

DOI: 10.5846/stxb202111113173

高向龙, 石辉, 党小虎. 基于投入产出模型的黄河“几字弯”城市群用水特征与节水关键区域. 生态学报, 2022, 42(24): 10150-10163.

Gao X L, Shi H, Dang X H. Characteristics of water use in the “Jiziwan” urban agglomeration of the Yellow River Watershed and key areas of water-saving based on input and output model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10150-10163.

基于投入产出模型的黄河“几字弯”城市群用水特征与节水关键区域

高向龙^{1,2}, 石 辉^{1,*}, 党小虎³

1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2 西安建筑科技大学安德学院, 西安 710311

3 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054

摘要:黄河“几字弯”区域是黄河流域的关键节点,是实现中西部崛起的关键区域,也是黄河流域生态环境保护和质量发展的战略支撑。然而,缺水已经成为制约“几字弯”地区经济社会发展的最大瓶颈。利用投入产出模型,从生产侧的实体水和消费侧的虚拟水出发,分析“几字弯”地区 18 个城市的用水量、结构变化和流入流出特征,结合生产与消费两个方面提出了“几字弯”地区城市群节水的重点区域及产业供水调整的建议。(1)“几字弯”区域虚拟水用量由 2007 年 648.5 亿 m³ 增加至 2017 年 778.4 亿 m³,增加了 20%,但实体水用量仅变化了-0.04%,各城市虚拟水增长类型差异较大。(2)18 个城市实体水占虚拟水的比例由 2007 年 41.7%下降至 2017 年 34.8%,水资源利用效率逐步提高;实体水的用水大户是农业,虚拟水的用水大户是制造业和农业,服务业实体水和虚拟水用量剧增。(3)区域 18 个城市虚拟水流入量增长明显,但整体仍呈现出虚拟水净流出的特征。制造业虚拟水流出量均在 188.9 亿 m³ 以上,流入量均不足 108.9 亿 m³,制造业在区域经济中具有一定的比较优势。(4)巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市是“几字弯”18 个城市中重点节水的对象。在这些城市中,农业用水比重较大,产出较低,农业是今后节水的重点。鄂尔多斯、包头、石嘴山、乌海制造业具有比较优势,巴彦淖尔的农业用水系数远远高于 18 个城市的平均值,需要控制其农业用水。对于鄂尔多斯、包头、石嘴山、乌海、巴彦淖尔 5 市,需要向当地的优势产业制造业和服务业进行供水倾斜、提高比较优势。

关键词:黄河“几字弯”城市群;投入产出;虚拟水;实体水;用水系数

Characteristics of water use in the “Jiziwan” urban agglomeration of the Yellow River Watershed and key areas of water-saving based on input and output model

GAO Xianglong^{1,2}, SHI Hui^{1,*}, DANG Xiaohu³

1 School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2 XAUAT UniSA An De College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710311, China

3 College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: “Jiziwan” section is a key node in the Yellow River Watershed, where is a key area for realizing the rise of the central and western regions, and it is also a strategic functional region for the ecological environment protection and high-quality development of the Yellow River Watershed. However, water shortage in this region has become the biggest bottleneck restricting the economic and social development. From the physical water on the production side and the virtual water on the consumption side, we used the input-output model to analyze the water consumption, structural changes,

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0501707)

收稿日期:2021-11-13; 网络出版日期:2022-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shihui@xauat.edu.cn

inflow and outflow characteristics of 18 cities in the “Jiziwan” area, in addition, we put forward the key points of water saving and the suggestions for industrial water supply adjustment in this region. (1) The virtual water consumption in the “Jiziwan” area increased from 64.9 billion m^3 in 2007 to 77.8 billion m^3 in 2017 with increase of 20%, but the entity water consumption only changed -0.04% , and the growth types of virtual water in different cities were quite different. (2) The ratio of entity/virtual water in 18 cities dropped from 41.7% in 2007 to 34.8% in 2017, and water resource utilization efficiency has gradually improved; the industry with the highest water consumption was agriculture, and the higher virtual water industry were manufacture and agriculture. The consumption of entity water and virtual water in the service industry has increased sharply in this period. (3) The inflow of virtual water in 18 cities has increased significantly, but the virtual water outflowing was still mainly in this area. The outflow of virtual water from the manufacturing industry in 18 cities was above 18.9 billion m^3 , and the inflow was less than 10.9 billion m^3 . It showed that the manufacturing industry had higher comparative advantages in “Jiziwan” area. (4) Bayannur, Zhongwei, Wuzhong, Shizuishan and Baiyin in “Jiziwan” region were the key cities for water-saving. In these cities, the agriculture water consumption was larger and the output is lower than other industries, and the agriculture was the focus of water-saving. The manufacturing industries of Ordos, Baotou, Shizuishan and Wuhai had the comparative advantages to others. The agricultural water use coefficient of Bayannur was much higher than the average value of 18 cities, and agricultural water use needs to be strictly controlled. It is necessary for Ordos, Baotou, Shizuishan, Wuhai and Bayannur to tilt the water supply to the local advantageous industries, manufacturing and service industries, and improve their comparative advantages.

