城市均位于长江三角洲地区,这些城市虽然供水能力不及四川、江西等水资源禀赋相对丰富的地区,但因其水资源利用效率高,且在区域水资源利用效率空间关联网络中与其他城市的直接联系较多,展现出较强的对外辐射能力,因而处于网络的中心位置。而长江经济带中、上游地区城市点出度度数整体偏低,尤其体现在非中心城市中,例如,丽江、临沧、六盘水、攀枝花、张家界、怀化等对外影响能力偏弱,这表明长江经济带城市水资源利用效率提升的空间溢出路径主要集中于经济发达地区。此外,点入度与点出度呈现相似的空间分布特征,吸引力较强的城市同样集中于经济发达地区,例如,上海、南京、杭州、合肥、武汉、长沙、南昌、重庆等区域中心城市,这些城市同时具有较高的点出度和点入度,在水资源利用效率空间关联网络中不仅发挥了辐射带动作用,还是网络中的受益主体,在网络中扮演着最为活跃的中心行动者角色。并且,以这些中心城市为核心和基点,周边城市成为主要受益者,受益程度伴随距离增大而衰减。综合而言,经济发达地区可凭借自身优越的基础设施和技术人才等要素禀赋在水资源利用效率空间关联网络中发挥重要的增长极作用,以繁密的水资源利用效率空间关联网络为径,带动周边城市提升用水效率,从而在长江流域沿线城市水资源利用效率提升方面促成“一轴、两翼、三极、多点”的发展格局。

(2) 中介中心度。长江经济带城市水资源利用效率网络中介中心度均值为1.360,呈现显著的两极分化特征。高于均值的城市有13个,排名靠前的10个城市分别为武汉、重庆、长沙、上海、南京、合肥、南昌、杭州、贵阳、昆明,均为地区中心城市,这些城市的中介中心度总和占总量的83.63%(图6c)。这表明,上述排名靠前的城市位于绝大多数节点的最短连接路径上,其在水资源利用效率关联网络中支配和控制其他城市的能力较强。这是因为,重庆、昆明、贵阳、上海等城市分别为成渝、黔中、滇中、长三角等地区的中心城市,其在重要水利基础设施投资、用水节水技术与知识外溢等方面具有

显著优势,从而充当各自区域水资源利用效率空间关联网络的中介和桥梁。而排名靠后的70个城市中介中心度总和只占总量的2.06%,这些城市不仅经济发展步伐较为缓慢、水利资本要素聚集能力较弱,在关键性水质污染防控和污水处理工艺方面也较为落后,部分城市虽坐拥丰厚的水资源储备,但其利用效率较低,从而难以影响和控制其他城市的用水效率提升。

(3) 接近中心度。长江经济带城市水资源利用效率接近中心度均值为22.667,超过均值的城市有94个,结合前文对度数中心度的分析,排名较高的城市依然为各区域的中心城市,且围绕多个中心城市呈现出多中心多圈层的空间分布特征,符合地理学第一定律(图6d)。这表明,中心城市不仅在点入度和点出度方面位于前列,其在整体网络中与所有其他城市的距离也最短,能快速、便捷地实现与网络中所有其他城市的空间关联。并且,由于中心城市还具有较高的中介中心度,在区位优势及数字化经济网络的加持下,借助中心城市这一关键桥梁和中介,周边城市也得以快速融入水资源利用效率空间关联网络,从而也具有较高的接近中心度。

结合整体网络特征和节点中心性进行综合分析,节点度数中心度呈现溢出低于收益的特征,而溢出城市又以少数中心城市为主,这就导致了其实际连接数(1313条)远少于理论连接数(11342条),因此,整体网络密度处于较低水平。此外,整体网络关联度、网络效率较高,但节点中介中心度两极分化严重,这表明,虽然任意两个节点之间可以实现快速、便捷的关联和连接,但路径较为单一,几乎都需要经过区域中心城市,对中心城市的依赖性极强,因而整体网络结构的稳定性欠佳。因此,未来流域水资源利用效率提升除了要加强和巩固区域中心城市增长极的引领作用,还需注重引导丽江、六盘水、张家界等边缘城市融入水资源利用效率空间关联网络以提升整体网络密度与稳定性。

