

DOI: 10.5846/stxb202110112854

刘宁, 李华姣, 边志强, 刘晓佳. 基于空间面板 STIRPAT 模型的水足迹影响因素分析——以山东省为例. 生态学报, 2022, 42(22): 9335-9347.

Liu N, Li H J, Bian Z Q, Liu X J. Influence factors of water footprint based on spatial panel STIRPAT Model: A case study of Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9335-9347.

基于空间面板 STIRPAT 模型的水足迹影响因素分析 ——以山东省为例

刘 宁^{1,3}, 李华姣^{2,3,*}, 边志强¹, 刘晓佳^{1,3}

1 山东工商学院经济学院, 烟台 264005

2 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083

3 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 101149

摘要: 随着中国水资源供需矛盾加剧, 虚拟水成为地区水资源管理中不可或缺的一环, 为提高地区水资源综合利用效率和探索水资源区域一体化管理提供了新思路。采用“自下而上”法核算了山东省 17 个城市农业、工业、生活、生态与灰水足迹, 在分析 2009—2018 年水足迹时空分布规律基础上, 综合运用探索性空间数据分析方法、面板数据 STIRPAT 模型和空间杜宾模型, 揭示了水足迹的空间自相关特征, 量化分析了人口数量、富裕程度、技术进步、城镇化和产业升级等影响因素对水足迹的本地影响效应与空间溢出效应。结果显示: ①2009—2018 年山东省水足迹总量均呈现波动上升的变化趋势; 空间布局上呈现东部沿海和西部平原水足迹高, 中部山地水足迹低的特点。②山东省水足迹具有正向的空间自相关性, 相比地理位置相邻, 水足迹的空间相关性受人口数量因素影响更大, 表现出明显的“高高”聚集和“低低”聚集特征, 但是受到经济因素的主要影响, 区域间水足迹空间相关性随时间发展逐渐下降。③人口数量是山东省水足迹增长的重要来源, 经济增长是推动各地区间水资源竞争关系的最重要因素。城镇化能够缓解本地水资源压力, 技术进步和产业升级不仅能缓解本地水资源压力, 而且通过空间溢出效应有效缓解临近地区水资源压力, 是实施水资源区域一体化管理策略的重要着眼点。

关键词: 水足迹; 探索性空间数据分析; STIRPAT 模型; 空间杜宾模型

Influence factors of water footprint based on spatial panel STIRPAT Model: A case study of Shandong Province

LIU Ning^{1,3}, LI Huajiao^{2,3,*}, BIAN Zhiqiang¹, LIU Xiaojia^{1,3}

1 School of Economics, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China

2 School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 101149, China

Abstract: With the increasing gap between supply and demand of water resources in China, the virtual water has become an indispensable part of regional water resources management system. It is a new research framework to improve the comprehensive utilization efficiency and explore the feasibility of regional integrated management of water resources. This paper calculated the agricultural, industrial, residential, ecological water footprints, and grey water footprints of 17 cities in Shandong Province based on a bottom-up method. Based on the spatio-temporal analysis of water footprints from 2009 to 2018, we explored the spatial autocorrelation characteristics of water footprints using the exploratory spatial data analysis method. Then, we quantified the local impact effect and spatial spillover effect of influencing factors, such as population,

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71991481, 71991480); 中央高校基本业务费(35842020061); 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室开放课题(CCA2017.06)

收稿日期: 2021-10-11; **采用日期:** 2022-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: babyproud@126.com

economic growth, technological progress, urbanization, and industrial upgrading based on the combination of the panel data STIRPAT model and the spatial Dobbins model. The results show that ① the water footprint of Shandong Province from 2009 to 2018 presented an upward trend with fluctuation. The spatial layout shows the characteristics of the high water footprint in eastern coastal cities and western plain cities but the low water footprint in central mountain cities. ② The water footprint of Shandong Province has a positively spatial autocorrelation. Compared with the geographical locations, the spatial correlation of the water footprint is more affected by the population factor, showing obvious “High-High” aggregation type and “Low-Low” aggregation type. However, this kind of effect from population factor gradually decreases with time. In recent years, the economic factors have become the main influencing factors of the spatial effect of water footprint. ③ Population is an important source of water footprint, and economic growth is the most important factor in promoting water resources competition between regions. Urbanization can alleviate the pressure on water resource demand in local cities. While, the technological progress and industrial upgrading can not only alleviate the pressure of water resources demand in the local cities but also effectively alleviate the pressure of water resources demand in adjacent cities. Therefore, the technological progress and industrial upgrading should be the focus of the regional integrated management strategy of water resources.

Key Words: water footprint; exploratory spatial data analysis; STIRPAT model; spatial Dobbins model

随着人口增加、经济增长与极端天气变化,中国水资源供需矛盾日益加剧。传统的单纯考虑实体水的水资源管理理念具有一定的局限性,“以水治水”思想重视水资源的自然属性,强调水量、水质与生态管理,忽略了水资源的经济属性^[1-2]。水资源短缺受到了人类对水资源开发利用的影响,是社会有机系统中不可忽视的约束条件^[3]。2002年荷兰学者 Hoekstra 提出的水足迹理论提供了解决水资源供需矛盾的新思路。水足迹指生产人类社会所需的商品或服务所消耗的水资源,不仅包括生产中的直接用水,也包括了来自供应链上的间接用水^[4-5]。水足迹核算是一种刻画社会经济发展对水资源占用情况的综合评价指标,区别于传统的取水指标,是评价水资源可持续发展与公平利用的基础,也是地区社会、经济与环境评价体系中的重要维度^[6]。

水足迹核算方法可以归纳为“自上而下”分析法与“自下而上”分析法^[7]。“自上而下”分析法基于消费平衡理论,采用投入产出表及相关数学模型,以产业部门之间虚拟水流动为媒介,分析经济系统中产业间相互依存关系^[8]。投入产出分析不仅体现了产业间水资源关联关系,而且能够识别区域对外部水资源的依赖程度^[1]。不足之处在于核算的水足迹总量偏小,投入产出分析法以地区产业部门消费的实体水为基础,主要量化的是蓝水足迹在各产业部门间配置与流动,忽略了绿水足迹和灰水足迹,也难以量化农业部门中各种农产品的水足迹。此外投入产出分析法对贸易数据要求较高,适宜研究较大空间尺度上的水足迹,如国家之间、省际间等,对较小空间尺度上如城市之间贸易关联量化困难,考虑到中国地区之间用水情况的差异性,在较小空间尺度上分析水足迹更有利于提高科学性^[7]。“自下而上”法如“生产树”法,核算的是一个区域内所有产品生产过程的总水资源,包括蓝水、绿水和灰水,其中核算产品的单位虚拟水含量是关键^[9]。“自下而上”分析法优点是涵盖所有的水资源,且可以追踪产品的原产地,核算的水足迹空间分布精度高,适宜于研究较小空间尺度上的水足迹问题^[10]。不足之处是难以表现地区之间水足迹的空间关联关系^[11-12]。随着国内贸易发展,区域间用水日益紧密,水资源的空间溢出效应普遍存在,一些学者尝试引入空间计量模型方法,将水足迹的空间关联性看作是空间距离与影响要素流动的函数,因此对水足迹的影响因素的量化就十分重要^[13-14]。

