



· 黄河流域生态保护和高质量发展 ·

基于多区域投入产出和 LMDI 模型的黄河流域水足迹时空演变及驱动因素分析

张子龙^{1,2,3}, 张意萍^{1,2}, 吕诗雨^{1,4}, 孙颖琦^{1,2}, 晏欣媛^{1,2}

(1. 兰州大学 资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 黄河流域绿色发展研究院, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 碳达峰碳中和研究院, 甘肃 兰州 730000; 4. 郑州航空港外国语高级中学, 河南 郑州 450000)

摘要 水资源是黄河流域生态保护和高质量发展的关键资源,而水足迹作为衡量区域水资源利用压力的关键指标,可以综合反映黄河流域水资源利用状况。因此,对黄河流域水足迹时空格局、区域间转移特征以及水足迹变化背后驱动因素的探究,可为全流域区域间协同提升水资源节约集约利用水平的相关政策制定提供科学依据。此研究构建了地级市尺度水资源多区域投入产出模型,分析了2012、2015和2017年黄河流域水足迹的时空格局演变和城市间虚拟水转移特征,并采用对数迪氏指数(LMDI)模型探究水足迹变化的社会经济驱动因素及其影响作用。研究发现:黄河流域水足迹在时间上整体呈先增长后下降的倒“U”型演变趋势,在空间上呈现“中下游高,上游低”的区域格局;虚拟水转移主要集中在省域内部,且具有明显的经济梯度导向特征;经济增长和技术因素等是水足迹变化的主要驱动因素,且各因素对水足迹的影响存在显著的空间异质性。基于驱动机制差异,将78个城市划分为5类水足迹驱动模式,为分区施策、精准提升流域城市节水效率提供了科学依据。

关键词 水足迹;黄河流域;多区域投入产出模型;LMDI模型

中图分类号:TV213.4 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-04-002

Spatiotemporal evolution and driving factors of water footprint in the Yellow River Basin based on multi-regional input-output and LMDI models

ZHANG Zilong^{1,2,3}, ZHANG Yiping^{1,2}, LYU Shiyu^{1,4}, SUN Yingqi^{1,2}, YAN Xinyuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Carbon Peak & Carbon Neutrality, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

4. Zhengzhou Airport Foreign Language Senior High School, Zhengzhou 450000, China)

Abstract Water resources are the key resources for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. As a key indicator for measuring the pressure on regional water resources utilization, the water footprint can comprehensively reflect the status of water resources utilization in the Yellow River Basin.

收稿日期:2025-06-16

基金项目:国家自然科学基金(72050001)

第一作者:张子龙,男,教授,博士生导师,从事经济地理与空间规划、产业生态与资源管理、减贫与区域可持续发展研究,zhangzl@lzu.edu.cn。

Therefore, analyzing the spatiotemporal patterns of water footprint, inter-regional transfer characteristics, and the driving factors of water footprint changes can provide a scientific basis for the formulation of policies to improve the level of water conservation and intensive utilization in the whole basin region. The paper constructed a multi-regional input-output model of water resources at the prefecture-level city scale to examine the spatiotemporal patterns of water footprint in the Yellow River Basin and the transfer characteristics of virtual water footprint among cities in 2012, 2015 and 2017. The Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) model was used to further explore the socio-economic drivers of changes in the water footprint and their impacts. The research finds that the water footprint in the Yellow River Basin shows an overall inverted "U" - shaped evolution trend of first increasing and then decreasing over time, and presents a regional pattern of "higher in the middle and lower reaches and lower in the upper reaches" in space. The transfer of water footprint is mainly concentrated within the provinces, and has obvious economic gradient-oriented characteristics. The level of economic development and technological factors are the main drivers of the change of water footprint, and there is significant spatial heterogeneity in the impacts of these factors on water footprint. Based on the differences in the mechanisms, the 78 cities are divided into five categories of water footprint driving patterns, providing a scientific basis for region-specific policies and targeted improvements in urban water conservation efficiency within the basin.

Keywords water footprint; the Yellow River Basin; multi-regional input-output; LMDI model

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,在国家发展大局中具有举足轻重的战略地位^[1]。流域以2%的河川径流量承载了全国15%的耕地、12%的人口^[2],水资源总量仅占全国的3.06%,人均水资源量远低于国际公认的严重缺水标准^[3],且空间分布不均^[4]。在气候变化大背景下,随着人类活动强度持续加剧,黄河中游地区径流量明显下降^[5-6]。但经济发展和人口增长引起的用水需求却持续上升^[7],导致流域长期面临环境风险与水资源供需矛盾的双重挑战。黄河流域已成为水环境问题严峻的复合型生态脆弱带^[2,8],制约着该地区的社会经济发展和福祉改善^[9]。为缓解黄河流域水资源短缺的问题,近年来中国政府出台了一系列政策^[10],确立了“四水四定”(以水定城、以水定地、以水定人、以水定产)的水资源节约集约利用策略,推动了用水方式由粗放低效向节约集约高效转变^[11]。在此背景下,厘清黄河流域城市间水足迹转移与用水驱动机制,揭示流域内用水依赖关系,对推动流域水资源协同管理与分区调控具有重要意义^[12]。

传统的水资源研究往往聚焦于实体水消耗,难以准确捕捉区域间产品和服务流动背后的水资源隐性转移。Allan首次引入了“虚拟水”概念,即商品或服务生产过程所需的水资源量,为水资源研究提供了新思路^[13-14]。区域间商品流通本质上是虚拟水的动态流动^[15]。例如,水资源密集型农畜产品在不同地区之间的贸易过程,实际伴

随着大量水资源的“隐形流动”^[16]。这一机制突破了水资源禀赋的地理限制,借助市场体系实现了水资源的空间再分配,提升了整体配置效率。在水资源严重短缺的区域,通过外购高耗水产品替代本地生产,可有效改善区域水资源配置结构^[17]。该策略在缓解地中海沿岸部分国家及伊比利亚半岛等典型缺水区域的水资源压力方面发挥了重要作用^[18-20]。Hoekstra等基于虚拟水理论和生态足迹,提出水足迹理论,强调水足迹是某区域或个人在一定时期内消费的所有产品和服务所需的水资源总量^[21]。作为水资源管理研究的前沿研究方法之一^[22],水足迹不仅可以衡量实体水情况,还可以量化虚拟水在区域间的分布格局和资源流动关系^[23],以及反映水资源利用与消费模式之间的联系,进而为水资源危机缓解以及现代水资源管理提供新的视角^[24]。梳理现有研究发现,水足迹研究涵盖从全球到单一产品的多尺度分析。全球尺度的水足迹研究重点关注水足迹的时空分布、消费和转移情况^[25-27];国家尺度的水足迹研究聚焦在国家内部或国家间的虚拟水贸易、水足迹核算和可持续评估等^[28-30];区域尺度的水足迹研究主要集中在流域或行政区内的水足迹分布和行业水足迹优化等^[31-33],产品尺度的水足迹研究主要侧重于分析特定农产品或工业品的生命周期耗水情况^[34-36]。从研究方法的角度来看,水足迹的定量分析主要采用两类方法。①自下而上的生命周期评估法,通过追踪产品在整个

生命周期中各阶段的用水情况来计算水足迹^[37]。尽管该方法能够较为全面地反映产品用水强度,但其数据获取难度较大,计算过程繁琐,往往限制了其在大范围分析中的应用。②当前较为广泛采用的自上而下的投入产出分析法,该方法利用投入产出表对经济系统中的产业间联系进行分析,从而量化各部门的水足迹,具有数据来源统一、适用于宏观研究的优势。这种方法常被用来探索区域虚拟水贸易及产业部门用水结构^[38-39]。

目前,有关黄河流域水资源的研究,大部分研究采取子流域、省域或城市群尺度,部分研究从实际需水量角度分析水资源利用的时空变化^[12],也有一些研究利用水足迹方法就黄河流域水资源利用的可持续性进行评价^[40],但是针对黄河流域地级市尺度的水足迹时空格局变化、虚拟水转移及其驱动因素的研究相对较少。在水资源可利用总量存在硬性约束下,缺水地区的社会经济发展必须依靠有效的水资源需求管理来保障。坚持“因水制宜、量水发展”是落实绿色发展理念的核心准则。基于此,本研究以黄河流域 78 个地级城市为研究单元,构建黄河流域城市水资源拓展型多区域投入产出模型,计算黄河流域 2012、2015 和 2017 年的水足迹,系统揭示城市间水足迹的时空分布与虚拟水的转移格局。在此基础上,运用 LMDI 模型剖析黄河流域各城市水足迹变化驱动

机制,从人口规模、经济增长、产业结构、消费和技术维度识别各城市水足迹的核心驱动因素。同时根据不同驱动因素的贡献值大小划分城市水足迹驱动模式,为流域差异化的节水政策设计和资源配置优化提供科学依据。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山麓,全长约 5 464 km^[41],向东流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、山西省、陕西省、河南省和山东省 9 个省(区),最终汇入渤海。黄河流域年平均水资源总量仅 647 亿 m³,不到长江流域的 7%,全域人均水资源量 530 m³,远低于国际现行严重缺水标准(1 000 m³/人),流域水资源开发利用率高达 80%^[42],远高于一般流域 40% 的生态警戒线^[12]。