#### 4.3 块模型

为进一步探究水资源利用效率空间关联网络的内部结构状态以及各成员在关联网络中的角色和地位,本文采用CONCOR迭代收敛法分析其空间聚类特征。由于CONCOR方法分析板块间空间关联关系要求样本量一般不超过50,因此,本文在长江经济带107个地级及以上城市范围内,选取城区常住人口500万以上的42个特大城市作为研究对象,以人口密度较高、经济活动较为密集的典型城市反映地区水资源利用效率的空间聚类方式。最后,设置最大切分深度为2,集中标准为0.200,将长江流域沿线42个城市样本划分为4个板块,并分析这4个板块的空间交互关系。

各板块划分结果如图7所示,从4个板块的组成成员来看,依据CONCOR迭代收敛法划分的城市板块组成大体符合长三角城市群、长江中游城市群、成渝城市群的空间分布。上海、南京、无锡、苏州等15个城市属于第一板块,隶属长江三角洲地区;板块Ⅱ由徐州、阜阳、合肥、亳州、宿州5个城市组成;板块Ⅲ由南昌、宜春、武汉、长沙、永州等13个位于长江经济带中游地区的城市组成;重庆、成都、南充、昆明、曲靖等9个城市组成板块Ⅳ。

由表4所示,在长江经济带42个特大城市水资源利用效率空间关联网络的348条关联关系中,板块内部关系数为298条,其余50条为板块间关联关系数,总体上呈显出自反性的结构特征,即水资源利用效率的空间关联路径集中出现在各板块内部成员之间,不同板块之间关联程度低。其中,板块Ⅰ拥有最多的成员数,板块内部关系总数为142条,溢出板块外关系数为9条,接收板块外关系数为26条,实际内部关系比例(94.04%)大于期望内部关系比例(34.15%)。因此,板块Ⅰ具有“主受益”板块角色特

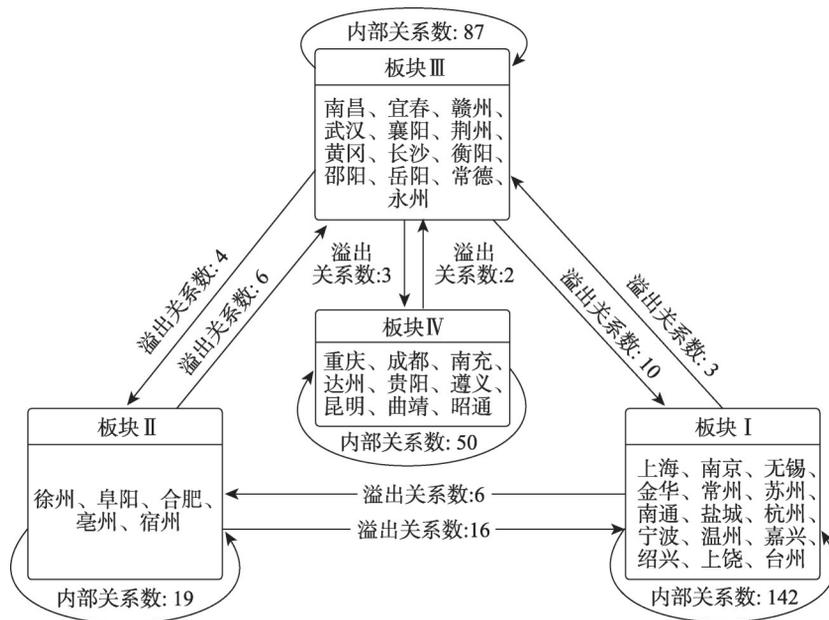


图7 城市水资源利用效率网络四大板块空间联系

Fig. 7 Spatial connection of four plates of urban water utilization efficiency network