根据比较优势理论,水资源短缺地区应该放弃生产水资源密集型产品转而从别国进口,从而缓解本地区水资源压力^[3]。这种以节水为最优目标的水资源管理策略提高了水资源的对外依赖度,增加了本地的风险,特别是粮食风险^[15]。现实经济发展中水资源流动方向往往相反,如中国存在由北向南和由西向东的两个主要的水资源流动路径^[16]。这是因为地区水资源管理中还考虑社会发展相关因素的机会成本与生产技术水平等因素的影响^[3]。影响水足迹的相关因素包括人类社会消费模式、水资源生产能力和经济收入水平等各个

方面^[17], 如一个地区的国内生产总值(GDP)和人口数量增长会提高水足迹, 但是通过技术进步和改善膳食结构会降低水足迹等^[18]。为了估计人文驱动因素对生态环境的影响, 随机回归影响模型(STIRPAT 模型)被广泛应用于碳排放、生态足迹和水足迹影响因素分析中, 如刘红梅等^[11]、龙爱华等^[17]、孙才志等^[19]、姜秋香等^[20]等。STIRPAT 模型提供了水足迹与影响因素之间的因果分析框架, 将影响因素归纳为人口、富裕程度和技术, 同时容许研究者根据研究对象特征扩展其他控制因素^[21]。不足之处是传统的基于回归分析的 STIRPAT 模型只考虑影响因素的本地效应, 而地区之间人口、经济与技术等因素存在着空间交流, 会产生空间溢出效应, 此外根据水资源稀缺性特征, 地区之间水资源利用存在着竞争关系, 会产生水足迹的空间交互作用, 因此对水足迹的空间分析不可或缺。当前对农业水足迹影响因素的研究中有学者考虑的空间效应分析^[11], 但是对区域水足迹总量影响因素的空间效应分析较少。

综上所述, 本文将水足迹的空间自相关效应与影响因素的空间溢出效应纳入水足迹的 STIRPAT 模型分析框架中, 既考虑了区域间水足迹的时空关联关系, 又考虑了区域间社会经济综合因素的空间交互影响, 有助于制定更合理的水资源综合管理策略。基于此, 本文采用“自下而上”法核算了 2009—2018 年山东省 17 个城市的水足迹面板数据, 采用空间杜宾模型与扩展的 STIRPAT 模型相结合, 从空间自相关角度研究水足迹的空间依赖关系, 从空间溢出效应角度揭示人口、富裕程度、技术等影响因素的作用机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域

山东省是中国东部经济最发达地区之一, 也是中国北方资源型缺水的地区。2018 年人均水资源占有量仅 315 m³, 属于严重缺水地区。水资源短缺是山东省的基本省情, 以约占全国 1% 的水资源养育了约占全国 7% 的人口, 灌溉了约 6% 的耕地, 支撑了约 9% 的经济总量。2018 年山东省提出实施新旧动能转换工程, 对社会经济生态可持续发展提出了新的要求, 也对水资源管理方式提出了新的要求。山东省作为经济发达省份却面临转型困境, 具有典型性。因此以山东省水足迹为例, 研究水足迹的影响因素, 探索行政区内各地市之间水资源的空间关联性与相关因素的空间溢出性, 为地区水资源一体化管理提供样本支持。

1.2 研究方法

研究方法包括水足迹核算、空间统计特征分析和水足迹影响因素分析三部分。(1)水足迹核算, 工业用水、生活用水和生态用水直接采用山东省统计年鉴中对应的蓝水足迹。农业水足迹采用“作物需水量法”计算了山东省主要种植作物、畜牧产品和水产品消耗的蓝绿水消耗量。种植作物核算种类包括夏粮、秋粮、油料、棉花、水果, 畜牧产品核算种类包括猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、牛奶、禽蛋, 水产品核算种类合并计算淡水鱼类和海水鱼类。灰水足迹核算了农业部门、工业部门和居民生活部门污水排放污染物净化用水。(2)空间统计分析, 采用全局空间自相关莫兰指数和局部空间自相关莫兰指数分析水足迹的空间自相关性。(3)水足迹影响因素分析, 采用空间面板数据的 STIRPAT 扩展模型和空间杜宾模型, 量化了水足迹的空间自相关效应与影响因素的空间溢出效应。方法具体步骤如图 1:

1.2.1 山东省水足迹(WF)

山东省水足迹公式如下:

$$WF = WF_{agr} + WF_{ind} + WF_{peo} + WF_{eco} + WF_{grey} \quad (1)$$

式中, WF 为山东省水足迹, 由农业水足迹 WF_{agr} , 工业用水 WF_{ind} , 居民生活用水 WF_{peo} , 生态环境用水 WF_{eco} 和灰水足迹 WF_{grey} 构成。

(1) 农业水足迹(WF_{agr})

农业水足迹由山东省主要农产品水足迹计算所得, 公式如下:

