

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.013

中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析

孙克¹, 张信为¹, 聂坚², 邹佳男¹, 钟习羽¹

(1. 江西科技师范大学经济与法学院, 江西 南昌 330038; 2. 江西省地质局, 江西 南昌 330046)

摘要:采用超效率SBM模型评价了2005—2020年中国省域水资源利用绩效,运用Dagum基尼系数分解法、空间自相关和时空跃迁分析方法解析了其空间分异特征,并利用地理探测器对空间分异的驱动机理进行了分析。结果表明:省域水资源利用绩效水平总体不高;空间差异程度整体呈波动扩大趋势,主要来源为超变密度,其次为地区间空间差异和地区内空间差异;空间分异格局在地理上呈现“东高西低”的空间关联特征,具有显著空间溢出效应,局域空间分布结构较为稳定;人口规模、经济水平和城镇化水平对水资源利用绩效的空间分异具有显著驱动作用,且在不同区域表现不同,全国层面和东部地区属于经济驱动型,中部和西部地区分别为城镇化驱动型和人口驱动型;产业发展水平对水资源利用绩效的空间分异驱动作用具有区域异质性,全国层面和东部地区属于工业驱动型,中部和西部地区分别为建筑业驱动型和农业驱动型。建议各区域根据主导驱动因素制定相关水资源利用绩效协同提升策略。

关键词:水资源利用绩效;空间分异;驱动因素;Dagum基尼系数;地理探测器

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0102-09

Evaluation of provincial water resources utilization performance in China and its spatial differentiation and driving factor analysis // SUN Ke¹, ZHANG Xinwei¹, NIE Jian², ZOU Jianan¹, ZHONG Xiyu¹ (1. College of Economics Management and Law, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330038, China; 2. Jiangxi Geology Bureau, Nanchang 330046, China)

Abstract: The super-efficiency slacks-based measurement model was used to evaluate provincial water resources utilization performance in China during 2005-2020. The Dagum Gini coefficient decomposition method, spatial autocorrelation, and temporal and spatial transition analysis were used to analyze the spatial differentiation. The driving mechanism of spatial differentiation was analyzed by using geographical detector. The results showed that the level of provincial water resources utilization performance was generally not high. The degree of spatial differentiation had a trend of fluctuation and expansion on the whole, and the main source was supervariable density, followed by inter-regional differentiation and intra-regional differentiation. The spatial differentiation pattern showed a spatial correlation characteristic of “high in east and low in west”, with a significant spatial spillover effect and relatively stable local spatial distribution structure. Population size, economic level, and urbanization level had significant driving effects on the spatial differentiation of water resources utilization performance, and the effects were different in different regions. Water resources utilization performance was economically driven on the national scale and in the eastern region, and it was urbanization-driven and population-driven in the central region and western region, respectively. The driving effect of industrial development on spatial differentiation of water resources utilization performance had regional heterogeneity. Water resources utilization performance was industry-driven on the national scale and in the eastern region, while it was construction industry-driven and agriculture-driven in the central region and western region, respectively. It is suggested to formulate coordinated improvement strategies for water resources utilization performance in relevant regions according to the leading driving factors.

Key words: water resources utilization performance; spatial differentiation; driving factors; Dagum Gini coefficient; geographical detector

基金项目:江西省社会科学基金项目(21YJ09);江西省教育厅科技项目(GJJ180762);江西科技师范大学博士科研启动基金项目(2019BSQD019);江西科技师范大学教学改革课题项目(JGYB-19-100-27)

作者简介:孙克(1984—),女,讲师,博士,主要从事生态经济与水资源管理研究。E-mail:sunke07@163.com

水资源严重短缺是中国高质量发展的关键制约因素,对全面建设节水型社会战略目标的实现构成重大挑战^[1]。我国水资源问题主要体现在水资源时空分布不均衡、产业空间与水资源承载能力不匹配、利用方式和分配不合理、人均水平低(全球人均水平的1/4)、城市供水管网跑冒滴漏严重和水生态环境恶化等^[2]。面对水资源存在的诸多问题,2021年10月国家发改委等部门出台的《“十四五”节水型社会建设规划》提出要进一步贯彻落实习近平总书记的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”和“以水定城、以水定业、以水定人、以水定产”治水新思路和新要求,明确把全面提升水资源利用效率和效益作为缓解我国水资源供需矛盾,破解我国水资源短缺问题,保障水资源可持续利用和安全的重要抓手。然而要落实新时期治水新思路和新要求并非易事,一方面中国幅员辽阔,各地水资源禀赋条件存在空间差异,水资源调配,尤其是跨区域调水涉及利益格局调整,影响因素多,情况复杂,“空间均衡、系统治理”治水要求的实现有阻力、难度较大^[3];另一方面不同行业用水需求和效率存在巨大差异,许多地方现有产业结构与本地水资源禀赋不匹配,同时,随着人口增长及经济发展和城市化的快速推进,水资源需求增长迅速,“以水定城、以水定业、以水定人、以水定产”治水要求落实有差距,进展不佳,亟待破题推进。因此,科学评价水资源利用绩效,明晰其空间分异特征及驱动因素,尤其是对不同产业发展的驱动作用,对于落实治水新思路和新要求,细化区域层面水资源利用绩效协同提升策略和具体化产业节水政策具有重要指导意义。