表4 城市水资源利用效率板块间空间关联关系

Tab. 4 Spatial correlation of urban water utilization efficiency plates

板块	接收关系数(条)				城市数 (个)	接收板块外 关系数(条)	溢出板块外 关系数(条)	期望内部 关系比例(%)	实际内部 关系比例(%)
	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV					
I	142	6	3	0	15	26	9	34.15	94.04
II	16	19	6	0	5	10	22	9.76	46.34
III	10	4	87	3	13	11	17	29.27	83.65
IV	0	0	2	50	9	3	2	19.51	96.15

征，即板块 I 接收来自板块外部的关系数要大于板块内关系数；板块 II 内部关联关系总数为 19 条，溢出板块外关系数为 22 条，接收板块外关系数为 10 条，实际内部关系比例 (46.34%) 大于期望内部关系比例 (9.76%)，向板块外溢出的关联关系数明显多于接收板块外的关系数，具有“净溢出”板块的角色特征；板块 III 与板块 IV 的实际内部关系比例都要大于期望内部关系比例，板块内部关联关系分别为 87 条和 50 条，明显多于其板块外溢出与接收关系数总数。这表明虽然这两个板块既接收板块外部联系，又向其他板块溢出关系，但因其空间关联仍以板块内部城市为主，因此，这两个板块都具有“双向溢出”板块的特征。

上述分析表明，长江经济带城市水资源利用效率存在明显的空间聚类现象，但主要见长于板块内部城市之间的关联与交流，板块间仍存在交流壁垒。此外，根据各板块的空间交互关系，本文进一步计算了各板块的网络密度，若某一板块密度大于整体网络密度则赋值 1，反之则赋值 0，由公式 (6) 计算出长江经济带 42 个特大城市水资源利用效率整体网络密度为 0.202，基于此，所得密度矩阵和像矩阵如表 5 所示。像矩阵中赋值为 1 的元素主要分布在主对角线上，呈现出显著的“俱乐部”效应，但在整体网络中仍缺少“经纪人”角色板块，难以构建起板块间水资源利用效率的空间关联途径。由上述

表5 城市水资源利用效率空间关联板块的密度矩阵与像矩阵

Tab. 5 Density matrix and image matrix of spatial correlation plates of urban water utilization efficiency

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV
I	0.605	0.249	0.006	0.000	1	1	0	0
II	0.181	0.429	0.077	0.002	0	1	0	0
III	0.007	0.084	0.218	0.002	0	0	1	0
IV	0.000	0.002	0.002	0.187	0	0	0	0

分析已知,除了上饶以外,板块 I 和板块 II 内部城市均来自东部沿海发达地区,凭借其区位优势及用水投入要素积累,这些城市在各自板块内部可以实现频繁、紧密的交流,从而促成板块内水资源利用效率均衡提升的发展格局。然而,从板块间的关联来看,仍存在被边缘化的城市模块,尽管处于板块 III 的成都、重庆等中心城市可凭借其较高的水资源利用效率而发挥区域增长极的作用,在成渝城市群中扮演“经纪人”的角色,充当板块内其余城市融入水资源利用效率空间关联网络的桥梁与中介,但其在连接长江经济带、下游地区方面仍有所欠缺,处于上游地区的板块 IV 逐渐成为边缘化板块。

## 5 长江经济带城市水资源利用效率空间关联网络的形成机制

精准识别长江经济带城市水资源利用效率空间关联网络的形成机制对构建区域水资源利用效率协同提升的关联互动网络具有重要意义,但由于水资源利用效率空间关联矩阵及各自变量矩阵均为“关系”数据矩阵,采用传统计量方法进行因果关系检验将无法避免多重共线性的影响而产生偏误。因此,本文选取非参数方法 QAP (Quadratic Assignment Procedure) 回归来实证检验长江经济带城市水资源利用效率网络形成的作用因素,该法因无需假设变量间相互独立而比传统参数检验更具稳健性。QAP 作为用来研究关系矩阵之间的关系的的方法,是在对因变量矩阵和自变量矩阵进行标准多元回归分析后,将矩阵的行和列进行多次随机置换,并重复计算得到一系列待检验的回归系数,接着对原假设“建议数据是随机指派的”进行检验。若实际观察到的回归系数大于或等于初始标准回归系数的比例较小,即出现了小概率事件,则可拒绝原假设,并计算回归系数及其标准误,最终确定回归方程。参照上述估计流程,按照本文的设定,构建 QAP 回归方程如式 (13) 所示:

$$B = f(\text{Distcity}, \text{Pgdp}, \text{Indus}, \text{Infor}, \text{Exp}, \text{Tech}) \quad (13)$$

式中的变量均为矩阵,因变量  $B$  表示城市水资源利用效率空间关联矩阵;由于水资源利用效率空间关联网络的形成受区域要素流动、水资源禀赋差异、市场化水平差异等外部因素的影响,参考相关文献<sup>[9]</sup>,本文以城市间地理邻近性、人均 GDP 差异、信息化水平差异、技术创新水平差异等影响因素作为解释变量,解释变量详细说明见表 6。

通过 6000 次随机置换得到 QAP 回归结果,如表 7 所示,伴随时间的演进,各驱动因子对长江经济带城市水资源利用效率空间关联网络的影响大小和方向较为稳定,并未呈现显著的变化趋势。其中,① 地理空间邻近性、经济发展水平差异、对外开放程度差异系数显著为正。首先,地理空间邻近性可为城市间水资源利用与保护方面的深度交流与合作提供便利,降低交易成本,从而实现城市水资源利用效率空间溢出效应的最大化,并有效推动其空间关联网络的形成。其次,发达城市凭借其成熟的水利服务设施体系以及先进的生产工艺,率先实现城市用水效率提升,并不断对外辐射,向欠发达地区城市

表6 城市水资源利用效率空间关联网络影响因素与变量说明

Tab. 6 Description of influencing factors and variables of spatial correlation network of urban water utilization efficiency

变量名称	变量含义	计算方法及说明	数据来源
<i>Distcity</i>	城市地理邻近性	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 的地理邻接矩阵	Geoda软件测算
<i>Pgdp</i>	人均GDP	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 人均GDP差值网络矩阵	中国城市统计年鉴
<i>Indus</i>	产业结构	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 第二产业产值占比差值网络矩阵	中国城市统计年鉴
<i>Infor</i>	信息化水平	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 互联网宽带接入用户数差值网络矩阵	中国区域经济统计年鉴
<i>Exp</i>	对外开放程度	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 进出口总额占GDP比重差值网络矩阵	中国区域经济统计年鉴
<i>Tech</i>	技术创新水平	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 专利授权数差值网络矩阵	中国城市统计年鉴

表7 城市水资源利用效率空间关联网络影响因素的QAP回归结果

Tab. 7 QAP regression results of influencing factors of spatial correlation network of urban water utilization efficiency

变量	2009年	2010年	2012年	2014年	2016年	2018年
<i>Distcity</i>	0.1232*** (0.0183)	0.1227*** (0.0188)	0.1305*** (0.0187)	0.1278*** (0.0192)	0.1274*** (0.0191)	0.1288*** (0.0194)
<i>Indus</i>	-0.0311 (0.0012)	-0.0325 (0.0013)	-0.0307 (0.0012)	-0.0286 (0.0012)	-0.0359* (0.0012)	-0.0308 (0.0012)
<i>Exp</i>	0.2561*** (0.0060)	0.2592*** (0.0059)	0.2500*** (0.0060)	0.2449*** (0.0059)	0.2494*** (0.0060)	0.2445*** (0.0060)
<i>Infor</i>	0.0170 (0.0041)	0.0101 (0.0043)	0.0128 (0.0042)	0.0200 (0.0042)	0.0148 (0.0043)	0.0201 (0.0043)
<i>Pgdp</i>	0.0755*** (0.0058)	0.0755*** (0.0059)	0.0729*** (0.0058)	0.0644*** (0.0059)	0.0710*** (0.0059)	0.0692*** (0.0059)
<i>Tech</i>	-0.2127*** (0.0005)	-0.2108*** (0.0005)	-0.2053*** (0.0005)	-0.1972*** (0.0005)	-0.2060*** (0.0005)	-0.2038*** (0.0005)
观察值	11342	11342	11342	11342	11342	11342
随机置换次数	6000	6000	6000	6000	6000	6000