$$WF_{agr} = WF_c + WF_a + WF_f \quad (2)$$

式中, 农业水足迹由种植作物水足迹 WF_c 、畜牧产品水足迹 WF_a 和水产品水足迹 WF_f 构成。

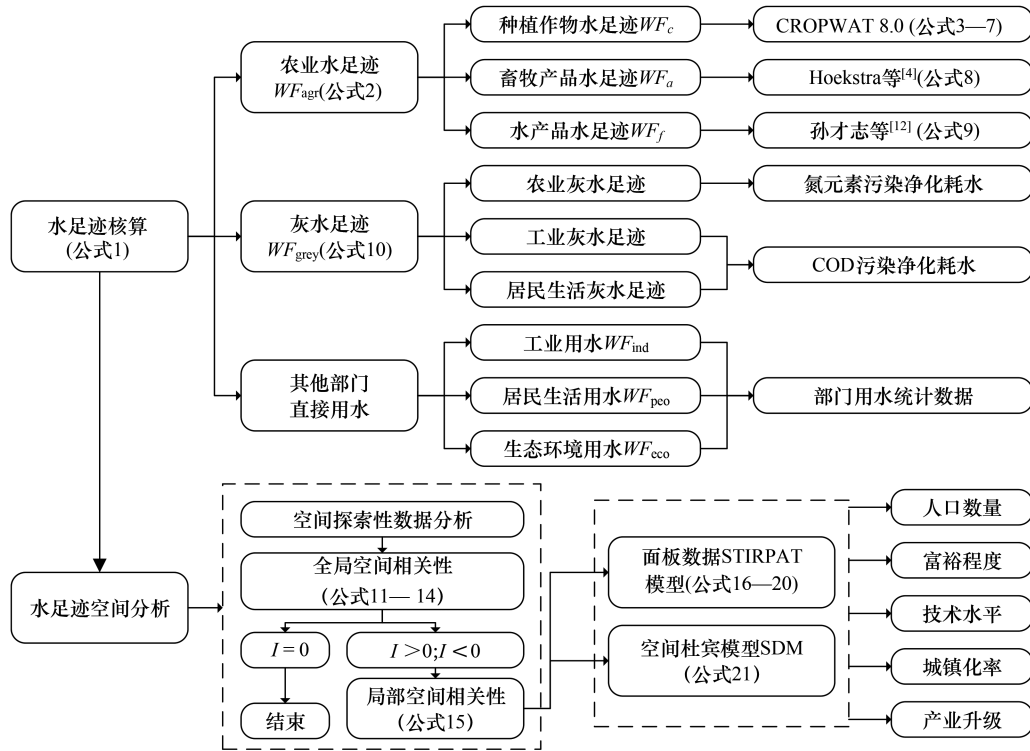


图1 水足迹影响因素研究方法框架图

Fig.1 The framework of research methods

①种植作物 *c* 水足迹 (WF_c)

种植作物水足迹核算采用“作物需水量法”,核算种植作物蓝绿水足迹,公式如下:

$$WF_c = VW_c \times Y \tag{3}$$

$$Y = Y_c \times S_c \tag{4}$$

$$VW_c = \frac{CWR_c}{Y_c} \tag{5}$$

$$CWR_c = 10 \times ET_c \tag{6}$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \tag{7}$$

式中, VW_c 为种植作物 *c* 的单位虚拟水含量; Y 为区域作物 *c* 的总产量。 Y_c 为每公顷土地的作物产量; S_c 为区域某作物种植面积。 CWR_c 为在一定气候条件下作物生长期需水量。 ET_c 为农作物实际生长发育期内累计的土壤水分蒸发蒸腾量。 K_c 为各生育阶段平均作物系数; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量。

②畜牧产品 *a* 水足迹 (WF_a)

畜牧产品水足迹公式如下:

$$WF_a = VW_a \times Y_a \tag{8}$$

式中, VW_a 为畜牧产品 *a* 的单位虚拟水含量^[4]; Y_a 为畜牧产品 *a* 总产量。

③水产品 *f* 水足迹 (WF_f)

水产品的水足迹由淡水产品和海水产品水足迹总量组成,公式如下:

$$WF_f = VW_f \times Y_f \tag{9}$$

式中, VW_f 为水产品 *f* 的单位虚拟水含量^[12]; Y_f 为水产品 *f* 总产量。

(2) 灰水足迹 (WF_{grey})

灰水足迹由净化农作物氮元素污染、工业污水和居民污水污染物所需要淡水总量组成^[5],公式如下:

$$WF_{\text{grey}} = \frac{P_i}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (10)$$

式中, P_i 为在农业部门中选取氮元素的排放数量, 采用 10% 淋溶率^[12], 根据农作物氮肥数据计算而来; 在工业、居民部门中选取污水排放中总氮和 COD 污染物中较大的数据; C_{max} 为要素的环境最大容纳度; C_{nat} 为要素的环境自然本地浓度。

1.2.2 空间效应方法

空间效应是指事物的位置越近越相关, 位置越远相关性越低^[22]。检验空间效应的方法包括空间统计分析和空间计量分析。空间统计分析方法针对研究数据进行估计、检验, 目的在于分析研究数据的空间聚集形态, 本文采用探索性空间数据分析法中的全局空间自相关莫兰指数和局部空间自相关莫兰指数。

(1) 探索性空间数据分析法

① 全局空间自相关性

全局空间自相关 Moran's I 指数从整体视角表现数据是否具有空间相关性, 但是不能表现具体的聚集类型^[23]。公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} z_i z_j}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (11)$$

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (14)$$

式中, n 为观察值的数目, x_i 为地区 i 的观察值, z_i 为 x_i 的标准化变化, W_{ij} 为空间权重矩阵。Moran's $I \in [-1, 1]$, 当取值位于 $[-1, 0)$ 时, 为空间负相关; 取值为 0 时, 为空间不相关; 当取值为 $(0, 1]$ 时, 为空间正相关。

② 局部空间相关性

局部空间自相关 Moran's I 指数能够表现研究数据的具体聚集类型。公式如下:

$$I_i(d) = z_i \sum_{j \neq i}^n W_{ij}' z_j \quad (15)$$

式中, $I_i(d) > 0$, 表示同种类型属性值的地区临近, $I_i(d) < 0$, 表示不同类型属性值的地区相临近。绝对值越大, 临近程度越大。

1.2.3 影响因素的空间分析模型

STIRPAT 模型是 York 在 Ehrlich 和 Holdren^[24] 提出的经典环境压力评价模型 IPAT 模型基础上为计量影响因素对环境的非线性随机关系提出的, 公式如下:

$$I = a P^b A^c T^d \varepsilon \quad (16)$$

式中, 环境影响 (I) 分别受影响因素人口规模 (P), 富裕程度 (A) 和技术水平 (T) 影响弹性为 b, c, d ; a 为常数项, ε 为随机误差项。

山东省正在推行新旧动能转换工程, 其中重要的政策着力点是推动城镇化快速发展与产业结构转换升级, 随之而来的消费结构变化与产业结构变化同山东省水足迹密切关联, 因此将水足迹 STIRPAT 模型扩展为:

$$I = a \times P^{\beta_1} A^{\beta_2} T^{\beta_3} U^{\beta_4} S^{\beta_5} \times \varepsilon \quad (17)$$