Key Words: “Jiziwan” urban agglomeration of Yellow River Watershed; input-output model; virtual water; entity water; water use coefficient

水资源是社会稳定发展的重要保障,水资源短缺已经成为限制区域经济发展的重要因素。目前大多数的研究主要集中在实体水资源的消耗利用对区域社会经济的支撑作用,主要考虑实体水所能承载的社会经济规模,是从生产侧考虑水资源的压力与调控^[1];但实际生产中,区域经济的发展不仅有当地实体水资源所支撑的生产环节,还存在物质流通及其消费环节,这些过程也是区域经济的主体之一,但这一过程并未消耗当地的实体水资源。因此,从消费侧研究水资源的利用,为认识水资源的压力及其节水调控措施的指定提供了一条新的思路。虚拟水是以“虚拟”形式包含在产品中看不见的水,指的是某部门在生产某类商品或者在进行某种服务时所需要的水资源的量^[2],是从消费侧认识水资源的问题的有利工具,这概念的提出为合理配置水资源、缓解区域水资源压力提供了新的途径。程国栋院士首次将虚拟水概念引入了国内,认为虚拟水是西北干旱地区、缺水地带不可忽略的水资源形式,对它的认识和理解在水资源利用、生态环境的保护中具有至关重要的现实和理论指导意义^[3-4]。

生产中,通常从生产侧的实体水资源数量和利用效率制定区域的节水政策、确定节水关键环节,并通过调水工程解决区域实体水资源的供需矛盾。然而研究表明,以调水工程转移的实体水仅占全国供水量的小部分,但通过贸易流动的虚拟水转移量却超过了供水总量的 $1/3$ ^[5]。其中,轻工业和服务业是造成虚拟水贸易顺差的主要部门,农业、重工业是造成虚拟水贸易逆差的主要部门^[6],各个区域的虚拟水流动格局差异明显。在宏观上,我国虚拟水主要由内陆地区向沿海地区输送,其空间的转移主要受人口迁移因素的影响^[7],不同省份的虚拟水流动情况差异显著。北京市作为虚拟水净流入地区,主要的净进口虚拟水部门为农业和制造业^[8],其中的农业-制造业、农业-服务业虚拟水输出-输入关系显著^[9]。从京津冀尺度来看,农业部门用水强度最高^[10],河北省的农业部门向京津冀各部门输送了大量虚拟水^[11]。即使在降水丰富的广东^[12]、江苏^[13]也存在着虚拟水的输入,然而同为降水丰富的贵州省,则为虚拟水净输出地^[14],表现出落后地区向发达地区虚拟水输出的现象。

黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位,水资源的不足又成为限制黄河流域

发展的主要因素,然而黄河中游又是水资源压力转移的中间节点。从围绕黄河“几字弯”区域的五省区来看,其主导经济和比较优势主要在农产品和资源开发,但这些恰恰是需要实体水较多的行业和部门;这些产品的输出,导致虚拟水大量输出从而增加区域水资源的压力^[15]。宁夏是我国水资源最为贫乏的区域之一,但其虚拟水呈净输出量为 11.9 亿 m^3 ,而农业部门年输出虚拟水高达 24.6 亿 m^3 ^[16];甘肃省虚拟水净输出量为 24.5 亿 m^3 ,农业高达 28.8 亿 m^3 ^[17];陕西省虚拟水净输出 9.8 亿 m^3 ,农业流出 14.5 亿 m^3 ^[18];表现出农产品中虚拟水的输出加剧了用水矛盾^[19]。但与此相反的是,内蒙古虚拟水净流出量高达 146.1 亿 m^3 ,但其第一产业所占比重仅为 10%^[20];山西省的第一产业表现为虚拟水的净流入,达到 4.9 亿 m^3 ^[21]。一些专家认为,依靠跨省虚拟水的输入输出可缓解黄河流域的水资源压力^[22-23];但是黄河中下游虚拟水贸易密切,中上游虚拟水贸易关系较弱^[24]。

2021 年 10 月,中共中央、国务院印发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,构建形成黄河流域“一轴两区五极”的发展动力格局,其中的“五级”就包括黄河“几字弯”在内的五大城市群。作为黄河流域水资源管理的关键地带,“几字弯”流域是实现中西部崛起的关键区域、生态环境保护和高质量发展的战略支撑。近年来,“几字弯”周边城市处于快速发展阶段,城市群的建设初具规模,研究城市群内部和外部的虚拟水流动以及驱动因素,可从消费拉动的角度对水资源压力进行溯源,为区域内水资源优化配置、区域产业结构调整和未来施政方向提供科学依据。

1 区域概况

“几字弯”区域地处黄河中游,涉及甘肃省兰州、白银 2 市,宁夏自治区的中卫、银川、吴忠、石嘴山 4 市,内蒙古自治区的鄂尔多斯、包头、呼和浩特、乌海、巴彦淖尔 5 市,陕西省的榆林、延安、渭南 3 市,和山西省的忻州、吕梁、临汾、运城 4 个市(图 1),全区总面积 45.8 万 km^2 。该区域的气候从半湿润的季风气候到干旱的大陆性气候,大部区域年均降水量 150—650 mm,表现为东多西少,在时间分配上雨热同季年均降水量在 250—650 mm 之间。截止 2019 年,“几字弯”区域人口 4951.2 万人,年 GDP 总量 30420.2 亿元,人均 GDP 为 61440 元,与全国人均 GDP 相当;区域城市 GDP 的年增速大部分超过全国平均水平,各城市发展有着不同的要素禀赋,形成了各自的优势,经济发展势头良好^[25]。