注：变量系数为标准化的回归系数；\*、\*\*、\*\*\*分别表示10%、5%、1%显著性水平；括号内数值表示标准误。

输出其用水投入资本、技术与人才优势，带动周边城市实现用水效率提升。因此，经济发展水平存在一定差距的城市也更容易在交流与互动中实现用水效率提升，从而加强了城市水资源利用效率的空间关联度。最后，区域对外开放程度的不断提升可以打破各用水主体间的贸易、技术与信息壁垒，是各用水主体实现关键要素流动的重要前提。伴随对外开放程度差异的不断扩大，外向型经济城市对外开放水平提升可以持续作用于区域用水投入要素流动，促成城市水资源利用效率的空间关联格局。② 技术创新水平差异系数显著为负，说明区域工业生产技艺或节水、用水技术存在较大差距，技术鸿沟的进一步扩大将阻碍各用水主体开展关键性用水、节水技术的共享与合作，不利于水资源利用效率空间关联网络的形成。③ 产业结构差异、信息化水平差异均不显著，二者并未显著影响水资源利用效率空间关联网络的形成。

## 6 研究结论与政策启示

本文在系统测度长江经济带城市水资源利用效率的基础上，采用引力模型分析了其空间关联关系，从而构建出城市水资源利用效率的空间关联网络，基于此，运用社会网络分析法对其整体网络结构与个体网络特征进行探讨，最后，通过QAP回归方法分析，探寻了城市水资源利用效率空间关联网络的形成机制。研究发现：① 长江经济带107个

地级及以上城市水资源利用效率逐年递增, 年均增长幅度为2.58%, 但整体水平仍然偏低, 且呈现出明显的空间分异特征, 主要体现为下游>中游>上游。② 长江经济带城市水资源利用效率呈现显著的网络特征, 网络关联度较高, 具有较好的可达性, 并未呈现明显的等级秩序。然而, 10年间整体网络密度均值为0.1118, 仍处于较低水平, 同时, 由于关联路径较为单一, 整体网络稳定性欠佳。③ 上中下游地区的中心城市发挥着中心行动者、中介沟通者的重要作用, 呈现“中心城市—非中心城市”的“核心—边缘”空间分布特征, 尤其以上海、南京、无锡、苏州等城市为网络中心行动者, 主导、连接与控制水资源利用效率空间关联网络。④ 各板块成员组成符合长三角城市群、长江中游城市群、成渝城市群的分布特征, 其中, 板块Ⅰ为“主受益”板块, 板块Ⅱ为“净溢出”板块, 板块Ⅲ和板块Ⅳ均为双向溢出板块。板块Ⅰ和板块Ⅱ成员均由长三角地区的城市所组成, 尽管这两个板块在整体网络中处于中心行动者的地位, 但其水资源利用效率关联网络仍以板块内部关系数为主, 板块溢出效应有限。此外, 处于各板块衔接位置的板块Ⅲ并未发挥好桥梁和中介作用以引导板块Ⅳ融入城市水资源利用效率空间关联网络, 板块Ⅳ逐渐成为边缘板块。⑤ 地理空间邻近性、经济发展水平差异、对外开放程度差异、技术创新水平差异等地理区位与经济社会因素对长江经济带城市水资源利用效率空间关联网络的形成具有显著影响, 而区域产业结构差异、信息化水平差异的影响并不显著。