式中, I 为水足迹, P 为人口规模 (年末总人口数), A 为富裕程度 (GDP), T 为技术水平 (专利授权数量), U 为

城镇化率, S 为产业升级指数(公式 18); 影响因素对水足迹的影响弹性为 β_i , 体现了影响因素的本地效应; a 为常数项, ε 为随机误差项。

$$S = \sum_{i=1}^3 q_i \times i \quad (18)$$

式中 q_i 为第 i 产业产值的比值。

将水足迹的空间自相关效应和影响因素的空间溢出效应引入 STIRPAT 扩展模型中, 得到公式:

$$I = a \times P^{\beta_1} A^{\beta_2} T^{\beta_3} U^{\beta_4} S^{\beta_5} \times P^W \times P^{W\theta_1} A^{W\theta_2} T^{W\theta_3} U^{W\theta_4} S^{W\theta_5} \times \varepsilon \quad (19)$$

式中, ρ 为水足迹总量的空间自相关系数, W 为空间权重矩阵, P^W 体现了水足迹的空间效应; θ_i 为影响因素的空间回归系数, $P^{W\theta_1} A^{W\theta_2} T^{W\theta_3} U^{W\theta_4} S^{W\theta_5}$ 体现了影响因素的空间溢出效应。两边取对数, 转换为线性公式, 便于计算。公式如下:

$$\ln(I) = a + \beta_1 \ln(P) + \beta_2 \ln(A) + \beta_3 \ln(T) + \beta_4 \ln(U) + \beta_5 \ln(S) + \rho W \ln(I) + W\theta_1 \ln(P) + W\theta_2 \ln(A) + W\theta_3 \ln(T) + W\theta_4 \ln(U) + W\theta_5 \ln(S) + \varepsilon \quad (20)$$

可以归纳为空间杜宾模型^[25], 公式为:

$$y = a + \rho W y + \sum_{i=1}^5 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^5 \theta_i W X_i + \varepsilon \quad (21)$$

式中, y 为水足迹 I 的对数, X_i 为影响因素 P 、 A 、 T 、 U 、 S 的对数。

1.3 数据来源

工业、生活和生态用水数据来源于山东省水资源公报。农业水足迹计算中使用的农产品产量、作物种植面积、畜牧产品产量、水产品产量数据来源于山东省各城市统计年鉴(2010—2019年), 种植类农作物蒸发蒸腾(ET_0)数据来源于联合国粮农组织 FAO CLIMWAT 2.0 数据库, 计算得到 2009—2018 年山东 17 个城市农产品单位虚拟水含量 VW_c (表 1)。畜牧产品单位虚拟水含量 VW_a 来源于 Hoekstra 和 Chapagain 研究成果(表 2)^[4]。水产品单位耗水量 VW_f 来源于孙才志研究成果(表 2)^[12]。灰水足迹计算了农业氮元素污染足迹、工业污水足迹和生活污水足迹。其中农业污水足迹计算中采用的氮肥数据、工业和生活污水排放的 COD 和总氮来源于山东省统计年鉴 2010—2019。氮肥淋溶率采用 10%。农业、工业和生活污水足迹计算中 COD 和总氮的最大浓度 C_{max} 数据来源于山东省流域水污染物综合排放标准(DB37 3416—2018)中最高二级排放标准计算, 达标浓度分别为 60 毫克/升和 50 毫克/升。灰水足迹计算中设定自然水体中的氮元素的本底浓度 C_{nat} 设为零。影响因素指标中年末总人口数、GDP、专利授权数量、城镇化率、三次产业产值数据来源于山东省统计年鉴。

2 结果与分析

2.1 山东省水足迹分析

由图 2 可知, 2009—2018 年山东省水足迹总量波动上升趋势, 其中农业水足迹、工业水足迹、生活水足迹和生态水足迹均波动上升, 灰水足迹呈现先上升后下降趋势。农业水足迹波动上升原因在于十年内除棉花以外的农作物、畜牧业和渔业产量不断增加, 带动水足迹数量波动上升, 且山东省农业种植结构与养殖结构没有发生大规模调整, 因此农业水足迹保持了较为稳定的增长趋势。随着经济增长和人口增加, 山东省的工业用水和居民用水逐渐增加。随着城镇化发展对河湖湿地环境质量要求提升以及山东省出台城镇街道扬尘治理措施等, 提高了生态用水量。灰水足迹下降趋势得益于农作物氮元素污染数量下降, 超过了工业污水和生活污水的增长幅度。

从各城市水足迹城市差异看(图 3), 17 个城市水足迹显示出四周高中间低的布局特点, 东部沿海地区和西部平原地区水足迹高, 中部山地水足迹最低。水足迹大于 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的城市有烟台、潍坊、菏泽和济宁。四个城市的居民生活灰水足迹普遍表现突出, 尤其是菏泽的居民生活灰水足迹全省排名第一。水足迹大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的城市数量占全部城市的 50% 左右, 分布在山东省的西北和西南方向。淄博同莱芜一起, 构成了

表 1 2009—2018 年山东省农作物单位虚拟水含量/(m³/kg)
Table 1 Virtual water of agricultural products in Shandong province from 2009 to 2018