从地理位置上看,“几字弯”是西部大开发和陆上丝绸之路的战略叠加区,该区域正好位于丝绸之路经济带东边亚太经济圈与西边欧洲经济圈的核心地段;从历史发展上看,“几字弯”具有边疆地区、革命地区、贫困人口相对集中地区、少数民族集中区、能源富集区、传统特色农牧区、民族文化主要发祥区等“七区合一”的显著特点,在国家战略发展中具有独特的地位。但是,“几字弯”地区水资源匮乏、季节性干旱频发、水土流失严重、生态环境脆弱^[26]。“几字弯”区域的水资源总量仅为 183.1 亿 m^3 ,区域内人均水资源量仅为全国平均水平的 18%,区域内人均用水量略高于全国平均水平 431.7 m^3 /人。农业是“几字弯”区域的第一用水大户,农业用水量占总用水量的 78.6%,高于全国平均值 62.3%;工业用水量却仅占总用水量的 12.2%,远低于全国平均值 21.1%。在该区域的大型水利工程建设和以节水为特色的水资源利用效率提高,使得区域的缺水问题得到了一定的改善,但区域内的用水矛盾依然存在。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

研究数据主要来源于 2007 年、2012 年、2017 年山西、内蒙、陕西、甘肃、宁夏五省级行政区的《投入产出表》。其中,农业用水数据来源于相应年份五省(自治区)的《水资源公报》,其它分行业用水数据来源于《2008 年中国经济普查年鉴》(能源卷),各市 GDP、部门的从业人员数、部门岗位平均工资来源于《中国统计年鉴》(2007 年、2012 年、2017 年)、《中国城市统计年鉴》(2007 年、2012 年、2017 年)。

由于各种统计数据不能完全匹配,因此将统计资料中的行业类别归结为具有通识性的 7 个类别,农业、采

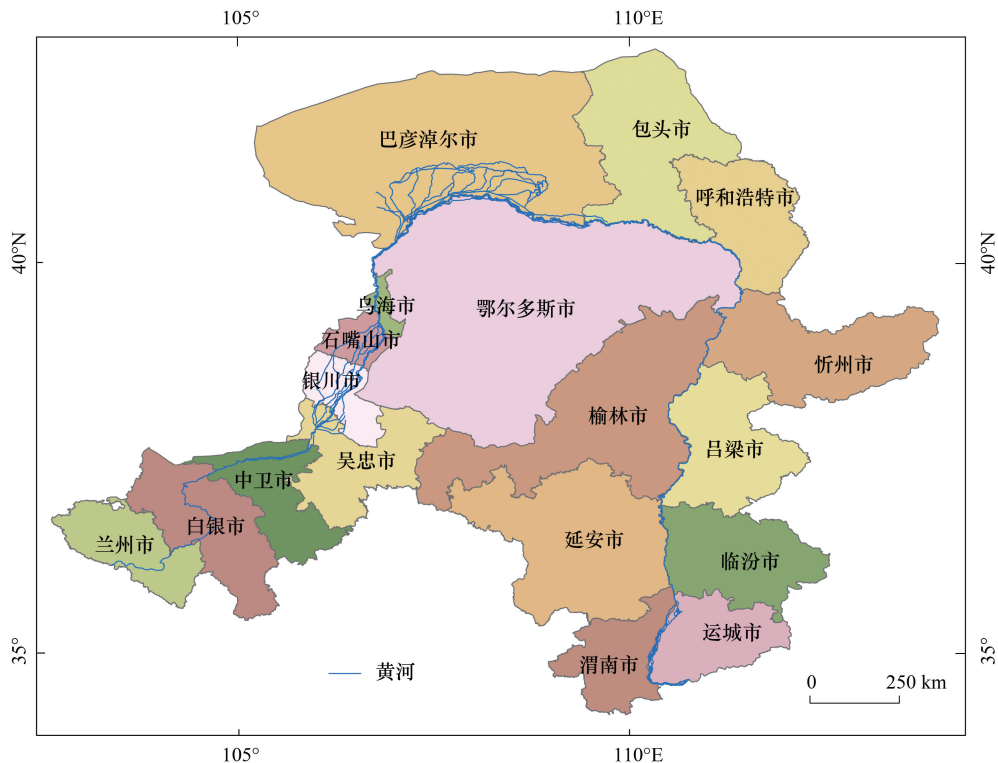


图1 黄河“几字弯”地区18个城市的分布图

Fig.1 The location of 18 cities in Jiziwan section of Yellow River Basin

矿业、制造业、能源供应业、建筑业、运输邮电业、服务业。7部门与原始投入产出表的对应关系如表1所示。其中,农业用水数据来源于研究年份的《水资源公报》;以《2008年中国经济普查年鉴》(能源卷)提供的各省用水数据同比例推算研究年份采矿业、制造业、能源供应业的用水量,按照各省相应年份《水资源公报》中对应城市工业部门的用水量进行校正;并以全国建筑业、运输邮电业、服务业用水总量及各省相应部门总产出所占比例,同比例推算研究年份建筑业、运输邮电业、服务业用水量^[10,27]。