基于以上结论, 得出政策启示: ① 长江经济带城市水资源利用效率虽然仍处于较低水平, 但其空间关联关系网络格局已然显现, 水资源利用效率的提升不仅取决于自身城市内部的合理用水规划和政策, 而且还与流域内其他城市的水资源利用政策和规划实施紧密相关。这意味着未来城市用水政策的制定不能受限于传统“定点施策”的固定思维, 还应更加关注城市水资源利用效率空间关联网络的结构状态, 精准识别关联网络中的中心行动者及充当其空间传导路径的桥梁和中介城市, 发挥其应有的辐射和带动作用。此外, 仍应畅通区域用水与节水资本、知识和技术等基本要素的流通渠道, 从而促成水资源利用效率均衡提升的协同发展带。② 针对不同城市水资源利用效率的空间关联板块, 应破除传统“上游—中游—下游”线性思维的桎梏, 依据各关联板块所处地位和功能的不同而因地制宜, 因城施策。重点巩固净溢出和主受益板块的中心地位, 进一步优化净溢出板块城市用水投入结构, 着力攻关低耗水、低污染等核心技术, 并注重扩大溢出范围, 实现板块间空间溢出效应的最大化。除此之外, 还应不断深入挖掘和加强中介板块的用水潜能, 从而进一步拓宽和加深板块间水资源利用效率的关联广度和强度。③ 破除区域技术水平差距等因素制约, 充分考虑地理邻近性、地区经济发展差距、对外开放程度等影响区域用水效率关联网络形成的驱动因素, 推动网络中心行动者与边缘者之间的用水技术、知识和人才交流与互动。同时, 仍应着眼于缩小区域产业结构合理化程度、信息化水平等方面的差距, 从而在提升总体水资源利用效率空间关联网络密度的同时, 助力边缘城市融入用水效率网络, 为水资源利用效率提升提供更多空间传导路径。

### 参考文献(References)

- [1] Water Resources Department of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009-2019. [中华人民共和国水利部. 中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2009—2019.]
- [2] Qin Teng, Zhang Hengquan, Tong Jinping, et al. Water resource constraint on urbanization in Yangtze River Economic Belt. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(3): 39-45. [秦腾, 章恒全, 佟金萍, 等. 长江经济带城镇化进程中的水资源约束效应分析. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 39-45.]
- [3] Sun Dongying, Wang Huimin, Wang Sheng. Application of social choice theory in decision-making issues on transboundary water resource allocation conflict in river basin. China Population, Resources and Environment, 2017, 27