本研究考虑到黄河流域流经四川省部分很短,因此将四川省地级市城市忽略不计,最终确定以黄河流域 78 个城市(自治州)为研究对象,上游包括青海省、甘肃省、宁夏回族自治区和内蒙古自治区的 24 个城市(自治州),中游包括山西省和陕西省的 19 个城市,下游包括河南省和山东省的 35 个城市(见图 1)。



图 1 研究区概况示意图
Fig. 1 Overview of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 投入产出模型

投入产出模型最早由 Leontief^[43] 提出,目前已成为水足迹研究的重要方法之一。投入产出模型又可分为单区域投入产出模型(SRIO)和多区域投入产出(MRIO)模型。由于多区域投入产出

模型可以定量测算产业链各环节的具体资源消耗程度,揭示经济系统内部间的耦合关系,其被广泛应用于水足迹跨区域流动研究^[44]。所以本研究采用多区域投入产出表,并在此基础上将各城市三大行业耗水量 VI 纳入投入产出表,构建水资源拓展型 MRIO 模型(见图 2)。

投入 \ 产出			中间使用				最终使用		出口	总产出
			太原		其他城市		太原...固原	其他城市		
			第一产业	第二产业	第三产业	...				
中间投入	太原	第一产业	I				II		IV	X _i
		第二产业								
		第三产业								
	...									
	其他城市	第一产业								
		第二产业								
第三产业										
进口			III							
增加值			V							
总投入			X _j							
生产实际用水量			VI							

图 2 水资源拓展型 MRIO 模型

Fig.2 Expanded MRIO model for water resources

多区域投入产出模型假定一个系统内中包括 n 个区域,每个区域有 m 个部门,区域生产活动具有如下平衡

$$x_i^R = \sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^{RS} + \sum_{s=1}^m f_i^{RS} \quad (1)$$

式中: x_i^R 为 R 区域 i 部门的总产出; x_{ij}^{RS} 为 R 区域 i 部门供给 S 区域 j 部门的中间投入; f_i^{RS} 为 R 区域 i 部门对 S 区域最终需求的投入量。根据 MRIO 模型,直接消耗系数计算为

$$\alpha_{ij}^{RS} = \frac{x_{ij}^{RS}}{x_j^S}, \mathbf{A} = [\alpha_{ij}^{RS}] \quad (2)$$

式中: α_{ij}^{RS} 为直接消耗系数,表示区域 S 中 j 部门生产单位产品时 i 部门在区域 R 的直接投入; x_j^S 是区域 S 中 j 部门的总产出; \mathbf{A} 是直接消耗矩阵。

将式(2)代入式(1),得到

$$x_i^R = \sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}^{RS} x_j^S + \sum_{s=1}^m f_i^{RS} \quad (3)$$

将式(3)用矩阵表示

$$\mathbf{X}^R = \mathbf{A}^{RS} \mathbf{X}^S + \mathbf{F}^{RS} \quad (4)$$

式中: \mathbf{X}^R 、 \mathbf{A}^{RS} 和 \mathbf{F}^{RS} 分别为产出矩阵、直接消耗系数矩阵和最终需求矩阵。求解 \mathbf{X} 可以得到

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \times \mathbf{F}, \mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 是单位矩阵, \mathbf{L} 是列昂惕夫逆矩阵,表示单位最终所需的当地产量,反映了最终需求对总产出的乘数效应。因此,黄河流域各部门的直接耗水系数表达式为

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_j^S], \sigma_j^S = \frac{W_j^S}{x_j^S} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为直接耗水系数矩阵, σ_j^S 为 S 地区 j 部门的直接耗水系数; W_j^S 、 x_j^S 分别表示 S 地区 j 部门的直接耗水水量和总产出。一般来说,直接耗水只考虑了生产过程中实体水的投入量,没有考虑中间投入部门的水资源使用(间接耗水),这部分耗水加上直接耗水就是完全耗水量,即满足部门最终需求的产品在整个生命周期中单位产出的耗水量,由直接用水系数与列昂惕夫逆矩阵相乘得到

$$\boldsymbol{\delta} = [\delta_j^S] \quad (7)$$

$$\delta_j^S = \sum \sum \sigma_j^S \times \mathbf{L} \quad (8)$$

式中: δ 为完全耗水矩阵, δ_j^S 为 S 地区 j 部门的完全耗水系数。黄河流域各部门的完全耗水系数是衡量产业用水强度的一个重要指标, 可直观反映各产业生产过程中对水资源的依赖度。黄河流域各城市的本地最终需求驱动水足迹可量化为

$$W_F = \delta \times (Y_N + Y_C + Y_G + Y_X + Y_A) \quad (9)$$

式中: W_F 为内部水足迹总量; Y_N 、 Y_C 、 Y_G 、 Y_X 、 Y_A 分别为农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、固定资本形成总额和存货增加矩阵。

黄河流域城市间虚拟水流动网络可表征为

$$T_{EF} = \delta Y_{EF} \quad (10)$$

式中: T_{EF} 为 E 城市对 F 城市的虚拟水转移矩阵, Y_{EF} 为 E 城市对 F 城市的最终消费矩阵。

1.2.2 LMDI 模型

对数平均迪氏指数方法(LMDI)通过一系列的数学等式变形, 将变量变化的原因拆解为多层次驱动因素, 并量化各维度要素对变化的贡献度^[45]。由于该方法具有完全分解和无残差的特点, 目前被广泛用于环境、气候、产业和能源等领域^[46-49]。本研究运用 LMDI 对黄河流域 78 个城市或自治州进行水足迹的驱动力分析, 公式为

$$W_i = \frac{W_i}{S_i} \times \frac{S_i}{G_i^{II+III}} \times \frac{G_i^{II+III}}{G_i} \times \frac{G_i}{P_i} \times P_i = B_i \times C_i \times D_i \times E_i \times P_i \quad (11)$$

式中: W_i 指代 i 城市水足迹总量; S_i 表示 i 城市消费总量; G_i^{II+III} 表示 i 城市第二产业和第三产业生产总值; G_i 表示 i 城市生产总值; P_i 表示 i 城市常住人口。 B_i 为技术因素, 即 i 城市单位经济消费所消耗水足迹的量; C_i 为消费因素, 即 i 城市单位第二、三产业经济规模所承载的居民消费额, 衡量单位经济产出对居民消费的承载能力变化; D_i 表示产业结构因素, 即 i 城市第二、三产业占生产总值的比例; E_i 为经济增长因素, 以 i 城市人均生产总值表征; P_i 为人口规模因素。水足迹变化量分解为

$$\begin{aligned} \Delta W_i &= \Delta W_i^t - \Delta W_i^0 = \\ &\Delta W_{B_i} \times \Delta W_{C_i} \times \Delta W_{D_i} \times \\ &\Delta W_{E_i} \times \Delta W_{P_i} = \theta_i \times \ln\left(\frac{B^t}{B^0}\right) + \theta_i \times \\ &\ln\left(\frac{C^t}{C^0}\right) + \theta_i \times \ln\left(\frac{D^t}{D^0}\right) + \\ &\theta_i \times \ln\left(\frac{E^t}{E^0}\right) + \theta_i \times \ln\left(\frac{P^t}{P^0}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\theta_i = \frac{W_i^t - W_i^0}{\ln W_i^t - \ln W_i^0}$, ΔW_i 为基准年到 t 年城市水足迹的变化值, 上标 t 和 0 分别表示目标年和基准年。 ΔW_{B_i} 为 i 城市技术因素对总水足迹的贡献值, ΔW_{C_i} 为 i 城市消费因素对总水足迹的贡献, ΔW_{D_i} 为 i 城市产业结构因素对水足迹的贡献值, ΔW_{E_i} 为 i 城市居民经济增长对总水足迹的贡献值, ΔW_{P_i} 为 i 城市居民人口规模对总水足迹的贡献值。如果某种因素贡献值小于零, 表示这种因素促进了水足迹的降低, 如果某种因素贡献值大于零, 则表示该因素促进了水足迹增加。

1.3 数据来源

本研究采用的多区域投入产出表(MRIO)数据来源于中国碳排放数据库^[50](CEADs)(<https://www.ceads.net.cn>)。鉴于编制涵盖全国各区域间经济关联的投入产出表是一项非常复杂的工作, 不仅需要整合海量、分散且获取难度大的原始数据, 还需协调不同区域的统计口径。这使得国内系统性的区域间投入产出表编制起步相对较晚。目前, 我国官方编制的投入产出表每 3 年更新一次, 但编制完成到发布普遍滞后 2~6 年, 导致当前可获取的最新全国多区域投入产出表仅更新至 2017 年, 制约了研究时效性。本研究根据国家统计局发布的《国民经济行业分类》标准(<https://www.stats.gov.cn>), 将 2012、2015 和 2017 年多区域投入产出表中 42 个部门合并为第一、二、三产业。由于青海省各市(州)在中国城市尺度多区域投入产出表中未列出, 为保持研究尺度一致性, 根据青海省各市(州)GDP 占比, 将青海省水足迹分配至各市(州)。此外, 为保持行政区划一致, 将莱芜市数据合并至济南市。