就区域经济而言,经济增长与从业人员数的增加有较强的相关关系^[28],从业人员数量反映了区域的经济规模;从业人员薪酬收入与劳动生产率具有密切、正向互动的关系^[29],反映了生产的效率。在我国,由于政府公布的投入产出表仅以国家、省为单元发布,缺少地市层面的投入产出关系。因此,以《中国城市统计年鉴》中各城市的农业、采矿业、制造业、能源供应业、建筑业、运输邮电业、服务业7个行业从业人员占省级对应部门的比例,反映研究区域生产规模对部门产出的影响;对于同一行业部门,利用薪酬反应生产效率对部门产出的影响;以此分配得到市级层面的部门产出量:

$$x_{ij}^c = x_{ij}^p \times \frac{CP_j}{PP_j} \times \frac{CS_j}{PS_j} \quad (1)$$

式中, x_{ij}^c 和 x_{ij}^p 分别为该市级和省级 j 部门的产品在第 i 部门中的产出量(万元); CP_j 、 PP_j 分别为该市级和该省级 j 部门的从业人员数(人); CS_j 、 PS_j 分别为该市级和该省级 j 部门的在岗职工平均工资(元)。这样,通过得到的各市级层面的投入产关系,可以得到不同城市的投入产出表。

2.2 虚拟水计算

各部门实体水量和虚拟水用量与投入产出表存在以下关系^[30]:

$$VW_{dj} = DWC_j \times X_j \quad (2)$$

$$VW_{ij} = TWC_n \times X_j \quad (3)$$

表 1 投入产出表中的部门行业分类合并关系

Table 1 The combination relationship of sector and industry classification in input-output table

合并后行业划分 Combined industry	原投入产出表中的 42 个行业 42 industries in the original input-output table	
农业 Agriculture	农林牧渔产品和服务	
采矿业 Mining	煤炭采选产品	
	石油和天然气开采产品	
	金属矿物采选产品	
	非金属矿和其他矿采选产品	
制造业 Manufacture	食品和烟草	纺织品
	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其产品	木材加工品和家具
	造纸印刷和文教体育用品	石油、炼焦产品和核燃料加工品
	化学产品	非金属矿物制品
	金属冶炼和压延加工品	金属制品
	通用设备	专用设备
	交通运输设备	电气机械及器材
	通信设备、计算机和其他电子设备	仪器仪表
	其他制造产品	废品废料
	金属制品、机械和设备修理服务	
	电力、热力的生产和供应	燃气生产和供应
	水的生产和供应	
	建筑	
建筑业 Construction	建筑	
运输邮电业 Transportation and postal	交通运输、仓储和邮政	
服务业 Service	批发和零售	住宿和餐饮
	信息传输、软件和信息技术服务	金融
	房地产	租赁和商务服务
	科学研究和技术服务	水利、环境和公共设施管理
	居民服务、修理和其他服务	教育
	卫生和社会工作	文化、体育和娱乐
	公共管理、社会保障和社会组织	

式中, VW_{dj} 、 VW_{ij} 分别为 j 部门的用水量、虚拟水量(亿 m^3); DWC_j 为直接用水系数, TWC_j 为 j 部门的虚拟水系数(也称完全用水系数)(亿 m^3 /万元); X_j 为 j 部门的总产出(万元)。中间产品的直接消耗系数 a_{ij} 表示生产一个单位第 j 部门的产品所直接消耗的第 i 部门产品的数量,用 A 表示这个系数矩阵;虚拟水系数 TWC_j 与系数矩阵的关系可由公式(5)表示^[31]。

$$\{a_{ij}\} = \frac{x_{ij}}{x_j} \tag{4}$$

$$TWC_{1 \times n} = DWC_{1 \times n} \times (I - A)^{-1} \tag{5}$$

对于一个城市来说,其虚拟水总量不仅包括各个生产部门所需求的虚拟水,还包括商品流通中各种商品所携带的虚拟水,因此城市的虚拟水总量可以通过式(6)计算:

$$VW = \sum VW_j + \sum VW_{Ej} - \sum VW_{Oj} \tag{6}$$

式中, VW 为某个城市的虚拟水总量, VW_j 为城市内部生产过程中生产部门 j 所需要的虚拟水, VW_{Ej} 和 VW_{Oj} 分别为城市外部为 j 部门生产而流入和流出的虚拟水量。

对于市域内流入的虚拟水,难以区分外部流入产品的来源区域和各自的用水系数,来源复杂,因此主要采用全国的各个行业部门的用水系数计算虚拟水;而市域内流出的虚拟水,采用市域内各个部门的用水系数进行计算。