当前,在水资源利用方面的研究主要集中在绩效评价、空间分布及影响因素分析3个方面^[4-7]。在绩效评价方面,部分研究采用综合指标评价法对水资源利用绩效进行评价,如杨丽英等^[8]运用 Delph 方法从生活、农业、工业、综合用水与环境5个方面构建水资源利用绩效评价指标体系,认为水资源利用绩效评价是一个动态复杂过程,指标构建应该尽量全面,主观和客观有机结合;孟庆军等^[9]采用熵权法从水资源减量化、无害化、资源化3个维度构建水资源利用效率综合评价指标,认为中国水资源总体利用绩效水平提升缓慢,污水资源化利用水平亟待提高。而大部分研究采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法对水资源利用绩效进行评价,如韩文艳等^[10]采用 DEA 方法对中国地级城市的水资源利用绩效进行评价,发现大部分城市的水资源利用绩效水平较低;赵良仕等^[11]采用考虑了资源环境约束的超效率 SBM (slacks-based

measurement)模型对省际水资源利用效率进行评价,发现水资源利用效率总体水平不高,增长趋势上存在绝对 β 收敛。在空间分布方面,周迪等^[12]采用莫兰指数分析省域水资源利用绩效空间分布特征,发现水资源利用绩效存在显著的空间集聚特征;臧正等^[13]采用多种空间权重矩阵测度水资源利用效率的空间关联格局,发现不同产业用水效率具有不同的空间关联特征。在影响因素方面,孙才志等^[1,14]基于 GWR (geographical weighted regression)模型对水资源利用绩效的影响因素进行分析,发现产业结构、工农业发展水平、人口规模等影响因素对水资源利用绩效的作用存在空间异质性;石天戈等^[15]采用网络 DEA 和面板回归方法对省域水资源利用效率进行研究,发现经济水平、用水结构和产业结构对水资源利用效率具有重要影响,且产业结构对水资源利用效率的影响具有空间差异性。

综上所述,已有研究在水资源利用绩效评价方法和影响因素方面进行了大量理论和实证研究,取得了较丰富的研究成果,但仍存在一些不足。一是空间分异研究不足。现有关于水资源的空间分异研究一般采用空间自相关方法,如利用全局或局部莫兰指数考察水资源利用效率的空间关联特征,然而该方法难以揭示水资源利用绩效的空间差异来源,亦无法有效解决空间关联结构的稳定性问题。二是水资源利用绩效的空间分异驱动机制研究不足。现有研究一般采用面板回归或空间计量方法对水资源利用绩效的影响因素进行分析,研究结论很难推广运用于解决“缩小地区用水效率差距,实现水资源利用空间均衡”等问题。三是水资源利用绩效与具体产业细分的关系研究不足。以往对水资源禀赋和水资源利用技术水平的工作中,一般只考虑宏观产业结构,如一、二、三产业占比,而没有细分具体产业(行业),从而使得研究结果的针对性不强。鉴于此,本文充分考虑水资源利用的资源环境约束问题,采用超效率 SBM 模型测算评价中国省域水资源的利用绩效,采用 Dagum 基尼系数分解法、空间自相关及时空跃迁方法从多个维度解析省域层面水资源利用绩效的空间分异特征,利用地理探测器方法识别分析水资源利用绩效空间分异形成的关键驱动因素,以期为新时期治水新思路和新要求具体政策的制定提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 超效率 SBM 模型

DEA 方法是定量评价效率的重要方法。基于 DEA 方法的 SBM 模型可以有效处理非期望产出,而

超效率 SBM 模型则可以克服有效决策单元效率值最大为 1 的限制,实现对有效决策单元效率值的进一步比较和评价^[16-17]。本文水资源利用绩效测算的投入指标为资本、劳动力和用水量,期望产出指标为各省域生产总值,非期望产出指标为污水中的氨氮排放量和 COD 排放量^[16]。采用永续盘存法基于各省域固定资产投资估算资本投入,资本折旧率统一设定为 4%^[18],各省域从业人员总数作为劳动力投入,各省域用水量作为水资源投入。超效率 SBM 模型^[16]为

$$\min \rho = \frac{1 + \left(\sum_{i=1}^m \lambda_i / x_{ik} \right) / m}{1 - \left(\sum_{s=1}^{u_1} \lambda_s / y_{sk} + \sum_{q=1}^{u_2} \lambda_q / y_{qk} \right) / (u_1 + u_2)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} x_{ik} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} w_j + \lambda_i \\ y_{sk} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{sj} w_j + \lambda_s \\ y_{qk} &\geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{qj} w_j - \lambda_q \\ w_j &\geq 0, \lambda_i \geq 0, \lambda_s \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (2) \end{aligned}$$

式中: n 为评价单元数; m 、 u_1 、 u_2 分别为投入指标个数、期望产出指标个数、非期望产出指标个数; ρ 为效率值; w_j 为评价单元的权重; x_{ik} 、 y_{sk} 、 y_{qk} 分别为投入指标、期望产出指标和非期望产出指标的矩阵元素; λ_i 、 λ_s 、 λ_q 分别为投入指标、期望产出指标和非期望产出指标松弛量。

1.2 Dagum 基尼系数分解法

根据地理空间区位,可将研究样本划分为不同子群(如东、中、西部)。Dagum 基尼系数分解法一般在计算所有子群总体 Dagum 基尼系数(空间差异基尼系数)的基础上,根据各地区内研究对象均值对地区进行排序,然后将 Dagum 基尼系数 G 分解为地区内(组内)空间差异 G_w 、地区间空间差异 G_{nb} 、地区间(组间)差异(又称超变密度) G_t ,三者满足 $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。相比 Theil 指数和其他基尼系数,Dagum 基尼系数不仅可以揭示空间差异的来源,而且可以描述子样本的分布情况,有效解决样本之间的交叉重叠问题^[19-20]。由于样本组划分的不均匀,样本组间可能存在交叉重叠现象,即高值组内存在部分低值样本,且高值组内低值样本小于低值组内的部分高值样本,由组间样本交叉重叠产生的空间差异被定义为超变密度。Dagum 基尼系数具体计算公式^[19]为