- (5): 37-44. [孙冬营, 王慧敏, 王圣. 社会选择理论在流域跨界水资源配置冲突决策问题中的应用. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 37-44.]
- [4] Lu Dadao. Conservation of the Yangtza River and sustainable development of the Yangtze River Economic Belt: An understanding of General Secretary Xi Jinping's important instructions and suggestions for their implementation. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1829-1836. [陆大道. 长江大保护与长江经济带的可持续发展: 关于落实习总书记重要指示实现长江经济带可持续发展的认识与建议. 地理学报, 2018, 73(10): 1829-1836.]
- [5] Qin Teng, Tong Jinping, Zhang Hengquan. Construction and evolutionary factors of spatial correlation network of China's provincial water resource efficiency under environmental constraints. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 84-94. [秦腾, 佟金萍, 章恒全. 环境约束下中国省际水资源效率空间关联网络构建及演化因素. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 84-94.]
- [6] Franczyk J, Chang H. Spatial analysis of water use in Oregon, USA, 1985-2005. *Water Resources Management*, 2009, 23(4): 755-774.
- [7] Sohn J. Watering cities: Spatial analysis of urban water use in the Southeastern United States. *Journal of Environmental Planning & Management*, 2011, 54(10): 1351-1371.
- [8] Zhao Liangshi, Sun Caizhi, Zheng Defeng. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 121-133. [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.]
- [9] Zhang Guoji, Wu Huaqing, Liu Yezheng, et al. Measurement and the spatial interaction analysis of the water resource comprehensive utilization efficiency in China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, 37(8): 123-139. [张国基, 吴华清, 刘业政, 等. 中国水资源综合利用效率测度及其空间交互分析. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(8): 123-139.]
- [10] Qin Teng, Zhang Hengquan, Tong Jinping. Water network management and key area definition in Anhui Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1304-1313. [秦腾, 章恒全, 佟金萍. 安徽省用水网络管理与关键区域界定. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1304-1313.]
- [11] Sun Caizhi, Ma Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 53-63. [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. 地理研究, 2020, 39(1): 53-63.]
- [12] Yan Ziming, Du Debin, Liu Chengliang, et al. Spatio-temporal evolution and generative mechanism of global transboundary water resources cooperation. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(7): 1825-1843. [颜子明, 杜德斌, 刘承良, 等. 全球跨境水资源合作时空演变及生成机制. 自然资源学报, 2021, 36(7): 1825-1843.]
- [13] Zhai Chenyang, Du Debin, Hou Chunguang, et al. The spatio-temporal structure of international transboundary water cooperation: Based on the changes of issue area and scale differentiation. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(7): 1844-1860. [翟晨阳, 杜德斌, 侯纯光, 等. 全球跨界水合作的时空结构: 领域变迁与尺度分异. 自然资源学报, 2021, 36(7): 1844-1860.]
- [14] Fang D, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [15] Tuninetti M, Tamea S, Laio F, et al. To trade or not to trade: Link prediction in the virtual water network. *Advances in Water Resources*, 2017, 110: 528-537.
- [16] Tian Guiliang, Sheng Yu, Lu Xi, On the influence of water rights trading market operation on water resource use efficiency in pilot areas. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(6): 146-155. [田贵良, 盛雨, 卢曦. 水权交易市场运行对试点地区水资源利用效率影响研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 146-155.]
- [17] Qian Wenjing, He Canfei. China's regional difference of water resource use efficiency and influencing factors. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(2): 54-60. [钱文婧, 贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 54-60.]
- [18] Sun Caizhi, Ma Qifei, Zhao Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 1022-1035. [孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于GWR模型的中国水资源绿色效率驱动机理. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035.]
- [19] 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. [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.]
- [20] Gong Canjuan, Xu Chenglong, Zhang Xiaoqing. Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River. *Scientia Geographica Sinica*,