3 结果与分析

3.1 虚拟水特征

在 2007 年,“几字弯”18 个城市年虚拟水用量为 648.5 亿 m^3 ,平均为 36 亿 m^3 ,最高的为包头市 88.6 亿 m^3 ,最低为延安市 7.2 亿 m^3 ,最高与最低相差 10 倍;2012 年,“几字弯”18 个城市年虚拟水用量为 772.8 亿 m^3 ,平均为 42.9 亿 m^3 ,较 2007 年增加 19.2%,最高的为兰州市 70.1 亿 m^3 ,最低依旧为延安市 8.3 亿 m^3 ;2017 年,18 个城市年虚拟水用量为 778.4 亿 m^3 ,平均为 43.2 亿 m^3 ,较 2012 年仅增加 0.7%,虚拟水增速放缓,虚拟水最高与最低的城市分别为兰州市 115.2 亿 m^3 ,忻州市 13.6 亿 m^3 ,相差 9 倍。10 年时间,18 个城市的年虚拟水总量增加了 20%;最高用量增加 30%,最低用量增加 90.5%;整体上各城市的年虚拟水用量均在增加,特别是以往虚拟水用量较低的城市增长更快(图 2)。这说明,随着社会经济的发展,从消费侧对水资源的需求急剧增加。在 2007—2017 年中,由于“几字弯”18 个城市的经济发展速率不同和产业结构的调整,导致不同的城市虚拟水增长类型差异较大。陕西的渭南、榆林、延安 10 年时间虚拟水的用量增加巨大,分别为 112.9%、242.9%和 260.4%;而石嘴山、兰州、白银、忻州、吕梁、银川、运城分别为 60.3%、53.4%、29.5%、29.0%、27.6%、26.4%和 37.6%,有了显著的增加;鄂尔多斯、吴忠和临汾,虚拟水用量增加幅度较小,分别为 16.1%、7.5%和 6.1%;而乌海、巴彦淖尔、包头、呼和浩特和中卫,虚拟水用量在减少,分别减少 8.6%、14.0%、15.9%、18.0%和 22.1%(图 2)。

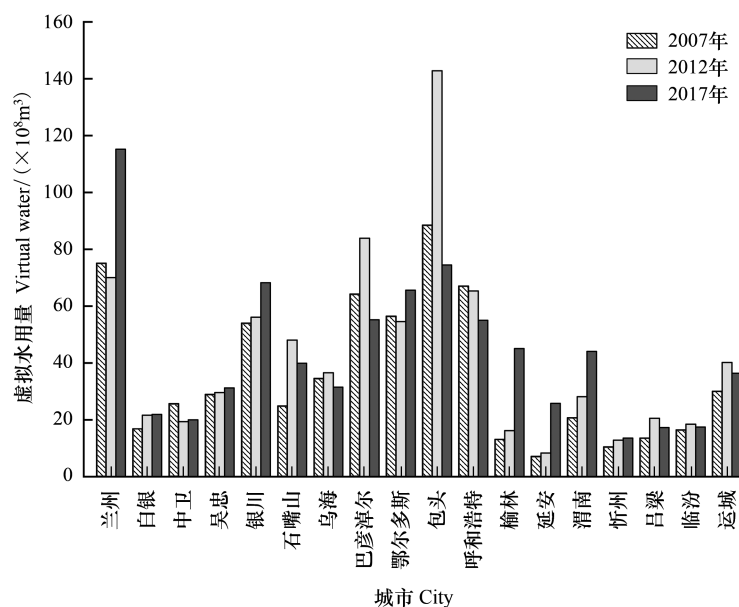


图 2 黄河“几字弯”18 个城市的虚拟水用量

Fig.2 The virtual water consumption of 18 cities in Jiziwan section of Yellow River Basin

3.2 实体水特征

长期以来,实体水的开源节流及再分配是解决区域水资源短缺的主要手段^[32]。在 2007 年,“几字弯”18 个城市年实体水用量为 237.9 亿 m^3 ,平均为 13.2 亿 m^3 ,最高的为巴彦淖尔市 49.6 亿 m^3 ,最低的陕西省的延安市 2.4 亿 m^3 ,最高与最低相差 21 倍;2012 年,18 个城市实体水用量为 244.4 亿 m^3 ,平均为 13.6 亿 m^3 ,较 2007 年增加 2.7%;到了 2017 年,18 个城市年实体水用量为 236.9 亿 m^3 ,平均为 13.2 亿 m^3 ,较 2012 年减小 -3.2%;最高最低为巴彦淖尔市和乌海市,分别为 49.4、2.6 亿 m^3 。2007—2017 年的 10 年间,18 个城市的年实体水总量变化不大,仅减少了 0.04%,但各城市实体水用量的变化存在明显不同。10 年间,各城市实体水变化率在 24.4%到 43.0%之间。实体水用量增加的城市主要集中在“几字弯”下游。运城市的实体水用量 10 年