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n'u} \quad (3)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} p_j s_j \quad (4)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) D_{jh} \quad (5)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) (1 - D_{jh}) \quad (6)$$

$$\text{其中 } G_{jj} = \frac{\frac{1}{2u_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}|}{n_j^2}$$

$$\begin{aligned} G_{jh} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (u_j + u_h)} & D_{jh} &= \frac{E_{jh} - E'_{jh}}{E_{jh} + E'_{jh}} \\ p_j &= n_j / n' & p_h &= n_h / n' \\ s_j &= n_j u_j / (n' u) & s_h &= n_h u_h / (n' u) \end{aligned}$$

式中: k 为研究区划分的地区数; n' 为总省份数; n_j 为 j 地区包含的省份数; y 为水资源利用绩效; u 为所有省份 y 的均值; u_j 为 j 地区包含省份 y 的均值; E_{jh} 为 j 和 h 地区中所有 $y_{ji} - y_{hr}$ ($y_{ji} - y_{hr} > 0$) 的数学期望; E'_{jh} 为 j 和 h 地区中所有 $y_{hr} - y_{ji}$ ($y_{hr} - y_{ji} > 0$) 的数学期望。

1.3 空间自相关及时空跃迁

全局莫兰指数可检验研究对象整体空间依赖特征和变化情况^[21]。一般采用 Z 统计量对莫兰指数值进行显著性检验,若莫兰指数值为正且通过显著性检验,则研究对象空间依赖特征存在显著正空间自相关;为负且通过显著性检验,则存在显著负空间自相关;为 0,则呈独立随机分布。可进一步绘制局域莫兰类型图,考察研究对象空间分布集聚和变化情况。为了更全面考察研究对象分布的时空依赖特征,亦可进行 LISA (local index of spatial autocorrelation) 时空跃迁分析。LISA 时空跃迁分析根据局域莫兰类型图分类,使用马尔科夫转移矩阵分析不同时间的莫兰类型转换情况。莫兰类型转换一般可分为 4 类:类型 0 (本省域与相邻省域均未发生跃迁)、类型 I (仅本省域发生跃迁)、类型 II (仅相邻省域发生跃迁)、类型 III (本省域与相邻省域均发生跃迁)。LISA 时空跃迁分析一般采用空间稳定系数(类型 0 未发生跃迁数目与所有可能跃迁数目的比值)指标,空间稳定系数越大,则研究对象分布的局部空间结构越稳定^[22]。计算公式可参考相关文献^[21-22],有关计算可采用 ArcGIS 10.2 和 R 语言编程联合实现。

1.4 地理探测器

地理探测器可以探测某种影响因素 X 能在多大程度上解释因变量 Y 的空间分异,用 q 值度量,具体计算公式^[23-24]为

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 / (N \sigma^2) = 1 - W_{ss} / T_{ss} \quad (7)$$

其中
$$W_{ss} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad T_{ss} = N \sigma^2$$

式中: L 为 Y 或者 X 的分层(分区)数; N_h 、 N 分别为第 h 层和整个研究区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为第 h 层和全区的 Y 值的方差; W_{ss} 、 T_{ss} 分别为层内总方差和全区总方差。 q 值的取值范围为 $[0,1]$,如果分层是由自变量 X 生成的,则 q 值越大表示 X 对 Y 的解释力越强,即 X 对 Y 的空间分异形成具有较强的驱动作用,反之则越弱。

1.5 数据来源

文中涉及数据均来源于各年度《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和各省(市、区)统计年鉴、各省(市、区)水资源公报。其中,所有涉及价格因素的数据均以2000年为基期得到不同年份的数据。

2 结果与分析

2.1 水资源利用绩效评价

利用 Maxdea 软件中的全期前沿非径向超效率 SBM 模型测算得到 2005—2020 年中国 30 个省级行政区(不含西藏、台湾、香港、澳门)水资源利用绩效水平,如表 1 所示。省域水资源利用绩效总体水平不高,只有少数省份在少数时期大于 1,全国平均水平在样本期均低于 0.54,水资源利用绩效改善空间巨大。省域水资源利用绩效整体呈现 U 形波动变化特征,2005—2014 年呈现整体波动下降趋势,2014—2020 年呈现波动上升趋势。其原因因为前期(2005—2014 年)整个经济社会在水资源利用方面比较粗放,先进节水技术推广缓慢,全民节水意识较低,尤其是企业生产节水意识不强,水资源浪费严重,加之水污染排放管控不严,导致水资源利用绩效水平不断走低;后期(2014 年以后)随着中国经济进入新阶段,2015 年 4 月国务院出台了《水污染防治行动计划》,尤其是高质量发展概念的提出,“节水优先”成为社会共识,全社会尤其是企业的节水意识不断增强,开始注重水资源利用的减量化、降污化及污水资源化,大量采用先进节水技术,实施水资源多级利用和循环利用,水资源利用绩效整体水平不断提高。省域水资源利用绩效具有区域异质性,东部地区平均水平最高,其次为中部地区,西部地区最

低,说明东部地区可以在节水方面给予中西部地区更多的技术示范和经验借鉴,而中西部地区则要加强与东部地区的学习交流,共享东部地区先进节水技术和经验。

2.2 水资源利用绩效的空间分异

2.2.1 空间差异分解

厘清水资源利用绩效空间差异来源及其演变特征,可为区域水资源利用绩效协同提升政策的制定提供重要指导。将 30 个省级行政区按照国家统计局的标准划分为东、中、西部三大地区,根据 Dagum 基尼系数计算方法及其分解公式,计算出 2005—2020 年中国省域水资源利用绩效的总体空间差异基尼系数、地区内空间差异、地区间空间差异和超变密度。

a. 总体空间差异基尼系数呈现波动扩大的趋势(图 1(a))。2005 年水资源的总体空间差异基尼系数为 0.193,到 2020 年为 0.289,15 a 增长了 0.096;个别时段下降趋势明显,如 2012—2014 年,空间差异基尼系数下降幅度较大(达到 0.046);2014 年总体空间差异基尼系数为 0.177,达到样本观测期的最低点。这与省域水资源利用绩效整体平均水平时间变化趋势相对一致,整体平均水平高时,其总体空间差异基尼系数一般也较大,同时,亦说明省域水资源利用绩效存在区域“增长不平等”问题。