地区 Region	夏粮 Summer harvest grain			秋粮 Autumn harvest grain				油料 Oil-bearing crops				水果 Fruits			
	小麦 Wheat	稻米 Rice	谷子 Millet	玉米 Corn	高粱 Chinese sorghum	豆类 Beans	薯类 Tubers	花生 Peanuts	棉花 Cotton	蔬菜 Vegetable	瓜类 Melon	苹果 Apple	梨 Pear	葡萄 Grape	桃子 Peach
济南	0.76	0.80	0.74	0.79	1.69	0.93	0.61	1.09	3.69	0.05	0.20	0.42	0.32	0.24	0.37
青岛	0.81	0.96	0.73	0.73	1.24	1.11	0.52	1.01	3.78	0.06	0.09	0.22	0.22	0.16	0.34
淄博	0.79	0.84	0.73	0.99	1.50	1.11	0.73	1.32	3.82	0.05	0.09	0.21	0.37	0.13	0.25
枣庄	0.84	0.87	0.78	0.81	1.15	0.85	0.49	1.12	3.50	0.07	0.10	0.38	0.28	0.34	0.42
东营	0.92	1.20	0.95	1.28	1.28	1.64	0.68	1.78	5.52	0.06	0.13	0.45	0.61	0.22	1.22
烟台	1.03	0.97	0.89	1.00	1.01	1.16	0.61	1.28	4.16	0.08	0.12	0.23	0.29	0.22	0.35
潍坊	0.86	0.96	0.83	0.93	1.73	1.03	0.63	1.03	4.50	0.06	0.10	0.24	0.24	0.16	0.33
济宁	0.79	0.78	0.73	0.77	1.18	1.01	0.53	1.09	3.62	0.09	0.10	0.33	0.34	0.16	0.55
泰安	0.65	0.65	0.59	0.75	1.11	0.87	0.55	0.94	3.30	0.05	0.09	0.28	0.26	0.19	0.27
威海	0.76	—	0.68	—	1.34	0.88	0.43	0.99	—	0.06	0.08	0.20	0.26	0.24	0.30
日照	0.87	0.76	0.76	0.72	0.99	0.93	0.46	1.05	3.94	0.06	0.09	0.31	0.26	0.24	0.47
莱芜	0.78	0.91	0.79	1.03	1.56	1.04	0.53	1.83	3.06	0.09	0.11	0.65	0.60	0.37	0.82
临沂	0.81	0.69	0.76	0.84	1.36	1.03	0.51	0.94	3.49	0.07	0.08	0.24	0.25	0.14	0.24
德州	0.78	—	0.75	—	—	1.09	0.57	1.13	3.65	0.07	0.09	0.29	0.26	0.18	0.29
聊城	0.82	1.10	0.83	1.08	1.64	1.10	0.56	1.19	4.17	0.07	0.10	0.39	0.37	0.25	0.59
滨州	0.82	1.10	0.83	1.08	1.64	1.10	0.56	1.52	4.54	0.07	0.11	0.28	0.25	0.16	0.26
菏泽	0.85	0.74	0.88	0.86	1.25	1.06	0.73	1.13	3.70	0.08	0.11	0.26	0.20	0.20	0.22

根据 CLIMWAT 2.0 数据库计算

表 2 2009—2018 年山东省动物产品单位虚拟水含量^[4,12]/(m³/kg)

Table 2 Virtual water of animal products in Shandong province from 2009 to 2018						
牛肉 Beef	猪肉 Pork	羊肉 Mutton	禽肉 Poultry Meat	牛奶 Milk	禽蛋 Poultry Eggs	水产品 Aquatic Products
19.99	3.7	18.01	3.5	2.2	8.65	5

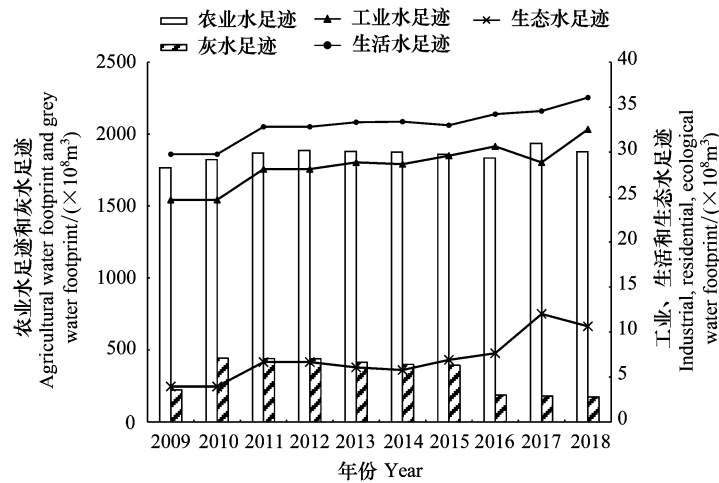


图 2 2009—2018 年山东省水足迹

Fig.2 Water footprint of Shandong province from 2009 to 2018

山东省中部地区的水足迹洼地地带。莱芜水足迹数量低的原因在于地区面积小,人口数量少。淄博除工业水足迹以外,其余部门用水数量在十年间不断下降,特色农业比例高,传统农业占比低,十年间每公顷土地平均用水量下降了 35.5%。

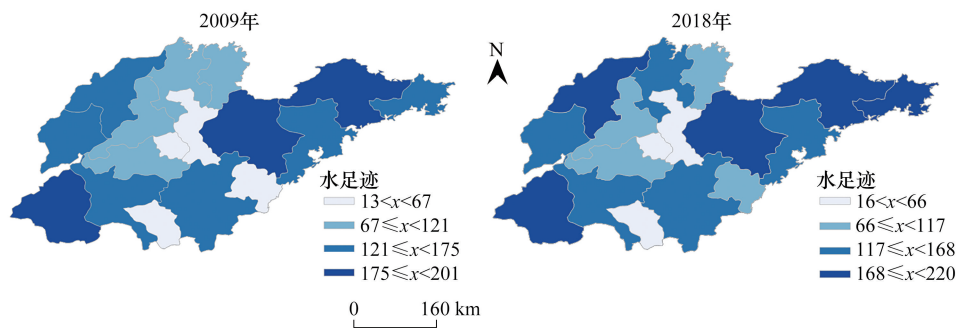


图 3 2009 和 2018 年山东省水足迹四分位图/(10⁸ m³)

Fig.3 Quartile map of water footprint of Shandong province in 2009 and 2018

2.2 水足迹空间效应分析

(1) 全局空间自相关分析

采用三种常见的空间权重矩阵建立方法(表 3),即临近空间权重矩阵 W2、地理距离权重矩阵 W3 和经济类距离权重矩阵 W1,其中经济类距离权重矩阵通过实验采用人口距离权重矩阵。

W1 和 W2 两种矩阵得到的 Moran's I 为正值,W3 矩阵得到的 Moran's I 为零值左右。说明山东省水足迹在地理位置相近和人口规模相似的城市间存在着显著的正向空间相关性,对实际地理距离的空间依赖性较小。相对于地理位置相邻,人口距离权重矩阵更显著,说明人口数量相似地区之间水足迹的相关性更高。

2009—2018 年 Moran's I 呈现下降趋势,水足迹同人口数量空间分布的相关性在逐渐减弱,人口数量相似的城市之间水足迹的差异性在逐渐扩大,而空间聚集带来的相关性在逐渐增加。因此,研究山东省水足迹的影响因素中,除传统的人口要素以外,还需要考虑空间因素及其他因素的综合影响。

表 3 2009—2018 年山东省水足迹 Moran's I Table 3 Moran's I of water footprint of Shandong province from 2009 to 2018