LMDI 模型所使用的社会经济统计数据均来源于《中国城市统计年鉴》^[40]和各省国民经济和社会发展统计公报。产业耗水数据来源于各城市水资源公报。对于部分耗水数据缺失的城市, 采用用水数据乘以耗水率得到缺失数据城市的耗水数据。耗水量表征在人类活动过程中不可逆损失的水资源量。相比起用水量, 耗水量排除了用水系统中可循环再生部分, 更能准确反映城市消耗水资源的程度和真实的耗水需求。而水足迹要求计算时采用表征不可逆损失的耗水数据, 而非仅反映取水规模的用水量指标^[51]。因此, 本研究计算时使用黄河流域各城市三大产业的耗水量。

2 结果与分析

2.1 黄河流域城市水足迹时空变化及虚拟水转移情况

2012—2017年,黄河流域78个城市或自治州水足迹存在显著的时空差异(见图3)。黄河流域城市水足迹呈东北部高、中西部低的分布格局,下游城市总体水足迹更高,上游水足迹更低。水足迹总量排在前列的城市包括青岛市、烟台市、西安市、郑州市、济南市以及其他省会城市。一方面,郑州市、济南市等省会常住人口超千万级,人

口规模加大了刚性用水需求量^[3],进而推高生活水足迹。另一方面,青岛市、烟台市的外向型制造业与洛阳市的重化工业形成结构性锁定,需水量较大。例如,2017年水足迹最大的城市是郑州市(21.62亿 m^3),然后依次是西安市(17.90亿 m^3)、青岛市(16.41亿 m^3)、运城市(13.53亿 m^3)和兰州市(12.62亿 m^3)。青海省除省会西宁市水足迹达到4.90亿 m^3 外,其他城市水足迹均小于1亿 m^3 ,这些城市地处高原,人口密度低,用水量较少,清洁能源基地与生态畜牧业形成低碳水结构,率先实施“以电代水”工程,减少传统灌溉用水,水足迹相对其他省份城市较小。

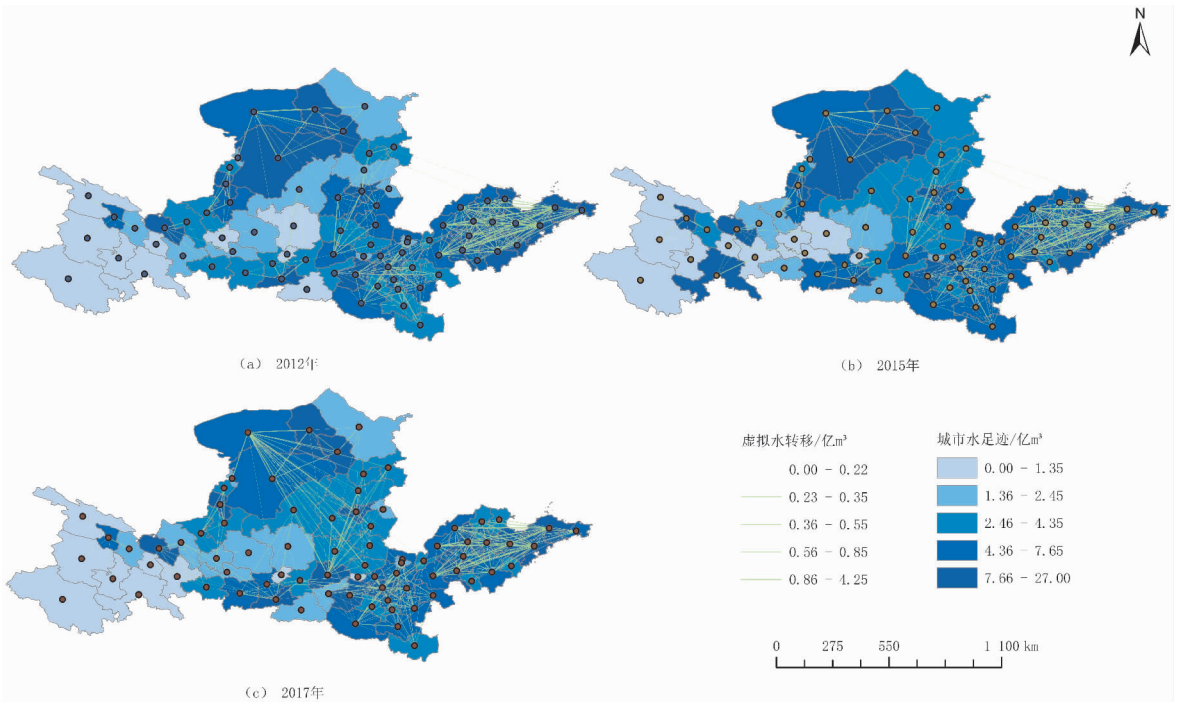


图3 2012—2017年黄河流域地级市尺度水足迹时空分布及其转移情况

Fig. 3 Spatiotemporal distribution and transfer of water footprint in the Yellow River Basin at the city scale, 2012—2017

研究期内黄河流域城市水足迹呈现倒“U”型演变特征,流域水足迹总量由2012年的443.27亿 m^3 ,上升到2015年的479.28亿 m^3 (52%的城市在2015年达到水足迹最大值),而后下降至2017年的391.15亿 m^3 。整体所呈现的较为明显的下降趋势,反映出流域水资源利用效率的提升。2012年,多数城市水足迹处于较高水平,表明当时城市经济发展对水资源的依赖程度较大,用水效率相对较低。从不同城市来看,研究期内仅有个别城市,如忻州市、开封市和驻马店市水足迹持续增加,大部分城市水足迹先增后减。从流域上、中、下游看:下游部分城市水足迹持续减少,如青岛市、淄博市和山东大部分城市;中游地区部分城

市水足迹先减后增,如白银市、银川市和天水市等。总体而言,黄河流域各城市水足迹变化趋势反映出其水资源利用效率的提升,也显示了流域水资源管理政策的初步成效^[53]。然而,也应关注个别城市水足迹波动背后的具体原因,以便制定更有针对性的水资源管理措施。

从黄河流域城市间的虚拟水转移和流向关系来看,黄河流域内部城市间虚拟水转移量从2012年的394.37亿 m^3 降低至2017年的315.29亿 m^3 ,整体呈现下降趋势。2012年虚拟水流出较大的城市为巴彦淖尔市、菏泽市、济宁市和德州市等,虚拟水调入量较大的城市为青岛市、郑州市、烟台市、银川市和太原市,基本都为各省份的中心

城市。至 2017 年,黄河流域内部城市间虚拟水转移关系变化不大。巴彦淖尔市仍是最大的调出城市,其次是临夏回族自治州、滨州市和三门峡市;虚拟水调入量最大的城市为郑州市,其次为青岛市、兰州市、西安市和太原市。其中,青岛市是虚拟水产品的主要消费者,优先选择进口水资源密集产品,主要由山东省其他城市如济宁市、菏泽市、聊城市和德州市等调入虚拟水,以平衡区域水足迹赤字和维持经济体系稳定运行^[54],但也造成了山东省其他城市大量虚拟水流出,加剧了其他城市的用水压力。

从城市间的虚拟水流动情况来看,东营市、烟台市、日照市、临沂市、滨州市和菏泽市等属于虚拟水净流入区,而黄河流域其他城市属于虚拟水净流出区。这一格局的形成与各地区的人口规模、产业结构和贸易活动等密切相关。其中,日照市是虚拟水产品的主要消费者,虚拟水净流入量最高,为 0.66 亿 m^3 ,虚拟水流入量是流出量的 1.52 倍,周边其他城市为其提供了一定的水资源保障。而银川市是虚拟水产品的主要供应者,2012 年虚拟水净流出量为 2.62 亿 m^3 ,虚拟水出口量是进口量的 6.93 倍,其中有 0.98 亿 m^3 出口到吴忠市,占银川市虚拟水出口量的 32.02%。凭借良好的灌溉条件,银川市高耗水农产品的集中产出,造成了大量虚拟水的流出。

黄河流域虚拟水转移主要以省内转移为主。具体而言,虚拟水主要沿区域经济梯度差异方向流动,表现为从省内非中心城市向中心城市(如郑州市、西安市和青岛市等)定向输送,导致中心城市虚拟水输入量远远大于输出量,虚拟水净输入普遍高于周边城市。这反映出流域水足迹空间再分配与区域发展能级的高度耦合特征。例如山西省内,2012 年运城市主要向省内其他煤矿产业更为发达的城市调出虚拟水。到 2017 年自朔州市、吕梁市等省内城市和巴彦淖尔市、鄂尔多斯市等省外城市调入到运城市的虚拟水增加,运城市从净流出城市转变为净流入城市。

2.2 黄河流域城市直接和间接水足迹时空变化

黄河流域横跨我国西北与华北地区,是重要的生态屏障和经济发展带,面临水资源整体短缺与区域供需失衡的双重压力。科学评估并优化城市水资源利用模式已迫在眉睫。水足迹作为衡量水资源依赖程度的重要指标,能从直接水与虚拟水两个层面衡量水资源压力。