b. 地区内空间差异呈现空间分异变化特征(图 1(b))。东部地区内空间差异变化平缓,中部地区内空间差异呈 U 形变化,而西部地区内空间差异前期(2013 年以前)变化平缓,后期空间差异快速变大。具体来说,东部地区内空间差异 2005—2020 年变化较小,比较平稳;中部地区内空间差异 2005—2016 年波动下降,而 2016—2020 年波动上升;西部地区内空间差异 2005—2013 年变化平缓,2013—2020 年快速增加(由 0.106 增至 0.307)。此外,样本观测期内,东部、中部、西部地区内空间差异年均值分别为 0.271、0.223、0.193,说明就地区内分异程度而言,东部地区占主导地位,其次为中部和西部地区。

c. 地区间空间差异呈阶段性变化特征(图 1(c))。具体来说,东—西和东—中地区间空间差异 2005—2014 年变化平缓,2014 年以后呈波动扩大之势;中—西地区间空间差异 2004—2013 年波动下降,但幅度不大,2013 年以后则波动上升;样本观测期内,东—西、东—中、中—西地区间空间差异年均值分别为 0.273、0.225、0.194,说明就地区间分异程度而言,东—西地区间占主导地位,其次为东—中和中—西地区间。

表 1 2005—2020 年中国省域水资源利用绩效测算结果

Table 1 Calculation results of provincial water resources utilization performance in China from 2005 to 2020

省 域	2005 年	2007 年	2009 年	2011 年	2012 年	2014 年	2016 年	2018 年	2020 年
北 京	0.297	0.360	0.334	0.320	0.319	0.323	0.337	0.385	0.458
福 建	1.004	0.987	0.701	0.513	0.590	0.502	0.494	0.725	0.695
广 东	0.551	0.614	0.586	0.609	0.718	0.666	0.815	0.996	0.864
海 南	0.278	0.234	0.307	0.377	0.360	0.389	0.311	0.525	0.455
河 北	0.479	0.565	0.430	0.399	0.408	0.368	0.359	0.394	0.410
江 苏	0.737	0.773	0.684	0.990	1.007	0.700	0.699	0.981	1.001
辽 宁	0.327	0.266	0.231	0.225	0.214	0.229	0.275	0.324	0.334
山 东	0.512	0.447	0.417	0.367	0.356	0.309	0.302	0.357	0.406
上 海	0.465	0.430	0.417	0.421	0.450	0.461	0.621	1.000	0.986
天 津	0.438	0.506	0.520	0.585	0.714	0.555	0.497	0.532	0.513
浙 江	1.000	0.717	0.608	0.609	0.688	0.554	0.532	0.663	0.985
安 徽	1.015	0.994	0.885	0.704	0.660	0.433	0.399	0.533	0.994
河 南	0.457	0.448	0.393	0.423	0.428	0.418	0.398	0.610	0.809
黑龙江	0.271	0.267	0.233	0.254	0.241	0.238	0.296	0.318	0.328
湖 北	0.390	0.373	0.393	0.380	0.368	0.395	0.411	0.442	0.464
湖 南	0.462	0.475	0.440	0.429	0.421	0.400	0.408	0.482	0.430
吉 林	0.398	0.391	0.317	0.263	0.305	0.346	0.369	0.370	0.371
江 西	0.488	0.478	0.395	0.361	0.393	0.383	0.490	0.544	0.625
山 西	0.415	0.339	0.302	0.246	0.234	0.263	0.276	0.277	0.285
甘 肃	0.373	0.340	0.328	0.312	0.341	0.321	0.363	0.362	0.385
广 西	0.489	0.459	0.423	0.374	0.366	0.365	0.376	0.648	1.255
贵 州	0.288	0.343	0.320	0.349	0.345	0.280	0.235	0.258	0.252
内蒙古	0.368	0.456	0.477	0.422	0.438	0.389	0.411	0.423	0.387
宁 夏	0.198	0.254	0.244	0.253	0.260	0.252	0.203	0.217	0.211
青 海	0.238	0.226	0.202	0.257	0.226	0.197	0.263	0.258	0.231
陕 西	0.239	0.262	0.241	0.234	0.223	0.201	0.238	0.252	0.258
四 川	0.326	0.320	0.277	0.231	0.260	0.216	0.244	0.326	0.358
新 疆	0.285	0.238	0.254	0.263	0.252	0.289	0.320	0.307	0.314
云 南	0.401	0.399	0.350	0.340	0.340	0.326	0.347	0.364	0.369
重 庆	0.346	0.402	0.334	0.405	0.586	0.406	0.383	0.479	0.644
东部平均	0.553	0.536	0.476	0.492	0.529	0.460	0.476	0.626	0.646
中部平均	0.487	0.470	0.420	0.382	0.381	0.359	0.381	0.447	0.538
西部平均	0.323	0.336	0.314	0.313	0.331	0.295	0.308	0.354	0.424
全国平均	0.451	0.445	0.402	0.397	0.417	0.372	0.389	0.478	0.536