年份 Year	人口距离权重矩阵 W1 Population weight matrix			临近空间权重矩阵 W2 Adjacent weight matrix			地理距离权重矩阵 W3 Geographic weight matrix		
	I	Z	P	I	Z	P	I	Z	P
2009	0.799	6.089	0.001	0.208	1.558	0.074	0.055	0.880	0.177
2010	0.508	4.064	0.004	0.149	1.195	0.120	-0.001	0.470	0.285
2011	0.497	3.995	0.004	0.144	1.171	0.131	-0.010	0.404	0.309
2012	0.464	3.773	0.006	0.147	1.188	0.122	-0.011	0.396	0.306
2013	0.413	3.376	0.006	0.157	1.240	0.116	-0.002	0.464	0.281
2014	0.365	3.049	0.010	0.186	1.406	0.096	0.037	0.756	0.206
2015	0.296	2.536	0.020	0.214	1.565	0.070	0.067	0.974	0.161
2016	0.218	1.976	0.040	0.267	1.876	0.040	0.111	1.298	0.105
2017	0.202	1.789	0.049	0.214	1.540	0.067	0.060	0.914	0.179
2018	0.191	1.863	0.050	0.225	1.594	0.050	0.067	0.961	0.168

(2) 局部空间自相关分析

山东省水足迹 LISA 聚集类型为高高(HH)、低低(LL)和低高(LH)三种类型(图 4)。HH 聚集分布在山东省胶东地区和鲁西平原。胶东地区的烟台、潍坊、威海与青岛都有农业水足迹高的特点,从农业结构来看四个地市农业结构之间具有比较好的互补性,烟台和威海水产品水足迹最高,潍坊的肉类和蔬菜水足迹最高,青岛的农业水足迹较为均衡。鲁西平原的菏泽、聊城、德州和济宁除了农业水足迹较高以外,还具有灰水足迹高的特点。四个地市农业结构水足迹同质化严重,均主要来源于粮食类、肉类和禽蛋农产品耗水,由于氮肥使用数量高,导致农业灰水足迹普遍高。LL 聚集区包括泰安、淄博、东营、枣庄和日照,这些地市呈现养殖业水足迹高于种植业的特点,水足迹结构中均以肉类和禽蛋水足迹为主。此外,由于种植业面积小,氮肥使用量少,农业灰水足迹全省排名也较低。LH 聚集区主要在济南,形成水足迹洼地。济南除工业和生活灰水足迹较高以外,其他水足迹均较低,而周围的滨州表现出明显的水足迹增长,导致济南地区 LH 聚集特征的形成。综上,水足迹结构差异性与水足迹数量差异性较强的地区,如胶东地区和济南地区,水资源利用的比较优势明显,有利于发挥地区相对优势,同临近地区形成协同合作关系,因此具备了水资源区域一体化管理的良好基础。而鲁西平原地区各地市水足迹结构具有较强的同质性,在水资源利用中竞争性关系更为明显,不利于构建区域一体化管理体系。

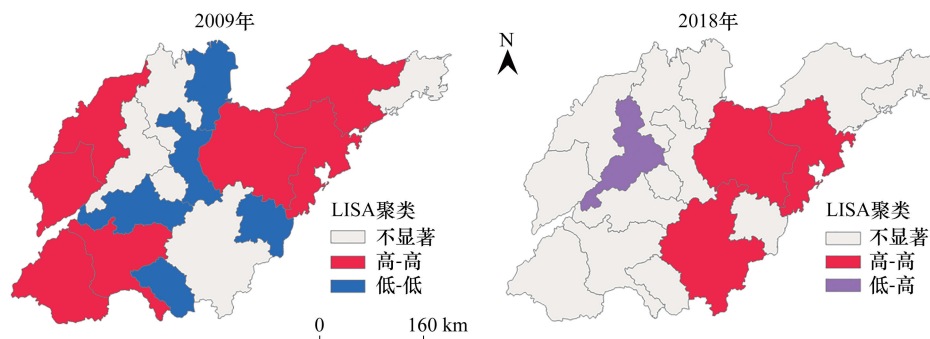


图 4 2009 和 2018 年山东省 LISA 聚类地图

Fig.4 LISA clustering map of Shandong Province in 2009 and 2018

从时间变化趋势来看,山东省 17 个城市之间显示出聚集性特征的地区在逐渐减少,由占全部城市数量的 70.6% 下降到 23.5%,地理位置相邻、人口数量相近的城市之间水足迹的空间相关性逐渐降低。十年间山东省内部各城市的产业、人口、区域发展速度不同,对本地区和周边地区水足迹产生了不同程度的影响。因此需要综合多种影响因素,分析其对水足迹变化的空间作用机制。

2.3 水足迹影响因素分析

表 4 为山东省水足迹影响因素结果,模型 1 考察人口数量 (X_1)、富裕程度 (X_2) 和技术水平 (X_3) 三种因素的空间溢出效应和水足迹的空间自相关效应。模型 2 在模型 1 基础上加入城镇化率 (X_4)。模型 3 在模型 1 基础上加入产业升级指数 (X_5)。模型 4 综合 $X_1—X_5$,考察综合影响。根据拉格朗日乘数检验 (LM 检验) 结果,结合拟合优度 (R^2),本文采用时间空间双固定效应模型检验水足迹的空间自相关效应与影响因素的空间溢出效应。

表 4 山东省水足迹影响因素时空双固定效应估计结果

Table 4 Spillover effect of influence factors on water footprint of Shandong province

指标 Index	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4
X_1	0.933 *** (13.373)	0.692 *** (8.731)	0.829 *** (12.699)	0.700 *** (9.246)
X_2	0.260 *** (2.739)	0.494 *** (5.126)	0.332 *** (3.618)	0.437 *** (4.529)
X_3	-0.255 *** (-5.338)	-0.140 *** (-2.9)	-0.128 *** (-2.699)	-0.097 ** (-2.052)
X_4	—	-0.999 *** (-5.057)	—	-0.694 *** (-3.138)
X_5	—	—	-4.388 *** (-4.104)	-2.358 * (-1.940)
θ_1	-0.226 (-1.223)	-0.153 (-0.846)	-0.428 ** (-2.431)	-0.243 (-1.347)
θ_2	0.936 *** (5.188)	1.169 *** (5.976)	1.547 *** (7.288)	1.552 *** (7.354)
θ_3	-0.381 *** (-3.615)	-0.269 *** (-2.69)	-0.093 (-0.915)	-0.122 (-1.232)
θ_4	—	-0.216 (-0.745)	—	0.351 (1.027)
θ_5	—	—	-13.402 *** (-4.515)	-13.720 *** (-3.605)
ρ	0.361 *** (4.054)	0.175 * (1.74)	0.037 (0.344)	-0.012 (0.913)
a	-5.762 *** (-4.75)	-4.652 *** (-4.151)	85.788 *** (6.076)	76.786 (4.419)
R^2	0.759	0.803	0.812	0.823
Log-L	-52.963	-33.828	-29.147	-24.333