从 11.4 亿 m^3 增加到 16.3 亿 m^3 , 增加了 43.0%; 其次为忻州市, 从 5.1 亿 m^3 增加到 6.7 亿 m^3 , 增加 29.5%, 榆林市和吕梁市分别增加 21.6% 和 20.6%。临汾、延安、渭南、白银 4 个城市的实体水增长较为缓慢, 增长率分别为 14.1%、13.6%、8.9% 和 3.0%。实体水用量下降的城市全部分布在“几字弯”中上游段的甘肃、宁夏、内蒙三省。其中, 下降最多的为兰州市, 下降了 -24.4%; 核心原因在于 2005—2019 年间兰州的工业用水效率大幅提升, 工业用水量下降了 54.0%, 农业大规模推广节水灌溉技术, 农业用水量下降 -39.3%^[33]。鄂尔多斯、巴彦淖尔、呼和浩特、石嘴山、银川、中卫、包头、吴忠、乌海各市实体水的下降幅度在 0.3%—13.6% 之间。作为研究区域的核心工业城市, 包头市 2007、2017 年实体水用量分别为 10.7 亿 m^3 、9.9 亿 m^3 , 下降 8.0%, 这与包头市虚拟水用量减少的趋势相同; 此外, 巴彦淖尔、呼和浩特、中卫、乌海实体水与虚拟水均出现了下降。以“几字弯”中段为分界线, 实体水用水量的变化表现出了中上游减少, 下游增加的空间分布特征(图 3)。

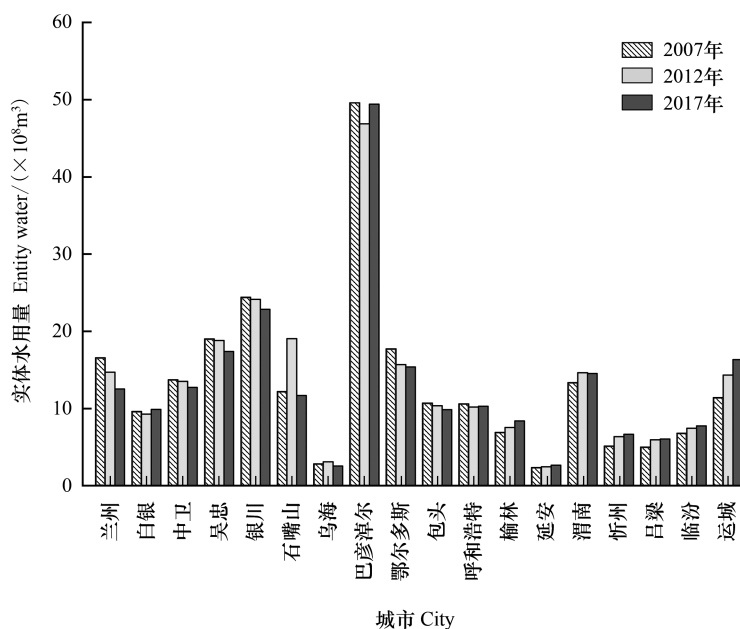


图 3 “几字弯”地区 18 个城市实体水特征

Fig.3 The entity water consumption in 18 cities in Jiziwan section of Yellow River Basin

3.3 用水的结构特征

实体水是当地能够实际使用的水资源量, 而虚拟水从消费侧反映了区域经济发展对水的消耗, 实体水/虚拟水比值被定义为用水结构。一个地区, 经济规模一定的情况下, 生产侧实体水用量越小, 消费侧虚拟水用量越高, 即实体水/虚拟水越小, 表明城市用水的投入量就越低, 单位用水量创造的经济价值就越高。在 2007—2017 年年间, “几字弯”18 个城市实体水/虚拟水的比值从 41.7% 降低到 37.7%, 再到 34.8%; 表现出该区域的水资源利用效率在逐步提高。在 2007 年, 兰州、呼和浩特、包头和乌海的实体水/虚拟水的比值为 22.1%、15.8%、12.1%、8.2%, 表现出较高的实体水利用效率; 石嘴山、忻州、银川、临汾、运城、吕梁、延安为 49.0%、48.7%、45.2%、41.3%、38.0%、36.9%、32.9%, 利用效率中等; 而巴彦淖尔、吴忠、渭南、白银、中卫、榆林实体水/虚拟水的比值为较高, 分别为 77.2%、65.5%、64.4%、56.8%、53.2%、52.4%, 实体水利用效率较低, 特别是巴彦淖尔市。2012 年, 总体的实体水/虚拟水的比值在降低, 兰州、呼和浩特、包头和乌海仍是最低, 但中卫、吴忠、巴彦淖尔和渭南的比值在 50% 以上, 分别为 69.8%、63.6%、55.9% 和 51.9%, 仍处于实体水/虚拟水利用效率较差的水平。2017 年, 实体水/虚拟水比值低于 20% 的有呼和浩特、榆林、包头、兰州、延安、乌海 6 座城市; 高于 50% 的有巴彦淖尔、中卫、吴忠, 特别是巴彦淖尔, 这一比值高达 89.5%。这说明巴彦淖尔、中卫、吴忠、忻州、白银等城市的实体水利用效率有很大的提升空间(图 4)。