- 2020, 40(11): 1930-1939. [巩灿灿, 徐成龙, 张晓青. 黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素. 地理科学, 2020, 40(11): 1930-1939.]
- [21] Zhao Liangshi, Sun Caizhi, Liu Fengchao. Two-stage utilization efficiency of the interprovincial water resources under environmental constraint and its influence factors in China. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(5): 27-36. [赵良仕, 孙才志, 刘凤朝. 环境约束下中国省际水资源两阶段效率及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 27-36.]
- [22] Zhong Liwen, Zhang Jianbing, Cai Yunshuang, et al. Efficiency of water resources utilization and its spatiotemporal characteristics of Guangxi. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 193-202. [钟丽雯, 张建兵, 蔡芸霜, 等. 广西水资源利用效率及其时空格局. 经济地理, 2020, 40(6): 193-202.]
- [23] 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. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1336-1349. [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. 资源科学, 2016, 38(7): 1336-1349.]
- [24] Lei Yutao, Huang Liping. Regional differences in industrial water consumption efficiency and its influencing factors for China's major industrial provinces: A study of provincial panel data based on SFA. *China Soft Science*, 2015, 30(4): 155-164. [雷玉桃, 黄丽萍. 中国工业用水效率及其影响因素的区域差异研究: 基于SFA的省际面板数据. 中国软科学, 2015, 30(4): 155-164.]
- [25] Sun Aijun, Fang Xianming. Spatial distribution and determinant of water usage among inter-provinces in China. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5): 139-145. [孙爱军, 方先明. 中国省际水资源利用效率的空间分布格局及决定因素. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 139-145.]
- [26] Kaneko S, Tanaka K, Toyota T. Water efficiency of agricultural production in China: Regional comparison from 1999 to 2002. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 2004, 3(3/4): 231-251.
- [27] Liu Shuchang, Ye Yanmei, Li Linlin, et al. Research on urban land use efficiency in China based on the stochastic frontier analysis. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5): 1268-1281. [刘书畅, 叶艳妹, 李林林, 等. 基于随机前沿分析的中国城镇建设用土地利用效率研究. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1268-1281.]
- [28] Liu Chuanming, Ma Qingshan. Spatial association network and driving factors of high quality development in the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(10): 91-99. [刘传明, 马青山. 黄河流域高质量发展的空间关联网络及驱动因素. 经济地理, 2020, 40(10): 91-99.]
- [29] Liu Huajun, Liu Chuanming, Sun Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China. *China Industrial Economics*, 2015, 32(5): 83-95. [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, 32(5): 83-95.]
- [30] Nelson R E. Social network analysis as intervention tool. *Group & Organization Studies*, 1988, 13(1): 39-58.
- [31] Huang Jie. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China. *Resources Science*, 2018, 40(4): 759-772. [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.]
- [32] Wang Shengyun, Song Yaning, Wen Huwei, et al. Network structure analysis of urban agglomeration in the Yangtze River Economic Belt under the perspective of bidirectional economic connection: Based on time distance and social network analysis method. *Economic Geography*, 2019, 39(2): 73-81. [王圣云, 宋雅宁, 温湖炜, 等. 双向联系视角下长江经济带城市群网络结构: 基于时间距离和社会网络分析方法. 经济地理, 2019, 39(2): 73-81.]
- [33] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1978, 1(3): 215-239.
- [34] Liu Jun. *Introduction to Social Network Analysis*. Beijing: Social Science Academic Press, 2004. [刘军. 社会网络分析导论. 北京: 社会科学文献出版社, 2004.]
- [35] Feng Ying, Hou Mengyang, Yao Shunbo. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2380-2395. [冯颖, 侯孟阳, 姚顺波. 中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制. 地理学报, 2020, 75(11): 2380-2395.]
- [36] Shan Haojie. Reestimating the capital stock of China: 1952-2006. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, 25(10): 17-31. [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, 25(10): 17-31.]
- [37] Zhang Xueliang. Regional economic convergence mechanisms in the Yangtze River Delta: 1993-2006. *The Journal of World Economy*, 2010, 33(3): 126-140. [张学良. 长三角地区经济收敛及其作用机制: 1993—2006. 世界经济, 2010, 33(3): 126-140.]

## Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt

ZHANG Mingdou, WENG Aihua

(School of Economics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

**Abstract:** Analyzing the characteristics and formation mechanism of the spatial correlation network for urban water utilization efficiency has important policy implications for improving coordination and efficiency of regional urban water utilization. In this paper, we take 107 cities at prefecture level and above located in the Yangtze River Economic Belt as the research area. We calculate the water utilization efficiency from 2009 to 2018 by using the stochastic frontier analysis and construct the spatial correlation matrix. We also investigate the overall structure, individual structure, and spatial clustering mode of the spatial correlation network of urban water utilization efficiency based on the social network analysis, and explore the network formation mechanism based on the quadratic assignment procedure. The empirical results indicate that: First, the overall utilization efficiency of urban water is still at a low level, but has improved significantly with the appearance of the spatial correlation network pattern. The overall network has good accessibility and little asymmetry exists between connection pairs. However, there are still some problems such as loose correlation and poor stability of network structure. Second, the central cities in the upper, middle and lower reaches act as the main undertakers and intermediary communicators, showing the spatial distribution characteristics of "core-periphery" among the central and marginal cities. Third, the spatial correlation plates of urban water utilization efficiency can be divided into the net spillover, main benefit and two-way spillover plates, following the distribution characteristics of the urban agglomerations in the Yangtze River Delta, the middle reaches of the Yangtze River, and the Chengdu-Chongqing region. Last, geographical proximity, economic development, openness, and other natural geographical conditions and socio-economic factors have significant impacts on the formation of the urban water utilization network.

**Keywords:** urban water utilization efficiency; spatial correlation network; formation mechanism; social network analysis