X_1 :人口数量; X_2 :富裕程度; X_3 :技术水平; X_4 :城镇化率; X_5 :产业升级指数; $\theta_1—\theta_5$:人口数量、富裕程度、技术水平、城镇化率和产业升级指数对水足迹的空间回归系数; ρ :水足迹空间自相关系数; a :常数项; R^2 :拟合优度; $Log-L$:对数似然度;括号内为对应的 t 值;*, **, *** 显著性水平分别对应为 10%, 5%, 1%。

表 4 的模型 1 结果来看,水足迹的空间自相关系数 ρ 为 0.361,并且在 0.01 的水平上显著,说明山东省内相邻地市之间水足迹是正向相关的。其影响因素的作用方式体现为人口数量(0.933)和富裕程度的本地效应为正值(0.263),而技术进步的本地效应为负值(-0.255)。说明人口数量和富裕程度是促进本地水足迹增长的因素,而技术进步则能够抑制水足迹增长,这与前人对中国水足迹驱动因素研究结果一致,如 Zhao 等^[26],张凡凡等^[27]。这主要是因为人口数量增加,直接增加本地区生活用水,净化生活污水所需灰水足迹也会相应提升,导致本地区水足迹增长,经济增长通过增加农业用水、工业用水和灰水足迹引起本地水足迹增长。从现实社会经济发展角度,抑制人口数量与经济增长是不现实的,也是不可持续的,可以通过提高地区技术水平节约水资源,缓解人口和经济增长对水资源的压力。考虑地区之间的空间影响,人口数量的空间溢出效应不显著,富裕程度的空间溢出效应为正(0.936),技术进步的空间溢出效应为负(-0.381)。说明山东省水足迹空间关联的影响机制主要通过经济发展与技术进步的溢出效应起作用,本地经济总量扩张不仅消耗本地水足迹,并且对临近地区产生了水资源需求,会加大地区之间水资源竞争,但是一个地区提高技术水平,也能够产生技术的空间溢出,从而缓解地区之间的用水竞争关系。由此推断,区域总体技术水平进步是水足迹区域一体化管理政策的重要着眼点之一,可以在不限制人口数量与经济增长的基础上,实现全区域的节水目标。

模型 2、模型 3 和模型 4 结果显示,在城镇化和产业升级的影响下,水足迹的空间自相关效应下降。模型 2 增加城镇化因素后水足迹的空间自相关系数下降为 0.175,模型 3 增加产业升级因素时水足迹的空间自相关效应不显著,模型 4 二者同时作用于水足迹时,水足迹的空间自相关系数为负值。说明地区在增加人口与发展经济时,需要调控人口增长结构和经济发展结构,人口结构以城镇人口增长为主,经济结构以产业高级化发展为主,能够有效缓解水资源的区域竞争。城镇化的本地影响系数为-0.999,空间溢出效应不显著,说明城镇化是降低本地水足迹的重要途径,但是对临近地区影响不大。产业升级的本地影响系数为-4.388,空间溢出系数为-13.402,说明产业升级也是水资源区域一体化管理的重要着眼点,不仅有效降低本地水足迹,而且能够带动邻近地区水足迹有效降低,大大缓解由于人口增加、经济发展而带来的水资源需求压力。

3 讨论

山东省水足迹数量先抑后扬整体呈现波动上升趋势是多维度影响因素的综合作用结果,影响水足迹的各个关键因素作用方向不同,作用力大小不同,因此应该扬长避短,探索水资源管理政策的着力点。对影响因素的本地效应分析后发现,人口数量与经济发展是山东省水足迹增长的主要因素,技术进步是抑制水足迹增长的因素,这与前人研究结论一致,如张凡凡^[27]提出应该考虑将控制人口数量作为降低水足迹强度的突破口,刘红梅^[11]研究提出经济发展水平高导致居民更偏好消费虚拟水高的农产品。但是控制人口数量与经济发展是不现实的,也是与区域可持续发展目标相违背的,因此如何能够在增加人口和发展经济的同时,控制水足迹的数量尤为重要。

文章发现技术进步和产业升级两种影响因素对水足迹的抑制效应存在“内外兼修”作用,二者的本地影响系数和空间溢出系数均为负值,说明推动技术进步和产业升级是既有利于本地节水,又有利于临近地区节水的措施。本文中技术进步采用的专利授权数量体现的是广义的技术进步,代表了社会整体技术水平,说明构建创新型社会与提高地区整体技术创新水平有利于水资源节约。产业升级指数对非农产业赋予更大的权重,因此二三产业产值比重越高越有助于地区水资源节约。山东省围绕科学与技术创新、产业升级出台一系列宏观政策与产业政策,如《山东省中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《山东省人民政府办公厅关于印发山东省六大传统产业转型升级指导计划的通知》等,整体上提高了山东省水资源节约能力,但是科技经费投入和产业发展政策一定程度上存在行政壁垒和区域壁垒,应该借助更大范围上区域发展的力量,从区域一体化发展视角,提高区域整体技术水平,促进区域整体产业结构升级,有助于构建区域整体节水的“共赢机制”。此外,城镇化发展有利于降低本地水足迹,其本地影响系数为负值,且将人口因素的本地影响系数从 0.933 下降到 0.692,说明了山东省城镇化人口主要来源于本地农村人口转化,吸引的外地新增人口数量影响较少。本地城镇化水平的提高,对临近地区水资源不会产生影响,因此区域一体化发展策略能够容纳城市体系多极化发展。

最后,通过对水足迹空间效应分析可知,山东省水资源存在空间正相关关系,因此在空间布局上显示出明显的“高高”聚集和“低低”聚集,为水资源区域一体化管理提供了空间划分的依据。鲁西平原各地市之间用水结构同质化严重,竞争性更强,要实现水资源一体化管理必须充分考虑水资源禀赋以外的其他社会因素的影响,从更大的区域一体化视角出发,合理规划产业升级的发展方向,发挥相对优势。胶东地区各地市之间用水结构差异化明显,能够形成良好的互补,从水资源需求管理角度为一体化管理和统一配置提供了可能性。考虑到山东省正在推行的新旧动能转换工程,对技术进步与产业升级的重视及实证结果,可以推断山东省已经具备了推动水资源区域一体化管理的条件,可以在高水足迹聚集地区如胶东地区推行水资源一体化管理试点。