直接水足迹反映了城市在本地实际消耗的水资源量。从时间演变上看,大部分城市在 2012—2015 年间直接水足迹表现为增长[见图 4(a)~(c)],但在 2015—2017 年间,多数城市直接水足迹出现显著下降[见图 4(c)~(e)]。例如,太原市直接水足迹从 2015 年的 10.16 亿 m^3 下降至 2017 年的 3.28 亿 m^3 ,降幅超过 60%;鄂尔多斯市直接水足迹从 2015 年的 8.78 亿 m^3 下降至 2017 年的 4.53 亿 m^3 ,降幅超过 40%。这与当地重工业去产能、节水改造及水价政策实施密切相关。部分资源型城市(如乌海市、白银市)随着资源开采强度下降及高耗水产业外迁,导致直接水足迹持续下降。但西安市、郑州市等个别城市的直接水足迹在 2017 年仍然维持在高位,分别为 12.56 亿 m^3 、15.20 亿 m^3 ,表明人口增长与城市扩张对水资源的刚性需求依旧强劲。总体而言,黄河流域城市的直接水足迹表现出从“粗放增长”转向“总量受控”的特征。从空间格局来看,黄河流域直接水足迹总体呈现出“上游波动、中游稳、下游高”的特征:上游城市如鄂尔多斯市、兰州市等由于依赖重化工业与资源开采,其工业用水占比较大,直接水足迹常年维持高位;而中游如西安市、运城市等地则以农业与城市居民生活为主,虽然单位产值水耗较低,但因人口密集、城市化水平高,直接水足迹规模较大但波动较小;下游城市如济南市、滨州市和东营市等,受益于节水型城市建设及产业结构调整,直接水足迹整体下降。

相较于直接水足迹,间接水足迹代表城市通过消费外部产品与服务所隐含的水资源使用量,更能反映城市对外部水资源的依赖程度。2012—2017 年间,黄河流域部分城市间接水足迹呈现持续上升趋势[见图 4(b)~(f)],尤其是区域中心城市和服务型城市增长最为明显。例如太原市的间接水足迹从 2012 年的 2.47 亿 m^3 迅速增长到 2017 年的 7.38 亿 m^3 ,增长近 2 倍。整体上,2015 年是间接水足迹的高峰期,此后显著下降,反映出政策调控、产业结构调整及节水措施等可能在一定程度上缓解了水资源压力。空间分布上,各城市间差异较大。2012 年间接水足迹的最大值达到 13.61 亿 m^3 ,而最小值仅为 0.03 亿 m^3 ,至 2017 年,差异仍然显著,分别为 9.14 亿 m^3 与 0.02 亿 m^3 。这表明不同区域在产业结构、资源禀赋和用水效率方面存在明显差异。部分资源型城

市因能源和重工业比重较大,其间接水足迹长期处于较高水平;而部分城市产业相对轻型化,且在节水技术与政策落实方面效果显著,因此间接水足迹处于较低水平。总体而言,间接水足迹的变化趋势揭示了合理的产业结构调整与政策干预对

水资源压力缓解的显著作用。这说明在未来的水资源管理中,应进一步强化节水政策执行力度,推动高耗水产业转型升级,同时提升区域间水资源利用效率,以促进水资源的可持续利用与生态环境的协调发展。

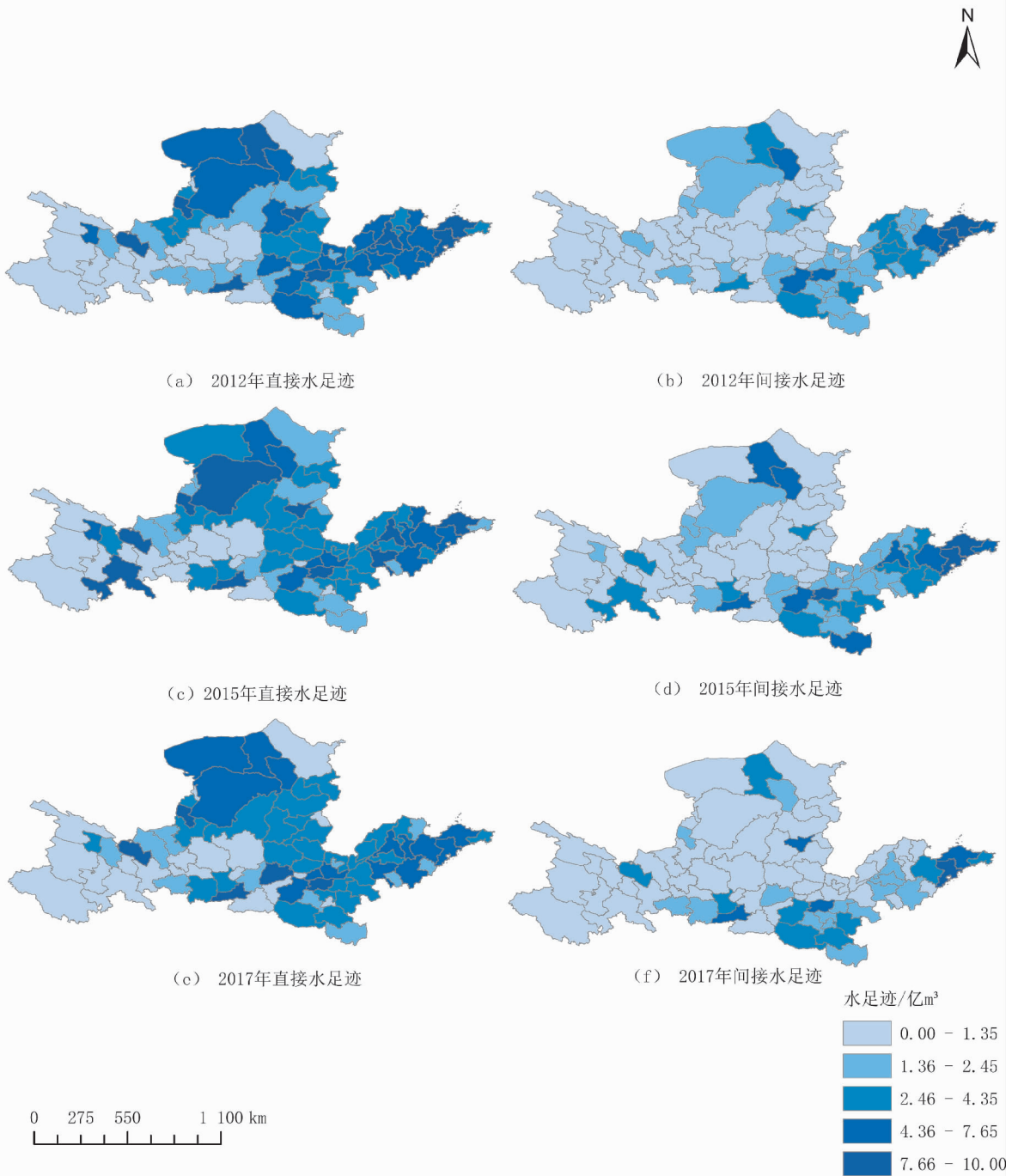


图 4 黄河流域城市直接水足迹和间接水足迹时空格局

Fig. 4 Spatiotemporal patterns in direct and indirect water footprint of cities in the Yellow River Basin

对比分析发现,2012 年黄河流域多数城市以直接水足迹为主,占比普遍在 60% 以上。但到 2017 年,部分城市(尤其是太原市、固原市和青岛

市等服务型城市)的间接水足迹占比已超过 50%,显示了用水结构的变化,这也表明黄河流域城市的水资源消费模式正从“资源密集型”向“消

费驱动型”的转型。如西安市、太原市和济南市等,伴随产业升级和经济增长,水资源利用模式发生质变:传统的“就地取水、就地消耗”正被“外部输入、内部消费”所替代。整体上,流域水足迹格局正从传统高耗水的“直接水足迹主导”模式,向“间接水足迹占比提升”的外部依赖型模式演变。这一转变虽通过产业链分工和进口产品替代缓解了本地水资源压力,提升了承载力,但也导致水资