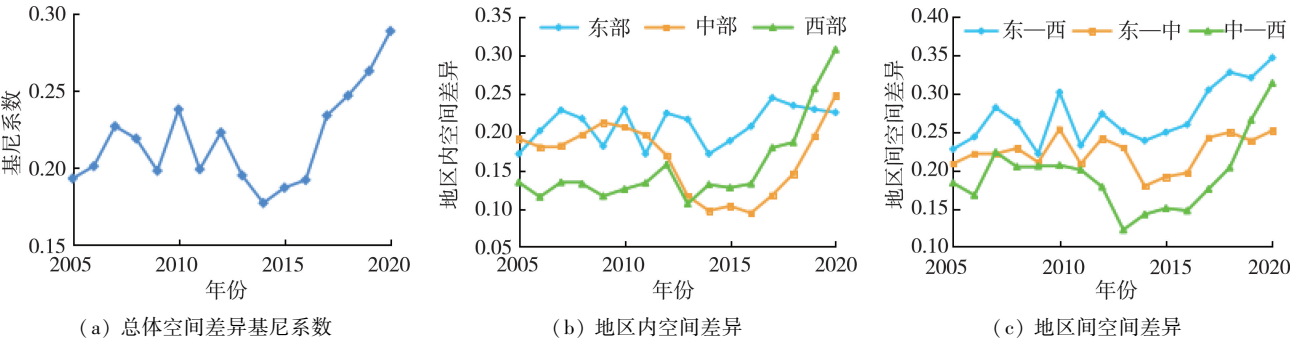


图 1 水资源利用绩效空间差异

Fig.1 Spatial differentiation of water resources utilization performance

d. 空间差异主要来源为超变密度,其次为地区间空间差异和地区内空间差异(图 2)。具体来说,样本观测期内,大部分时期空间差异主要来源于超变密度,个别时期为地区间空间差异和地区内空间差异;超变密度、地区间空间差异、地区内空间差异对空间差异贡献率的年均值分别为 40.9%、

30.4%、28.7%,其中,超变密度贡献率呈 U 形变化特征(2013 年为最低点 22.5%),地区间空间差异贡献率呈倒 U 形变化特征(2013 年为最高点,达到 48.8%),而地区内空间差异贡献稳定,变化平缓。超变密度对空间差异贡献最大,说明了采用 Dagum 基尼系数分解法的必要性。

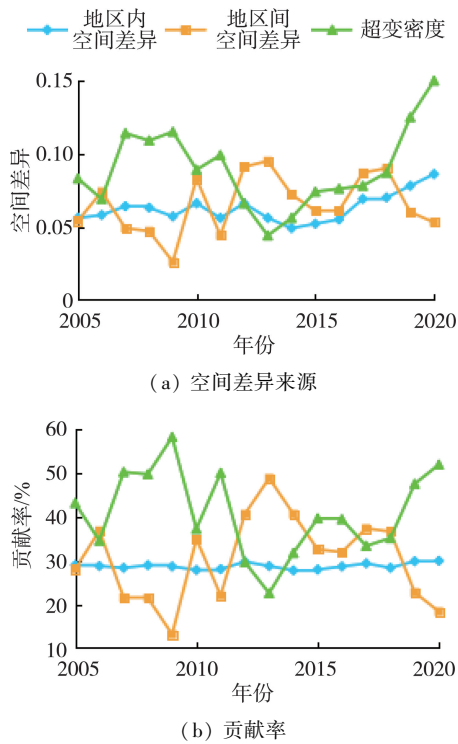


图2 水资源利用绩效空间差异来源及贡献率

Fig.2 Sources of spatial differentiation of water resources utilization performance and their contribution rate

2.2.2 空间自相关及时空跃迁

经济地理数据一般具有空间自相关性。通过计算省域水资源利用绩效的全局莫兰指数(图3)、局域莫兰类型和LISA时空跃迁概率矩阵(表2),可以较全面地把握省域水资源利用绩效的空间关联类型及其演变特征。

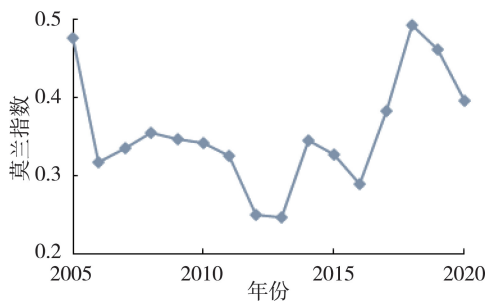


图3 水资源利用绩效的莫兰指数

Fig.3 Moran's index of water resources utilization performance

表2 LISA 时空跃迁概率矩阵

Table 2 LISA space-time transition probability matrix

类型	总数	跃迁数目				跃迁概率			
		HH	HL	LH	LL	HH	HL	LH	LL
HH	127	110	5	12	0	0.866	0.039	0.094	0.000
HL	50	2	41	1	6	0.040	0.820	0.020	0.120
LH	74	11	0	58	5	0.149	0.000	0.784	0.068
LL	199	2	4	6	187	0.010	0.020	0.030	0.940

a. 省域水资源利用绩效的空间关联特征。

2005—2020 年全球莫兰指数最小值为 0.246,平均

值为 0.355,均通过 1% 显著性水平检验,表明在样本期内,中国省域水资源利用绩效具有显著正空间自相关性,即空间溢出效应。依据 2005—2020 年各省域水资源利用绩效均值,通过分析局域莫兰类型可以进一步揭示水资源利用绩效的空间关联格局。水资源利用绩效的空间关联类型主要划分为 4 种类型:本地水资源利用绩效高且邻域水资源利用绩效亦高的 HH 类型、本地高且邻域低的 HL 类型、本地低且邻域高的 LH 类型和本地低且邻域低的 LL 类型。其中,HH 类型省域有 9 个,大部分分布在东中部地区,分别为上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖南、广东、广西;LL 类型 14 个,大部分分布在中西部和东北地区,分别为陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、四川、贵州、云南、辽宁、吉林、黑龙江、河北、山西、内蒙古;HL 类型 3 个,散布于东、中、西部,分别为天津、河南、重庆;LH 类型 4 个,散布于东部和中部地区,分别为北京、山东、湖北、海南。总体来看,中国省域水资源利用绩效呈现“东高西低”的空间关联格局,其中,HH 类型和 LL 类型合计 23 个,占省域总数的 76.67%,说明局域空间关联性亦是省域水资源利用绩效空间分异的重要特质。

b. 省域水资源利用绩效的时空跃迁特征分析。

2005—2020 年中国省域水资源利用绩效局域空间分布的 450 个最大可能跃迁数目中,有 396 个没有发生跃迁(类型 0),空间稳定系数为 88%,说明省域水资源利用绩效的局域空间分布结构较为稳定。根据表 2 可计算出类型 I 有 33 个,类型 II 有 18 个,而类型 III 仅有 3 个,说明本省域与相邻省域同时发生状态跃迁的可能性较低。