4 结论与建议

本文从“水资源供需矛盾加剧对水资源管理方式提出更高要求”的现实问题出发,探讨了水足迹的量化

及影响因素。得到以下结论:

(1) 山东省水足迹总量随时间变化呈现波动上升趋势,其中农业、工业、生活和生态水足迹均呈上升趋势,灰水足迹却有所下降。说明山东省淡水资源消耗虽然逐步增加,但是污水净化所浪费的水资源数量有所减少。空间布局表现出四周地市高中间地市低的特点,胶东地区和鲁西平原地区水足迹高,鲁中山地水足迹低。

(2) 山东省水足迹具有正向的空间自相关性,主要呈现 HH 型和 LL 型聚集,相邻地市水足迹数量较为接近。相比空间相邻或相近,以人口作为空间权重得到的莫兰指数最大,即人口数量相似的城市在水足迹总量上具有更强的相关性。但是随着时间推移,受到了经济因素影响,经济因素逐渐成为影响水足迹空间相关性的主要因素。

(3) 人口扩张和经济增长是山东省水足迹增长的重要来源,尤其是经济增长本地影响系数为 0.26,空间溢出系数为 0.936,形成了对本地和临近地区两方面的水资源需求压力,是推动山东省各地区间水资源竞争关系的最重要因素。但是山东省技术进步、城镇化和产业升级因素缓解这种水资源增长压力与竞争关系。城镇化主要缓解本地水资源压力,技术进步和产业升级不仅能缓解本地水资源压力,而且通过空间溢出效应有效缓解临近地区水资源压力,是实施水资源区域一体化管理策略的重要着眼点。

综上,从水足迹视角提出地区水资源综合管理的政策建议:

(1) 以胶东地区青岛、烟台、威海、潍坊和日照为试点,构建区域水资源一体化管理体系。胶东地区是山东省水足迹“高高”聚集区,且水足迹构成差异性大,具备比较优势,有利于形成水资源利用的优势互补和统一配置。胶东地区水资源一体化管理体系以构建开放共享的技术体系为主,通过技术共享与空间溢出效应,形成区域节水的正反馈循环体系。

(2) 按照相对优势和互补性原则,推动鲁西平原各地市产业升级,打破现有鲁西平原各地区之间用水的同质化竞争关系。鲁西平原是山东省水足迹“高高”聚集区,但是种植结构和产业结构相似性高,不利于构建区域水资源一体化管理体系。在不减少各地市人口数量,推动各地市经济继续发展的前提下,鲁西平原各地市以提高城镇化率为支点降低本地水资源消耗水平,以构建具有相对优势的产业升级策略为支点缓解同临近地区的水资源竞争关系。

(3) 建立山东省泛水资源管理数据仓库,在水资源数据基础上结合其他生态环境、社会经济要素数据形成联动分析数据库。将大数据分析方法应用于水资源管理政策评估与决策中,建立模拟仿真系统,实行水资源政策的事前预演与压力测试,提升水资源管理政策与人口政策、经济政策和其他社会政策协调性,提高水资源管理政策的科学性。

本文也存在一定的不足之处,主要从水资源存量视角研究水足迹总量的时间趋势和空间特征,空间相关性以影响因素的空间交互作用为主,不能体现水资源的空间流动关系和依赖关系,下一步应该从山东省和周边地区的水资源投入产出关系分析,结合复杂网络模型,表现内在要素之间的空间关联,探索山东省融入更大区域实施一体化发展的可行性。

致谢:感谢山东工商学院王发明、李梦洁、杜威剑和 Muhammad Yousaf Raza,中国地质大学(北京)韩晓丹、史江兰对写作中提供的支持与帮助。

参考文献(References):

- [1] 安婷莉,韩昕雪琦,高学睿,吴普特,林历星,赵西宁,王丽珍.虚拟水理论发展及应用前景综述.南水北调与水利科技:中英文,2020,18(2):44-61.
- [2] 刘俊国,赵丹丹.“量-质-生”三维水资源短缺评价:评述及展望.科学通报,2020,65(36):4251-4261.
- [3] 田贵良.虚拟水战略的经济学解释——比较优势理论的一个分析框架.经济学家,2008(5):39-47.
- [4] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade.

- Delft: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade 12, 2003.
- [5] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1259-1276.
- [6] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. 水足迹评价手册. 北京:科学出版社, 2012:1-52.
- [7] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 马超. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较——基于“总量-相关指标-结构”分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 76-87.
- [8] 杨洋, 效存德, 王晓明, 刘世伟. 基于投入产出理论的水资源研究进展及水资源管理展望. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 214-224.
- [9] 李兆耀, 王宁, 温正, 王宗水. 水足迹研究演变与中外研究对比——基于文献计量分析. *生态经济*, 2020, 36(11): 180-187.
- [10] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [11] 刘红梅, 邓光耀, 王克强. 中国农产品虚拟水消费的影响因素分析——基于省级数据的动态空间面板 STIRPAT 模型. *中国农村经济*, 2013(8): 15-28.
- [12] 孙才志, 郑德凤, 邹玮. 中国虚拟水理论方法与实证研究. 北京: 经济科学出版社, 2019: 141-160.
- [13] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局. *生态学报*, 2017, 37(21): 7048-7060.
- [14] 岳立, 雷燕燕. 黄河流域绿色水资源效率空间关联网络构建及其演化因素. *西北师大学报: 社会科学版*, 2022, 59(2): 62-74.
- [15] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [16] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(4): 107-115.
- [17] 龙爱华, 徐中民, 王新华, 尚海洋. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响. *生态学报*, 2006, 26(10): 3358-3365.
- [18] Ye Q L, Li Y, Zhang W L, Cai W. Influential factors on water footprint: a focus on wheat production and consumption in virtual water import and export regions. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 309-315.
- [19] 孙才志, 刘淑彬. 中国膳食水足迹区域差异及驱动因素分析. *人民黄河*, 2017, 39(9): 39-45, 50.
- [20] 姜秋香, 李鑫莹, 王子龙, 张雨, 曹璐. 水足迹及其驱动力研究进展及展望. *生态科学*, 2021, 40(1): 192-199.
- [21] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [22] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46(sup1): 234-240.
- [23] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Handbook of Applied Spatial Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 73-89.
- [24] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [25] Elhorst J P. *Spatial econometrics: From cross-sectional data to spatial panels*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014:5-36.
- [26] Zhao C F, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B. Driving force analysis of water footprint change based on extended STIRPAT model: evidence from the Chinese agricultural sector. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 43-49.
- [27] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 傅汇艺, 杨兴洪. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 934-944.