源压力向外部扩散,增加了区域转移风险,甚至可能引发“生态负债”问题。

2.3 黄河流域水足迹驱动因素

基于多区域投入产出模型,本研究运用 LMDI 分解法,从人口规模、经济增长、产业结构、消费和技术方面,探究黄河流域水足迹变化的驱动因素及其贡献度(见图 5)。

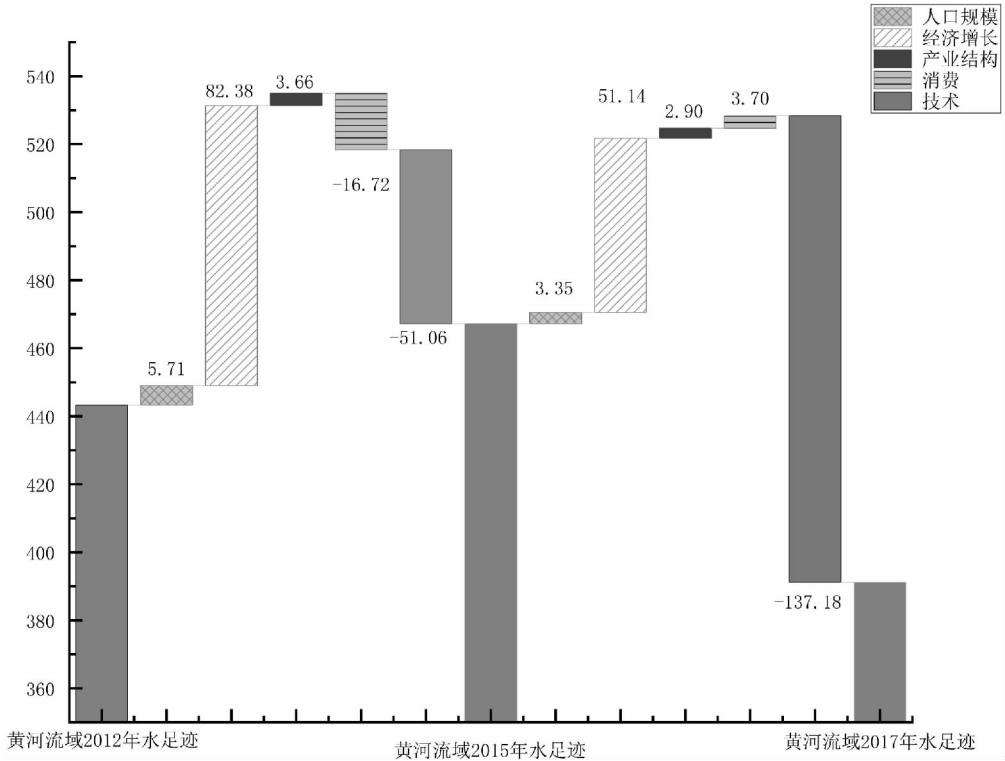


图 5 黄河流域水足迹变化因素分解结果

Fig. 5 Decomposition results of factors influencing water footprint change of the Yellow River Basin

1) 人口规模对水足迹变化总体呈现正向驱动作用,但贡献值从 2012 年的 5.71 降低至 2017 年的 3.35,下降 41.33%。人口增长通过商品与服务消费增加,带动虚拟水需求上升,符合普遍认知^[49]。具体到城市层面,就人口增长的城市而言,人口因素正向驱动水足迹增加;而对于人口减少的城市,人口因素则抑制水足迹(贡献值为负)。总体而言,人口规模扩大驱动了大部分城市水足迹的增长,但其促进作用有限(贡献值多分布于 0~4 之间)。例如,咸阳市、宝鸡市和天水市因人口负增长,人口驱动贡献值为负,抑制了水足迹。相反,西安市、兰州市和郑州市等大城市得益于集聚效应,其人口规模驱动贡献值为正,且高于其他城市。

驱动作用,但贡献值从 2012 年的 82.38 降低至 2017 年的 51.14,下降 37.92%。2012—2017 年间,多数城市经济增长因素的贡献值均显著为正,表明其是驱动黄河流域水足迹增长的主要因素。经济增长驱动机制体现在两方面:一方面,经济规模扩张促进产业集聚与生产规模扩大,增加用水需求^[55];另一方面,区域内经济快速发展刺激消费水平提升,扩大总需求,推高水足迹。这两方面共同印证了经济发展对水足迹呈现显著正向驱动效应。

3) 产业结构因素对水足迹变化呈现正向驱动作用,但贡献值从 2012 年的 3.66 降低至 2017 年的 2.90,降幅较小。与人口规模和经济增长因素相比,产业结构的驱动作用较弱。空间分布上,山东省、河南省等中下游区域产业结构驱动作用

2) 经济增长因素而对水足迹变化呈现正向

较大。例如周口市传统支柱产业(如纺织服装业中的高耗水印染环节)及显著的农业与重工业路径依赖,共同推高了区域水足迹。相比之下,白银市、包头市和鄂尔多斯市等资源型城市通过压缩产业链高耗水环节,推动消费结构向低水足迹方向调整,有效抑制了水足迹的过快增长。总体来看,黄河流域产业结构持续优化,节水型产业比重提升,为促进水资源可持续利用奠定了基础。

4)消费因素对水足迹变化的影响呈现阶段性特征:由初期的负向抑制转向后期的正向驱动,其贡献值从2012年的-16.72升至2017年的3.70,增幅达122.13%。消费因素体现商品或服务的消费结构^[47]。2012年处于抑制阶段(贡献值为负),消费对水足迹增长起抑制作用。这可能源于价格上升抑制了商品与服务购买量,从而减缓水资源消耗^[50],反映出消费升级与生活方式转变对水资源需求的阶段性影响。2015及2017年处于驱动阶段(贡献值为正),伴随流域经济增长,单位第二、三产业GDP所承载的居民消费不断增加,消费结构逐步由生存型向发展享受型转变,进而驱动水足迹增加。

5)技术因素对水足迹变化呈现负向抑制作用,贡献度从2012年的-51.06降低至2017年的-137.18,降幅为168.66%。技术因素衡量单位经济产出的水资源消耗量,其值越低,表明水资源利用效率越高。2012—2017年间,多数城市的技术驱动因素贡献度显著为负且绝对值增大,表明水资源利用效率的提升已成为抑制流域水足迹增长的关键力量。这源于技术进步与产业结构优化的协同效应。在消费扩张的背景下,技术效率提升有效遏制了水足迹总量的过快增长,为黄河流域水资源可持续管理提供了核心支撑。

尽管人口规模、经济增长和产业结构等因素正向驱动水足迹增长,但技术因素的主导性负向抑制效应超越了这些正向驱动,最终促使黄河流域水足迹呈现整体下降趋势。在各类因素中,人口规模、产业结构与消费水平的影响相对有限;而经济增长和技术因素的作用更为显著,二者构成影响水足迹变化的关键因素。

2.4 黄河流域水足迹驱动模式分析

本研究以2012年为基准年,计算2012—2017年黄河流域水足迹变化的驱动因素,由于包含78个城市的数据点过多,单个图表难以清晰表

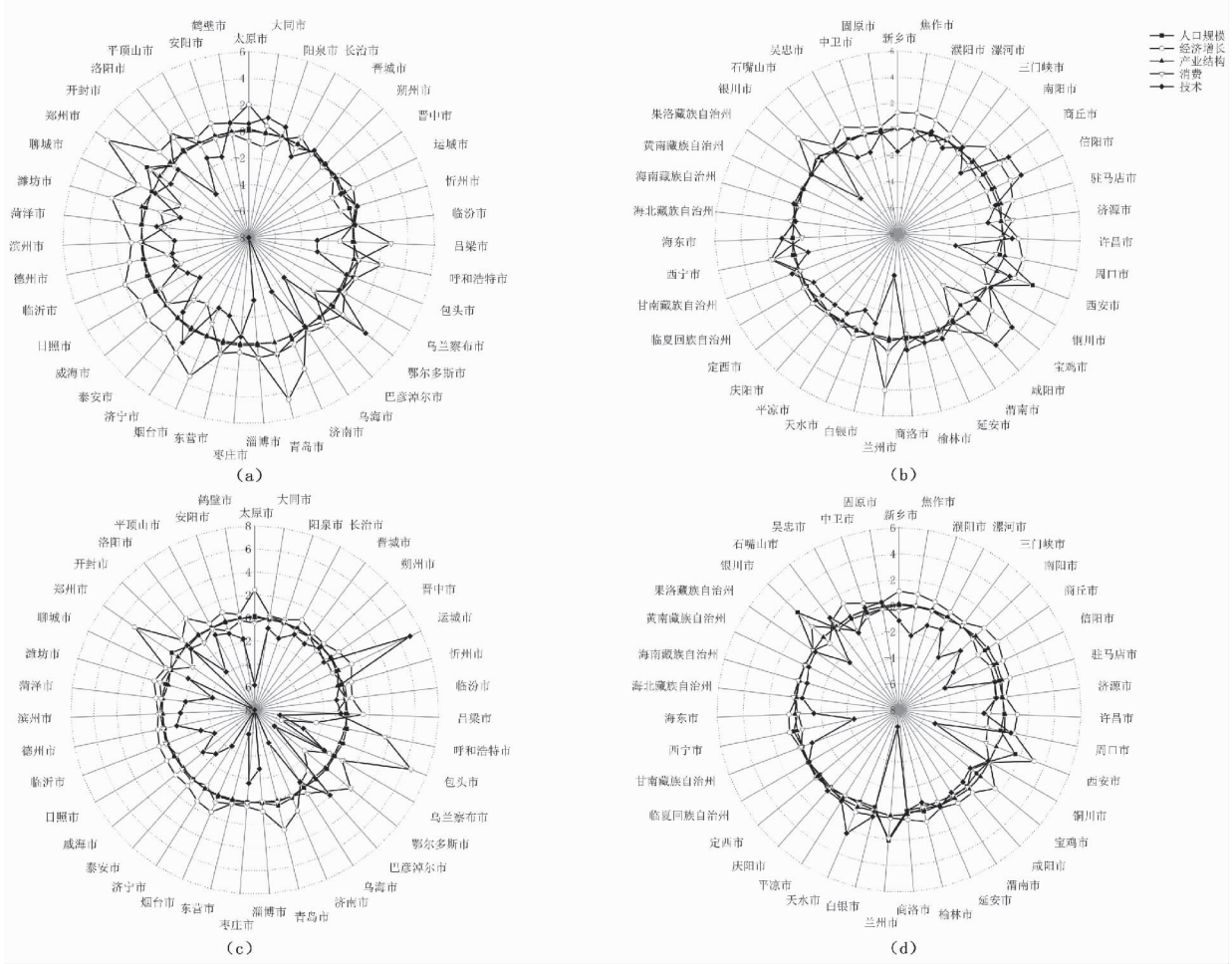
示,因此将结果分图展示(见图6)。根据黄河流域各城市的水足迹变化主导驱动因素,可以将黄河流域城市具体可以划分为5种主导驱动模式(见图7)。