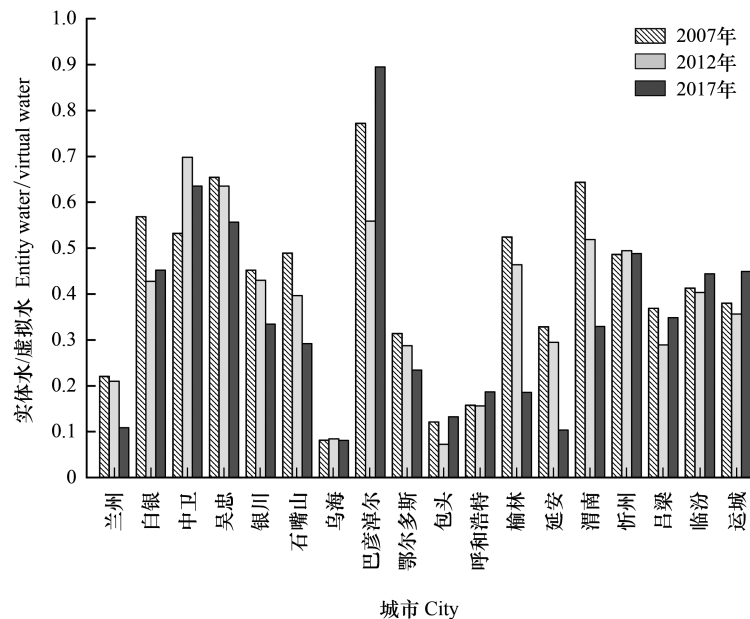


图4 18个城市实体水/虚拟水比值特征

Fig.4 The ratio of entity water consumption/virtual water consumption about 18 cities in "Jiziwan" section of Yellow River Basin

从行业来看,农业是实体水用水大户。2007年,农业部门实体水用量为193.6亿 m^3 ,采矿业为4.3亿 m^3 、制造业为17.1亿 m^3 、能源供应业为8.9亿 m^3 、建筑业为1.9亿 m^3 、交通运输业为0.2亿 m^3 、服务业为11.9亿 m^3 ,农业的实体水占据了总体的81.4%。2012年农业部门实体水用量为193.2亿 m^3 ,与2007年持平,但占比由81.4%下降至79.1%;建筑业和运输邮电业的实体水用量剧增,分别达到6.6亿 m^3 和2.9亿 m^3 ,分别为2007年的3.6和13倍。2017年农业部门实体水用量为186.3亿 m^3 ,出现下降趋势,占总实体水量为78.6%;这个时段建筑业和运输邮电业的实体水量用量出现了下降,但服务业的实体水用量出现了剧增,与2012年相比增加73.6%。农业和制造业是虚拟水利用大户,2007年,农业部门虚拟水用量为239.6亿 m^3 ,制造业为367.8亿 m^3 。采矿业、能源供应业、建筑业、运输邮电业、服务业分别为22.0亿 m^3 、20.8亿 m^3 、61.8亿 m^3 、22.6亿 m^3 、63.9亿 m^3 。2012年,农业部门虚拟水用量下降,为230.2亿 m^3 ,在虚拟水中的占比由30%下降至26.2%;采矿业、制造业、建筑业虚拟水用量上升,虚拟水用量分别为39.5亿 m^3 、398.9亿 m^3 、98.7亿 m^3 ;能源供应业、运输邮电业、服务业虚拟水用量变化不明显,分别为23.8亿 m^3 、21亿 m^3 、66.5亿 m^3 。2017年农业部门虚拟水用量依旧呈下降趋势,为222.4亿 m^3 ;采矿业、制造业虚拟水用量下降,分别为26.7亿 m^3 、313.3亿 m^3 。该时段建筑业虚拟水用量增加,为120.6亿 m^3 ,与实体水用量减少趋势相反,服务业虚拟水用量增加,为108.9亿 m^3 ,与实体水用量增加趋势相同;能源供应业、运输邮电业虚拟水用量较2012年持平(图5)。

3.4 虚拟水流动变化特征

2007、2012、2017年流入的虚拟水为106.4亿 m^3 、178.8亿 m^3 和219.1亿 m^3 ;流出的为297.3亿 m^3 、284.6亿 m^3 、312.5亿 m^3 。流入的虚拟水有增大的趋势,但流出的虚拟水是流入的1.4—2.8倍,表现出缺水地区虚拟水外流的共同特点^[34]。从部门来看,制造业流出量最大,分别为188.9亿 m^3 (2007年)、189.1亿 m^3 (2012年)、196亿 m^3 (2017年),其次是农业,分别为75亿 m^3 (2007年)、30.5亿 m^3 (2012年)、64.9亿 m^3 (2017年);其余各部3年流出量均在30亿 m^3 以下。流入量最高的是制造业,分别为65.2亿 m^3 (2007年)、108.9亿 m^3 (2012年)、93.1亿 m^3 (2017年);“几字弯”作为黄河流域重要的工业基地,能源供应业用水是支撑工业生产的重要保障,2007年和2017年,能源供应业虚拟水的流入量分别为4.1亿 m^3 、57亿 m^3 ,增加了13.7倍。10年间,农业部门流出量降低10.1亿 m^3 、流入量增加27.6亿 m^3 ,采矿业虚拟水流出量增加