总的来说,空间分异研究发现省域水资源利用绩效空间分布存在正空间关联格局,这与以往研究结果相一致。结果表明,超变密度是空间差异的主要来源,说明三大地带(东、中、西部)间的交叉重叠现象较严重,高值地区内部可能有低值成员,低值地区内部亦可能有高值成员,暗示地区内部存在较大的异质性,地区内部应该慎重采用“一刀切”的水资源管理政策,要具体情况具体分析^[25]。根据测算结果(表 2),199 个 LL 类型中,经过跃迁变化后仍然有 187 个 LL 类型,表明空间关联结构具有较强的稳定性,要实现省际水资源利用绩效协同提升难度较大。这些研究结果相较以往研究具有更丰富的政策启示意义。

2.3 水资源利用绩效空间分异的驱动因素

本文主要考察水资源利用绩效空间分异的人文驱动因素,尤其重点关注不同产业(行业)的发展对水资源利用绩效的驱动效应。参考已有研

究^[1,15,17],人文驱动因素主要从与水资源利用关系密切的人口规模、经济水平、城镇化水平和产业发展水平4个方面选取,其中产业细分为9个行业,即农业(农林牧渔业)、工业、建筑业、批发零售业、交通运输仓储和邮政业、住宿和餐饮业、金融业、房地产业和其他行业。具体指标定义如下:①人口规模为地区人口;②经济水平为地区人均GDP;③城镇化水平为各地区城镇人口占总人口的比值;④产业发展水平为9个细分行业的增加值分别占总产值的比例。由前述分析可知,中国省域水资源利用绩效存在明显的空间分异特征,选取的12个驱动因素存在一定程度的多重共线性问题,地理探测器可以较好地识别空间分异,同时又能克服驱动因素的多重共线性^[24],因此本文利用地理探测器从全国和区域(东、中、西部)两个层面对省域水资源利用绩效空间分异的驱动因素进行解析,结果如表3所示。

a. 人口规模、经济水平和城镇化水平对省域水资源利用绩效的空间分异具有显著驱动作用,且其作用在不同区域表现不同。从全国层面看,经济水平的驱动作用最强,其次为人口规模和城镇化水平。从区域层面看,东部地区经济水平的驱动作用最强,其次为城镇化水平和人口规模;中部地区城镇化水平的驱动作用最强,其次为经济水平和人口规模;西部地区人口规模的驱动作用最强,其次为城镇化水平和经济水平。按照水资源利用绩效空间分异的最强驱动因素分类,全国层面和东部地区属于经济驱动型,而中部地区属于城镇化驱动型,西部地区则为人口驱动型。

b. 不同产业发展水平对省域水资源利用绩效的空间分异具有不同的驱动作用,同一产业在不同地区具有不同的驱动效应。从全国层面看,工业发

展水平的驱动作用最强,然后依次为建筑业、农业、房地产业、交通运输仓储和邮政业,而批发零售业、住宿和餐饮业、金融业及其他行业发展水平的驱动作用则不显著。从区域层面看,东部地区工业发展水平的驱动作用最强,然后依次为建筑业、房地产业、交通运输仓储和邮政业、金融业、住宿和餐饮业,而农业、批发零售业和其他行业发展水平的驱动作用则不显著;中部地区建筑业发展水平的驱动作用最强,然后依次为农业、工业,而批发零售业、房地产业、交通运输仓储和邮政业、住宿和餐饮业、金融业及其他行业发展水平的驱动作用则不显著;西部地区农业发展水平的驱动作用最强,然后依次为工业、建筑业,而批发零售业、房地产业、交通运输仓储和邮政业、住宿和餐饮业、金融业及其他行业发展水平的驱动作用则不显著。从产业角度看,按照水资源利用绩效空间分异的最强驱动因素分类,全国层面和东部地区属于工业驱动型,而中部地区为建筑业驱动型,西部地区则为农业驱动型。

c. 人口规模、经济水平、城镇化水平和产业发展水平对水资源利用绩效空间分异的驱动作用具有区域异质性,区域异质性的存在与水资源、人口、经济、城镇化及产业发展等自然人文禀赋存在空间异质性分布具有密切关系。具体来说,水资源在东部地区分布较多,其丰裕程度超过全国水平,经济和工业发展水平亦超过全国平均水平,生产用水供给压力大,表现为经济驱动型和工业驱动型;中部地区经济发展水平与东部地区差距较大,但其城镇化推进速度与东部地区相当,城市规模(建筑体量)粗放式扩张,城市用水激增,水资源负荷大,表现为城镇化驱动型和建筑业驱动型;西部地区水资源少,利用绩效水平低,人口增长和农业发展较快,对水资源可持

表3 水资源利用绩效空间分异驱动因素分析结果

Table 3 Results of driving factors of spatial differentiation of water resources utilization performance