1)单因素驱动模式I(经济增长主导型)。单因素驱动模式I是以经济增长为主导因素的驱动模式,包括晋中市、开封市、许昌市和固原市等15个地级市。这些城市因普遍处于工业化中期或农业转型阶段,经济增长高度依赖资源消耗型产业,而节水技术应用滞后与产业结构固化(技术因素贡献值接近零、产业结构因素贡献值接近零),使得经济增长成为水足迹增长的主导驱动力。例如,经济增长对许昌市、开封市水足迹增长的贡献分别为2.06亿 m^3 、2.09亿 m^3 。

2)单因素驱动模式II(消费水平主导型),该模式以消费水平为核心驱动因素,涵盖大同市、朔州市、包头市、巴彦淖尔市和乌海市。这些城市的第二、三产业高度集中于高耗水行业(如煤炭深加工、钢铁冶金和规模化农业),导致单位经济产出所承载的居民消费严重依赖高水足迹商品。在LMDI分解结果中,消费水平的强驱动效应与技术因素的弱抑制效应形成协同作用,显著放大了消费对水足迹增长的贡献。

3)单因素驱动模式III(技术主导型),该模式以技术因素为核心驱动力,包括呼和浩特市、济南市和青岛市等35个城市。这些城市普遍推进技术升级,例如青岛市海水淡化进行工业节水改造、银川市农业滴灌普及和平顶山市煤炭减产,退出高耗水产业。这些举措显著降低了单位经济产出的水资源消耗,使得技术因素的抑制效应超越经济增长与人口规模的驱动效应,成为主导水足迹变化的关键力量。

4)双因素驱动模式IV,该模式的主导驱动因素是经济增长和技术因素,包括太原市、郑州市和白银市等20个地级市。这些城市人均GDP增长与单位消费水足迹下降形成协同驱动,表现为郑州市和晋城市等城市通过技术升级降低耗水技术,同时消费升级拉动高附加值产业;周口市和菏泽市等农业主导城市在节水灌溉普及中提升农业产业化水平,实现效率提升与收入增长。这种驱动模式促进了效率提升与收入增长,代表了一种资源利用效率更高、生态压力更小的良性发展路径,具有可持续推进的价值。



注:依据黄河流域 78 个城市投入产出表顺序,将水足迹驱动因素分解图按时间阶段分组呈现。图 6(a) ~ (b) 为 2012—2015 年驱动因素分解结果;图 6(c) ~ (d) 为 2015—2017 年驱动因素分解结果。各时期图表均以等量城市数 (39 个城市) 对称排布。

图 6 2012—2017 年黄河流域各城市水足迹驱动因素分解

Fig. 6 Decomposition of driving factors of water footprint in cities of the Yellow River Basin, 2012—2017

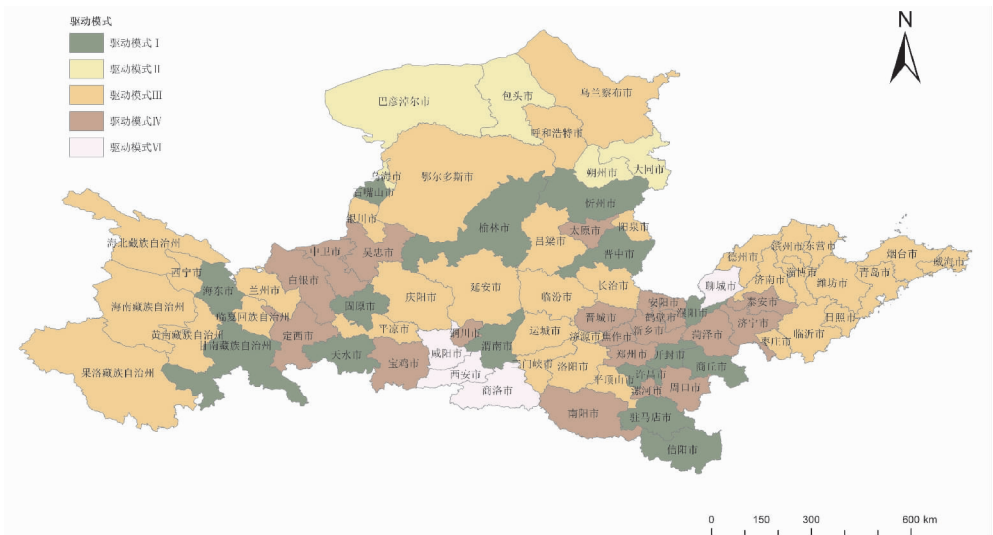


图 7 黄河流域 78 个城市水足迹驱动模式分布

Fig. 7 Distribution of driving pattern types of water footprint of 78 cities in the Yellow River Basin

5) 三因素驱动模式V, 该模式的主导驱动因素是经济增长、消费水平和技术因素, 包括聊城市、西安市、咸阳市和商洛市。西安市作为高消费水平都市, 其技术降耗与消费升级相互制衡; 咸阳市受西安市辐射承接受限型产业转移, 消费水平效应(-2.72)与技术效应(2.84)反向拉扯。

3 讨论

以往黄河流域的研究多数关注省域尺度或某段流域^[12], 针对黄河流域用水时空规律及影响因素的认识还缺乏系统研究。本研究以黄河流域78个城市为基本单元, 基于MRIO模型分析水足迹的时空变化及虚拟水转移特征, 并应用LMDI方法将黄河流域水足迹随时间变化的驱动因素分解为人口因素、经济增长因素、产业结构因素、消费因素和技术因素。

研究结果表明黄河流域城市水足迹呈现显著的空间梯度分异特征, 形成“东北高、中西低、下游高、上游低”的阶梯式分布格局。这与已有关于黄河流域水足迹空间格局变化的研究结果基本一致^[3, 12, 57]。从时间尺度来看, 黄河流域水足迹总体上存在先上升后下降趋势。值得注意的是, 本研究与以往部分研究的结果存在数量级差异, 主要因其采用自上而下方法计算水足迹, 而本研究基于投入产出表法。但与同样使用投入产出表的研究相比, 结论数量级基本一致^[29]。现有省域尺度水足迹研究^[17, 25, 29, 57-58]多关注整体核算或省际虚拟水转移(如粮食、能源贸易), 但缺乏对省内区域间转移机制的分析, 掩盖了发达地区(如西安市、郑州市等)的水资源隐形转移。例如, 本研究发现, 在黄河流域的山东省、河南省等, 菏泽市、滨州市等产粮区向济南市、青岛市等消费中心输送农产品所产生的虚拟水转移量, 可能超过省际贸易规模, 却鲜有研究关注。与现有黄河流域水足迹研究多聚焦农业单一产业或省际转移^[12, 59, 60-62]不同, 本研究突破省级尺度局限, 首次从多维度分析了流域内各城市的水足迹转移及驱动模式。现有文献存在工业、服务业水足迹核算缺失, 且依赖省级数据, 难以捕捉城市间梯度差异与空间关联。本研究整合城市级数据, 构建了78个地级市的动态水足迹网络图谱, 揭示了城市间虚拟水转移机制。

此外, 黄河流域各区域水足迹空间格局和驱

动因素存在显著差异, 与各城市的产业结构、经济增长和自然禀赋息息相关^[53]。本研究将驱动因素细化为人口规模、经济增长、产业结构、消费和技术5类, 构建了更具解释力的分解框架。结果表明, 水足迹增长主要受经济发展的推动, 而减量则主要归因于节水技术效率提升和居民消费升级。2012—2017年间, 经济增长驱动黄河流域水足迹增加125.19亿 m^3 , 而技术因素贡献了180.26亿 m^3 的减量效应, 验证了“经济驱动-效率抑制”的核心机制。各城市间经济联系带动了水资源的再分配, 区域间的水资源需求差也因此发生转移。

作为我国战略性虚拟水输出枢纽, 黄河流域通过虚拟水贸易实现跨区域水资源调配, 在满足外部用水需求的同时, 也倒逼探索水资源刚性约束下的高质量发展路径。具体来说, 黄河流域淡水资源人均占有量远低于全国平均水平, 而研究结果表明黄河流域为虚拟水净输出区, 这势必会加重当地的水资源矛盾。随着水资源日益稀缺, 不同用水部门和地区之间将存在更多的竞争和冲突^[7]。基于此, 黄河流域应该构建差异化节水调控体系, 实施产业布局与贸易流重构双重策略, 同步建立科学合理的节水型产业链集群。对于水资源禀赋脆弱的地区, 应推进节水技术创新, 以缓解产业结构缺陷带来的水资源短缺问题。

本文基于中国2012年、2015年和2017年城市尺度多区域投入产出表, 从系统视角揭示了水资源在经济系统中的隐形流动过程。尽管所用数据最晚截至2017年, 存在一定的时效性滞后, 限制了对当前我国黄河流域区域间经济-环境系统互动关系的刻画、政策成效的实时评估、突发事件影响的即时分析以及高精度预测的能力, 但该方法在水足迹研究领域仍具有重要意义。本文通过构建产业关联矩阵, 完整追踪产品从生产至消费全过程中的直接与间接耗水, 突破了传统统计仅聚焦终端用水的局限, 实现在全产业链视角下对区域间贸易所隐含虚拟水转移的精确量化。研究进一步识别出高水足迹的关键产业节点及其传导路径, 为制定跨区域节水政策、优化供应链用水效率、推动水资源公平与高效配置提供了科学依据。未来亟需构建更加及时、高分辨率的区域投入产出数据体系, 以提升模型在服务水资源节约集约利用政策制定中的应用价值。

4 结论

本研究基于水资源生态足迹模型,对 2012—2017 年黄河流域城市群水资源生态足迹时空分布格局进行了梳理,并结合 LMDI 模型通过人口规模、经济增长、产业结构、消费水平和技术方面对区域水资源生态的驱动效应进行分析。主要结论如下。

1) 黄河流域水足迹在研究期间呈现倒“U”型变化轨迹,且表现出明显的空间异质性。在时间上水足迹先升后降,初期由于传统产业扩张而快速增加,后期受水资源管理加强和产业结构调整影响而显著下降,拐点与节水政策实施时间基本一致。在空间上黄河流域中下游地区因工业集中和高耗水产业密集,水足迹水平持续偏高,形成连续高值区域,上游地区依托生态定位和清洁能源发展,整体水足迹较低,体现出不同区域在水资源利用上的差异和治理难度。

2) 黄河流域虚拟水转移格局呈现出以省内流动为主的空间特征。从流动路径看,虚拟水转移以省内流动为主,省际流动呈现层级扩散,从水资源相对充足的中上游地区如宁夏回族自治区、内蒙古自治区将虚拟水输入下游经济发达区如山东省、陕西省和关中等地区。上游依托农业和能源资源输出高耗水初级产品,下游通过制造业和服务业调入虚拟水资源。虚拟水省内流动强于省际流动,反映行政边界对资源配置的影响,各省更倾向于保障内部用水,形成以行政单元为核心的调配格局,这可能导致流域整体水足迹不均衡。2012—2017 年,黄河流域部分城市虚拟水流向发生转变,三门峡市、鹤壁市、许昌市和东营市由净流出城市转为净流入城市,而驻马店市、泰安市和安阳市则由净流入城市转为净流出城市,反映出流域内部虚拟水流动格局的动态演变。

3) 黄河流域城市直接水足迹呈阶段性演变,大部分城市 2012—2015 年普遍增长,2015—2017 年显著下降,空间上呈现“上游波动、中游稳、下游高”格局,反映出从“粗放增长”向“总量受控”的转变特征。间接水足迹整体呈下降趋势,揭示出合理的产业结构调整与政策干预对水资源压力缓解的显著作用。同时,黄河流域多数城市用水结构发生变化,直接水足迹占比降低,间接水足迹占比提高,表明消费升级驱动虚拟水依赖加深。

4) 黄河流域水足迹受人口规模、经济增长、产业结构、消费和技术因素共同驱动。其中,经济增长与技术因素是驱动黄河流域水足迹变化的主要因素。经济增长推动工业化进程和消费结构升级从而刺激水需求上升,而技术进步则通过提高利用效率抑制水足迹增加。根据驱动因素的贡献值大小,将黄河流域 78 个地级市的驱动模式划分为 5 类,这将有助于城市明确驱动自身水足迹变化的主要影响因素,制定差异化的水资源管理政策。

参考文献

- [1] 曾维华,解钰茜,陈岩. 整合水权和排污权 促进黄河流域横向生态补偿机制建设[J]. 环境保护, 2022, 50(14): 29-31.
ZENG W H, XIE Y Q, CHEN Y. Integrating water use rights and pollutant discharge rights to promote the construction of horizontal eco-compensation mechanism in the Yellow River Basin [J]. Environmental Protection, 2022, 50(14): 29-31.
- [2] 汤秋鸿,刘星才,周园园,等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1306-1312.
TANG Q H, LIU X C, ZHOU Y Y, et al. Cascading impacts of Asian Water Tower change on downstream water systems [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1306-1312.
- [3] 路瑞,赵琰鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 48-52, 134.
LU R, ZHAO Y X. Analysis of the water resources utilization in the Yellow River Basin based on water resources ecological footprint model [J]. Yellow River, 2020, 42(11): 48-52, 134.
- [4] ZHOU G S, ZHOU L, JI Y H, et al. Basin integrity and temporal-spatial connectivity of the water ecological carrying capacity of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(22): 2785-2792.
- [5] SHI C X, ZHOU Y Y, FAN X L, et al. A study on the annual runoff change and its relationship with water and soil conservation practices and climate change in the middle Yellow River Basin [J]. Catena, 2013, 100: 31-41.
- [6] WANG S J, YAN M, YAN Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River [J]. Quaternary International, 2012, 282: 66-

- 77.
- [7] YIN Y Y, TANG Q H, LIU X C, et al. Water scarcity under various socio-economic pathways and its potential effects on food production in the Yellow River Basin [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 791-804.
- [8] 王瑞芸, 孙德智, 邱斌. 黄河流域城市水环境质量问题分析与改善对策 [J]. *环境工程技术学报*, 2025: 1-14.
- WANG R Y, SUN D Z, QIU B. Analysis of urban water environment quality problems in the Yellow River Basin and countermeasures for improvement [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025: 1-14.
- [9] SCHEWE J, HEINKE J, GERTEN D, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3245-3250.
- [10] JIANG Y. China's water security: Current status, emerging challenges and future prospects [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 106-125.
- [11] 孙才志, 宋强敏, 郝帅. 黄河流域工业绿色水资源效率空间关联网络特征及驱动因素 [J]. *资源科学*, 2025, 47(3): 587-603.
- SUN C Z, SONG Q M, HAO S. Correlation characteristics of spatial network and driving factors of industrial green water resource efficiency in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2025, 47(3): 587-603.
- [12] 张浩然, 徐康宁, 郭飞, 等. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源可持续利用研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(6): 1732-1742.
- ZHANG H R, XU K N, GUO F, et al. Research on the sustainable utilization of water resources in the Yellow River Basin Based on water resources ecological footprint [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(6): 1732-1742.
- [13] ALLAN J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits [J]. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545-546.
- [14] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C] // *Priorities for Water Resources Allocation and Management*, July 13-26, 1992. London: Overseas Development Administration, 1993: 13-26.
- [15] DALIN C, KONAR M, HANASAKI N, et al. Evolution of the global virtual water trade network [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 5989-5994.
- [16] GAWEL E, BERNSEN K. Globalization of water: The case for global water governance [J]. *Nature and Culture*, 2011, 6(3): 205-217.
- [17] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 486-495.
- QI R, GENG Y, ZHU Q H. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 486-495.
- [18] NAZER D W, SIEBEL M A, DER ZAAG P V, et al. Water footprint of the Palestinians in the West Bank [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(2): 449-458.
- [19] NOVO P, GARRIDO A, VARELA-ORTEGA C. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(5): 1454-1464.
- [20] KUMAR M D, SINGH O P. Virtual water in global food and water policy making: Is there a need for rethinking [J]. *Water Resources Management*, 2005, 19(6): 759-789.
- [21] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade [J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45-56.
- [22] 朱永楠, 姜珊, 赵勇, 等. 我国煤电生产水足迹评价 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(9): 28-31.
- ZHU Y N, JIANG S, ZHAO Y, et al. Water footprint evaluation of coal-fired power generation in China [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(9): 28-31.
- [23] D'ODORICO P, CARR J, DALIN C, et al. Global virtual water trade and the hydrological cycle: Patterns, drivers, and socio-environmental impacts [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(5): 053001.
- [24] 谭圣林, 刘祖发, 熊育久, 等. 基于多区域投入产出法的广东省水足迹研究 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1564-1570.
- TAN S L, LIU Z F, XIONG Y J, et al. Evaluation of water footprint for Guangdong province in an interregional input-output framework [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9): 1564-1570.
- [25] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323-e1500323.