驱动因素	q 值				p 值			
	全国	东部	中部	西部	全国	东部	中部	西部
人口规模	0.431	0.287	0.421	0.569	0.000	0.000	0.000	0.000
经济水平	0.542	0.446	0.431	0.286	0.000	0.000	0.000	0.000
城镇化水平	0.311	0.381	0.478	0.307	0.000	0.000	0.000	0.000
农业发展水平	0.231	0.083	0.457	0.519	0.000	0.150	0.000	0.000
工业发展水平	0.365	0.634	0.343	0.194	0.000	0.000	0.000	0.000
建筑业发展水平	0.328	0.435	0.486	0.111	0.000	0.000	0.000	0.008
批发零售业发展水平	0.016	0.025	0.009	0.015	0.769	0.487	0.854	0.495
交通运输仓储和邮政业发展水平	0.113	0.210	0.002	0.065	0.007	0.000	1.000	0.196
住宿和餐饮业发展水平	0.031	0.139	0.008	0.021	0.561	0.001	1.000	0.201
金融业发展水平	0.035	0.153	0.012	0.010	0.730	0.000	0.130	0.302
房地产业发展水平	0.139	0.235	0.140	0.029	0.001	0.000	0.540	0.407
其他行业发展水平	0.084	0.095	0.080	0.080	1.000	0.270	0.651	0.670

注:p 值小于0.05 表示通过显著性检验。

续利用构成巨大压力,表现为人口驱动型和农业驱动型。

根据上述水资源利用绩效空间分异驱动因素分析结果,全国层面和东部地区要多关注经济发展产生的驱动压力,在“以水定产”上多下功夫;中部地区则要多考虑城镇化推进带来的驱动压力,在“以水定城”上多下功夫;而西部地区则要注意人口增加形成的驱动压力,在“以水定人”上多下功夫;在“以水定业”方面,全国层面和东部地区要注重在工业节水方面多下功夫,而中部地区和西部地区则分别要在建筑业节水和农业节水方面多下功夫。此外,有些产业(行业)在全国层面或区域层面驱动效应不显著,说明这些产业对水资源利用还没有形成明显的胁迫压力,在水资源刚性约束下,仍具有较大的发展潜力,可以适当加大这些产业的发展力度,如进一步分析可以发现,房地产业、交通运输仓储和邮政业等只在全国层面和东部地区发挥驱动作用,而在中部地区和西部地区驱动作用不显著,说明中西部地区这些产业发展相对滞后,其对水资源利用绩效的提升压力还较小,可适当加大这些产业发展的推进力度。

总的来说,空间分异驱动因素研究发现人口规模、经济水平、城镇化水平和产业发展水平对水资源利用绩效的空间分异具有显著驱动作用,这与以往相关研究结果具有一定的相似性。基于地理探测器的研究对影响因素的驱动作用进行了分区(东、中、西部)探测,还进一步考察了细分产业对水资源利用绩效的驱动效应,发现水资源利用绩效的空间分异在不同地区存在不同的主导驱动因素,进而提出根据主导驱动因素制定相关区域水资源利用绩效协同提升策略。所得研究结果相较以往研究更具针对性。

3 结 论

a. 样本期内中国省域水资源利用绩效总体水平不高,就平均水平而言东部地区最高、其次为中部地区,西部地区最低。

b. 样本期内中国省域水资源利用绩效的总体空间差异程度呈波动扩大趋势;就地区内空间差异程度而言,东部地区占主导地位,其次为中部和西部地区;就地区间空间差异程度而言,东—西地区间占主导地位,其次为东—中和中—西地区间;空间差异主要来源为超变密度,其次为地区间空间差异和地区内空间差异;样本期内省域水资源利用绩效的空间分异格局总体呈现“东高西低”空间关联特征,具有显著正空间自相关性(空间溢出效应),且局域空

间分布结构较为稳定。

c. 人口规模、经济水平和城镇化水平对省域水资源利用绩效的空间分异具有显著驱动作用,且其作用在不同区域表现不同,其中,全国层面和东部地区属于经济驱动型,而中部地区属于城镇化驱动型,西部地区则为人口驱动型;不同产业发展水平对省域水资源利用绩效的空间分异具有不同的驱动作用,同一产业在不同地区具有不同的驱动效应,其中,全国层面和东部地区属于工业驱动型,而中部地区为建筑业驱动型,西部地区则为农业驱动型。

d. 中国省域水资源利用绩效的空间分异在不同地区存在不同的主导驱动因素,可根据各地区主导驱动因素制定相关水资源利用绩效协同提升策略。全国层面和东部地区要在“以水定产”上多下功夫;中部地区要在“以水定城”上多下功夫,而西部地区要在“以水定人”上多下功夫;在“以水定业”方面,全国层面和东部地区要在工业节水方面多下功夫,中部地区和西部地区分别要在建筑业节水和农业节水方面多下功夫。

参考文献:

[1] 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[J]. 地理学报,2020,75(5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (5): 1022-1035. (in Chinese))

[2] 夏军,刁艺璇,余敦先,等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护,2022,38(3):1-8. (XIA Jun, DIAO Yixuan, SHE Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):1-8. (in Chinese))

[3] 郭旭宁,郦建强,李云玲,等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):62-66. (in Chinese))

[4] 陈述,吕文芳,王建平. 长江流域水资源利用效率时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):80-86. (CHEN Shu, LYU Wenfang, WANG Jianping. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):80-86. (in Chinese))