- [26] WIEDMANN T, LENZEN M. Environmental and social footprints of international trade[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 314-321.
- [27] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: Evolution of a new research field[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(10): 3061-3081.
- [28] BECKEN S. Water equity: Contrasting tourism water use with that of the local community[J]. *Water Resources and Industry*, 2014, 7: 9-22.
- [29] 陈艳萍, 刘畅. 中国水资源利用效率及其影响因素研究: 基于 Shephard 水资源距离函数[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(3): 591-601.
- CHEN Y P, LIU C. Research on water resources utilization efficiency and its influencing factors in China: Based on Shephard water resources distance function [J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(3): 591-601.
- [30] FENG Q, SUN Y, LI X, et al. A bibliometric analysis of water footprint in China and abroad: Research hotspots and frontiers[J]. *Water Science & Technology*, 2024, 90(6): 1759-1783.
- [31] WHITE D J, FENG K S, SUN L X, et al. A hydro-economic MRIO analysis of the Haihe River Basin's water footprint and water stress[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 157-167.
- [32] 孙才志, 杜杭成, 刘淑彬. 基于投入产出分析的辽宁省虚拟水消费与贸易研究[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(2): 117-121, 126.
- SUN C Z, DU H C, LIU S B. Analysis of virtual water consumption and trade in Liaoning province based on input-output model [J]. *Areal Research and Development*, 2020, 39(2): 117-121, 126.
- [33] 岳晨, 李凡, 付路路, 等. 天津市水资源生态足迹研究[J]. *水文*, 2022, 42(6): 56-60.
- YUE C, LI F, FU L L, et al. Research on the ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Tianjin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(6): 56-60.
- [34] MIALYK O, SCHYNS J F, BOOIJ M J, et al. Water footprints and crop water use of 175 individual crops for 1990—2019 simulated with a global crop model [J]. *Scientific Data*, 2024, 11: 206.
- [35] 徐长春, 黄晶, B. G. Ridoutt, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 873-880.
- CHANG C X, HUANG H, RIDOUTT B G, et al. LCA-based product water footprinting and a case study [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 873-880.
- [36] 金珏雯, 穆月英, 杨鑫. 跨流域调水背景下粮食区域贸易对粮食种植结构的影响: 基于“实体水-虚拟水”流动视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(12): 176-192.
- JIN J W, MU Y Y, YANG X. Impact of regional grain trade on grain planting structure in the context of inter-basin water transfer: Based on the perspective of 'physical water and virtual water' flow [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(12): 176-192.
- [37] JOY M K, RANKIN D A, WÖHLER L, et al. The grey water footprint of milk due to nitrate leaching from dairy farms in Canterbury, New Zealand[J]. *Australasian Journal of Environmental Management*, 2022, 29(2): 177-199.
- [38] 袁艳斌, 连怡雯, 袁晓辉, 等. 湖北省水足迹特征及变化驱动力[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(6): 40-44.
- YUAN Y B, LIAN Y W, YUAN X H, et al. Characteristics and change driving force of water footprint in Hubei province [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(6): 40-44.
- [39] 马忠, 张继良. 张掖市虚拟水投入产出分析[J]. *统计研究*, 2008(5): 65-70.
- MA Z, ZHANG J L. Analysis on virtual water in Zhangye city using regional input-output model [J]. *Statistical Research*, 2008(5): 65-70.
- [40] 阎晓东, 孙才志. 中国省际水足迹空间转移网络特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 602-613.
- YAN X D, SUN C Z. Study on the characteristics of inter-regional water footprint spatial transfer network in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(3): 602-613.
- [41] 王宁. 黄河流域虚拟水产业配置及贸易格局优化与调控[D]. 杨凌: 西北师范大学, 2023.
- [42] 中共中央, 国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要 [EB/OL]. (2021-10-08) [2025-05-28]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.
- [43] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. *The Review of Economics and Statistics*, 1936, 18(3): 105.
- [44] 房德琳, 宋长青, 黎成航, 等. 基于省际虚拟水流动的水资源压力及驱动因素[J]. *地理学报*, 2025, 80(3): 712-723.
- FANG D L, SONG C Q, LI C H, et al. Analysis of

- water stress and driving factors based on virtual water flows in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(3): 712-23.
- [45] ZHAO C F, CHEN B. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [46] 赵海荣, 孙伟, 黄顺兴. 基于LMDI法的镇江市二氧化碳排放影响因素分析[J]. *干旱环境监测*, 2024, 38(3): 112-118.
- ZHAO H R, SUN W, HUANG S X. Analysis of factors influencing carbon dioxide emissions in Zhenjiang city based on LMDI method [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2024, 38(3): 112-118.
- [47] 阳君, 肖作林, 徐伟峰. 基于LMDI模型的四川盆地作物水足迹时空演变及驱动因素分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 160-169.
- YANG J, XIAI Z L, XU W F. Analysis of spatiotemporal evolution and driving factors of crop water footprint in the Sichuan basin based on LMDI model [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 160-169.
- [48] 谭洁, 刘琴, 唐晓佩, 等. 基于LMDI模型的土地利用碳排放时空差异及影响因素研究:以洞庭湖区为例[J]. *地域研究与开发*, 2024, 43(1): 160-166.
- TAN J, LIU Q, TANG X P, et al. Spatial and temporal evolution of carbon emissions from land use and its influencing factors based on LMDI model: A case study of the Dongting Lake area [J]. *Areal Research and Development*, 2024, 43(1): 160-166.
- [49] 陈莹, 李绍亭, 任彦军. 2000—2020年中国城乡食物消费碳-水足迹及其驱动因素分析[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 287-296.
- CHEN X, LI S T, REN Y J. Analysis of the carbon-water footprint of food consumption and its driving effect in urban and rural areas of China from 2000 to 2020 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 287-296.
- [50] 中国碳核算数据库(CEADs). 投入产出表[DB/OL]. (2023-06-30) [2025-05-28]. https://www.ceads.net.cn/data/input_output_tables/.
- [51] AIDAYA M M, CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, et al. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard* [M]. London: Routledge, 2012.
- [52] 杨屹, 杨凤仪. 可持续发展目标6视角下黄河流域城市群水足迹时空演变及驱动因素[J]. *地理科学*, 2024, 44(5): 853-863.
- YANG Y, YANG F Y. Spatial-temporal evolution and driving factors of water footprint of urban agglomerations in the Yellow River Basin from the perspective of Sustainable Development Goal 6 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(5): 853-863.
- [53] 薄立明, 赵浪, 尹力, 等. 国土空间规划背景下黄河流域水生态空间格局演变特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 178-190.
- BO L M, ZHAO L, YIN L, et al. Evolution of hydro-ecological spatiotemporal pattern and its influencing factors in the Yellow River Basin in the context of the territorial spatial planning [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 178-190.
- [54] GRAHAM N T, HEJAZI M I, KIM S H, et al. Future changes in the trading of virtual water [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3632.
- [55] 周进宏, 雷霖, 陈静. 关中平原城市群水资源生态足迹时空变化和驱动效应研究[J]. *宝鸡文理学院学报(自然科学版)*, 2023, 43(4): 69-77, 86.
- ZHOU J H, LEI J, CHEN J. Spatio-temporal variation and the driving effects of water resources ecological footprint in Guanzhong Plain urban agglomeration [J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences: Natural Science Edition*, 2023, 43(4): 69-77, 86.
- [56] 王艳阳, 王会肖, 张昕. 基于投入产出表的中国水足迹走势分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(11): 3488-3498.
- WANG Y Y, WANG H X, ZHANG X. China water footprint trend analysis based on input-output tables [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11): 3488-3498.
- [57] 甘容, 李旖旎, 郭林, 等. 基于水足迹的黄河流域九省(区)水资源可持续利用评价[J]. *人民黄河*, 2024, 46(2): 93-99, 106.
- GAN R, LI Y N, GUO L, et al. Comprehensive evaluation of sustainable water resources utilization in nine provinces of the Yellow River Basin based on water footprint [J]. *Yellow River*, 2024, 46(2): 93-99, 106.
- [58] 姜翔程, 王睿. 基于LMDI-Attribution的江苏省水足迹效率变化驱动力分析[J]. *资源与产业*, 2022, 24(4): 30-41.
- JIANG X C, WANG R. Drives for Jiangsu's water-footprint efficiency changes based on LMDI-Attribution [J]. *Resources and Industries*, 2022, 24(4): 30-41.
- [59] 孙思奥, 汤秋鸿. 黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J]. *资源科学*, 2020, 42(12):

2261-2273.

SUN S A, TANG Q H. Spatiotemporal patterns and driving factors of water resources use in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2020, 42(12): 2261-2273.

- [60] 薛永基, 张园圆. 黄河中下游沿线城市碳:水足迹演进与时空差异研究[J]. *生态文明研究*, 2024(5): 94-108.

XUE Y J, ZHANG Y Y. Research on the temporal and spatial patterns of carbon and water footprints of cities along the middle and lower Yellow River [J]. *Journal of Eco-civilization Studies*, 2024(5): 94-108.

- [61] 陈岩, 童国平, 王蕾. 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式[J]. *水资源保护*, 2020,

36(6): 60-66, 85.

CHEN Y, TONG G P, WANG L. Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 60-66, 85.

- [62] 金祺, 杨银科, 孙建峰, 等. 基于LMDI和水足迹理论的西安市水资源压力驱动因素分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(11): 86-92, 98.

JIN Q, YANG Y K, SUN J F, et al. Analysis of water pressure driving force of water resources in Xi'an based on LMDI method and water footprint theory [J]. *Yellow River*, 2024, 46(11): 86-92, 98.

(编辑 邵煜)

作者简介



张子龙,教授,博士生导师,兰州大学地理系副主任、黄河流域绿色发展研究院副院长、碳达峰碳中和研究院院长,研究方向为经济地理与空间规划、产业生态与资源管理、减贫与区域可持续发展。兼任中国地理学会城市与区域管理专业委员会副主任、经济地理专业委员会委员,中国城市规划学会流域空间规划分会委员,中国区域科学协会理事,中国生态学会产业生态专业委员会委员,担任 *Regional Sustainability*、《世界地理研究》期刊青年编委, *RCR*、*JCLP*、*ESPR* 等期刊审稿人。主持完成国家自然科学基金、国家自然科学基金重大项目课题、国家重点研发项目子课题4项,在 *CSSCI*、*SCI*、*SSCI* 期刊上发表论文80余篇。获得国家扶贫开发工作成效第三方评估先进个人、甘肃省科技进步二等奖、德国绿色精英青年科学家奖等奖项。