[5] 焦士兴,王安周,张崇崇,等. 河南省水资源效率综合测

- 度及时空分异[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 48-55. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, ZHANG Chongchong, et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 48-55. (in Chinese))
- [6] WANG Suqiao, ZHOU Li, WANG Hui, et al. Water use efficiency and its influencing factors in China based on the data envelopment analysis (DEA): tobit model [J]. Water, 2018, 10(7): 832.
- [7] 贺玉晓, 苏小婉, 任玉芬, 等. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7464-7478. (HE Yuxiao, SU Xiaowan, REN Yufeng, et al. Spatiotemporal differentiation of urban water resource utilization efficiency of eco-geographic regions in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7464-7478. (in Chinese))
- [8] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5/6): 642-646. (YANG Liying, XU Xinyi, JIA Xiangxiang. Water use efficiency evaluating index system[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5/6): 642-646. (in Chinese))
- [9] 孟庆军, 顾悦, 潘海英. “双循环”视角下水资源利用效率与经济发展的协调关系研究[J]. 水利经济, 2022, 40(2): 31-37. (MENG Qingjun, GU Yue, PAN Haiying. Coordination between water resource utilization and economic development from perspective of dual circulation [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(2): 31-37. (in Chinese))
- [10] 韩文艳, 陈兴鹏, 张子龙, 等. 中国地级及以上城市水资源利用效率的时空格局分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 354-360. (HAN Wenyan, CHEN Xingpeng, ZHANG Zilong, et al. Analysis on spatiotemporal structure of water resources utilization efficiency of the prefecture level cities and beyond in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 354-360. (in Chinese))
- [11] 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[J]. 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[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 121-133. (in Chinese))
- [12] 周迪, 周丰年. 中国水资源利用效率俱乐部趋同的检验、测度及解释: 2003—2015 年[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1103-1115. (ZHOU Di, ZHOU Fengnian. Inspection, measurement and interpretation of club convergence of water resources utilization efficiency in China: 2003-2015 [J]. Journal of Natural Sources Resources, 2018, 33(7): 1103-1115. (in Chinese))
- [13] 臧正, 邹欣庆, 宋翹楚. 空间权重对分析地理要素时空关联格局的影响: 基于中国大陆省域水资源消耗强度的实证[J]. 地理研究, 2017, 36(5): 872-886. (ZANG Zheng, ZOU Xinqing, SONG Qiaochu. Impacts of spatial weight on the analysis of spatial-temporal patterns of geographic factors: an empirical study on the intensity of water resource consumption in provinces of Chinese Mainland[J]. Geographical Research, 2017, 36(5): 872-886. (in Chinese))
- [14] 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[J]. 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[J]. Progress in Geography, 2018, 37(7): 901-911. (in Chinese))
- [15] 石天戈, 时卉. 基于网络 DEA 的中国省域水资源效率特征与影响因素分析[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 176-183. (SHI Tiange, SHI Hui. Water resources efficiency and its influencing factors in China based on network-DEA model[J]. Ecological Economy, 2022, 38(7): 176-183. (in Chinese))
- [16] 李静, 马潇臻. 资源与环境双重约束下的工业用水效率: 基于 SBM-Undesirable 和 Metafrontier 模型的实证研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 920-933. (LI Jing, MA Xiaocan. The utilization efficiency of industrial water under the dual constraints of resource and environment: an empirical study based on SBM-undesirable and Meta-frontier model[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 920-933. (in Chinese))
- [17] 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[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(10): 35-42. (MA Hailiang, HUANG Dechun, ZHANG Jiguo. Water resource utility efficiency and its influencing factors considering undesirable goods [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10): 35-42. (in Chinese))
- [18] 庞瑞芝, 邓忠奇. 服务业生产率真的低吗? [J]. 经济研究, 2014, 49(12): 86-99. (PANG Ruizhi, DENG Zhongqi. Is productivity of services sector really low? [J]. Economic Research Journal, 2014, 49(12): 86-99. (in Chinese))
- [19] 滕泽伟. 中国服务业绿色全要素生产率的空间分异及驱动因素研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(11): 23-41. (TENG Zewei. Spatial differentiation and driving factors of green total factor productivity in China's service industry [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, 37(11): 23-41. (in Chinese))

(下转第 186 页)

- 学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 628-634. (YANG Gang, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2018, 54(5): 628-634. (in Chinese))
- [19] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究:以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese))
- [20] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69. (in Chinese))
- [21] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-08-16 编辑:施业)

(上接第 110 页)

- [20] 梁红艳. 中国城市群生产性服务业分布动态、差异分解与收敛性[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(12): 40-60. (LIANG Hongyan. Distribution dynamics, difference decomposition and convergence mechanism of producer services industry in Chinese urban clusters[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(12): 40-60. (in Chinese))
- [21] ANSELIN L. Spatial econometrics: methods and models [J]. Journal of the American Statistical Association, 1990, 85(411): 160.
- [22] REY S J, MURRAY A T, ANSELIN L. Visualizing regional income distribution dynamics[J]. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81-90.
- [23] WANG Jinfeng, LI Xinhua, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [25] 裴延峰. 中国产业结构变迁的空间不平衡对地区经济差距的影响[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(3): 3-23. (PEI Yanfeng. Study on the impact of spatial imbalance of industrial structure change on regional economic disparity in China [J]. The Journal of Quantitative Economics & Technical Economics, 2022, 39(3): 3-23. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-25 编辑:施业)

(上接第 125 页)

- [32] 俞建河, 吴永林, 丁长荣. 皖东江淮丘陵区不同水文年水稻优化灌溉制度的研究[J]. 节水灌溉, 2017(1): 94-97. (YU Jianhe, WU Yonglin, DING Changrong, et al. A Study on optimal irrigation schedule of paddy in different hydrological years in the hilly areas of Eastern Anhui Province [J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 94-97. (in Chinese))
- [33] 耿庆玲. 西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [34] 张礼兵, 喻海閔, 金菊良, 等. 基于联系数的大型灌区水资源空间均衡评价与优化调控[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1011-1023. (ZHANG Libing, YU Haiguan, JIN Juliang, et al. Evaluation and optimal regulation of spatial equilibrium of water resources in large irrigation area based on connection number [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1011-1023. (in Chinese))
- [35] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [36] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [37] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
- [38] 金菊良, 孔令茹, 崔毅, 等. 基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 340-348. (JIN Juliang, KONG Lingru, CUI Yi, et al. Assessment of regional agricultural drought vulnerability based on five-element semipartial subtraction set pair potential [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 340-348. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-10-21 编辑:王芳)