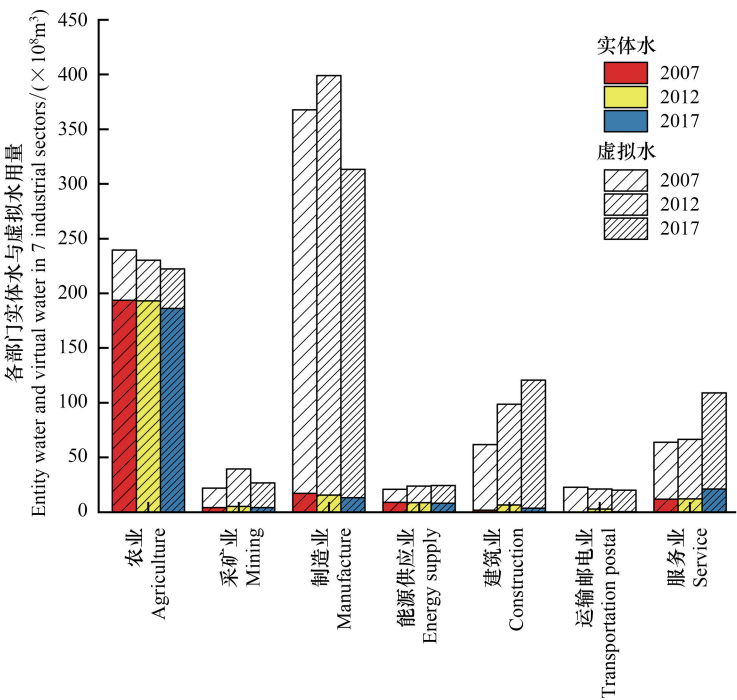


图5 各部门用水组成结构变化情况

Fig.5 The entity and virtual consumption in 7 different industrial sectors among 18 cities in Jiziwan section of Yellow River Basin

8.1 亿 m^3 、流入量增加 3.2 亿 m^3 ,制造业虚拟水流出量增加 7.1 亿 m^3 、流入量增加 27.8 亿 m^3 、能源供应业虚拟水流入量增加量显著高于流出量,虚拟水流出量增加 5.9 亿 m^3 、流入量增加 54.1 亿 m^3 ,建筑业虚拟水流出量增加 7 亿 m^3 、流入量降低 5 亿 m^3 ,运输邮电业虚拟水流出量降低 7.9 亿 m^3 、流入量降低 1.6 亿 m^3 ,服务业虚拟水流出量增加 5.1 亿 m^3 、流入量增加 6.6 亿 m^3 (图 6)。

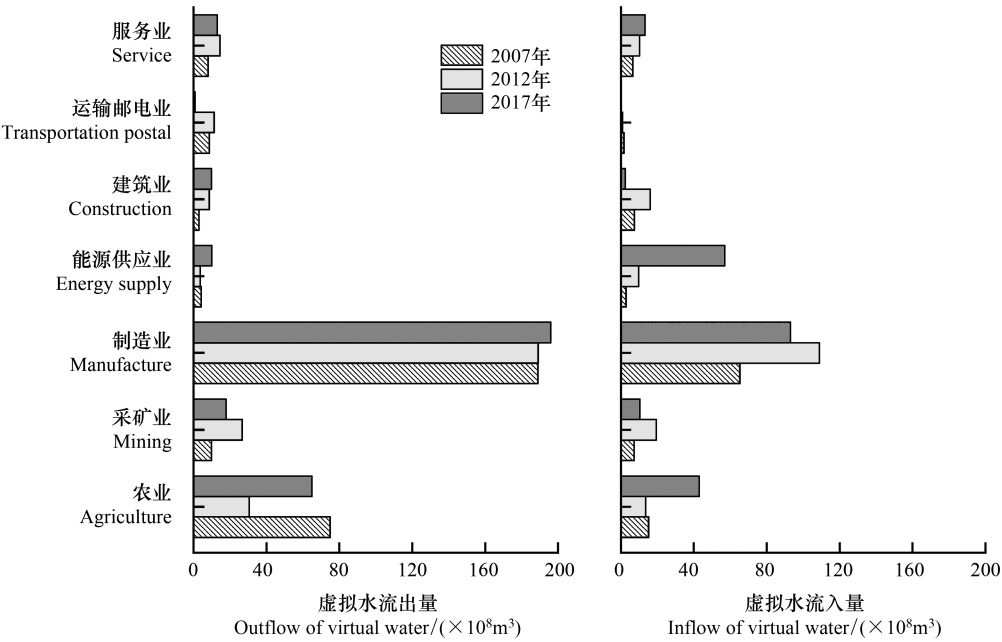


图6 各部门虚拟水流动情况

Fig.6 The flow of virtual water in different sectors

从城市来看,2007年到2017年间,虚拟水流入量与流出量均增加的城市有中卫、吴忠、银川、石嘴山、乌海、鄂尔多斯、榆林、延安、渭南、吕梁、运城,这些城市虚拟水流动强度呈增大趋势。其中,榆林市虚拟水流入流出总量增加最大,虚拟水流入量与流出量分别增加30.8亿 m^3 、6.6亿 m^3 。兰州、白银、呼和浩特虚拟水流入流出量均减小,兰州减小最多,流入量减小6.6亿 m^3 、流出量减小13.3亿 m^3 。巴彦淖尔、包头、忻州、临汾虚拟水流入量增加,流出量减小。巴彦淖尔和包头流出量分别减小8.9亿 m^3 、8.9亿 m^3 ,流入量分别增加0.7亿 m^3 、3.1亿 m^3 。忻州和临汾流出量分别减小0.02亿 m^3 、0.2亿 m^3 ,流入量分别增加1.6亿 m^3 、2亿 m^3 (图7)。

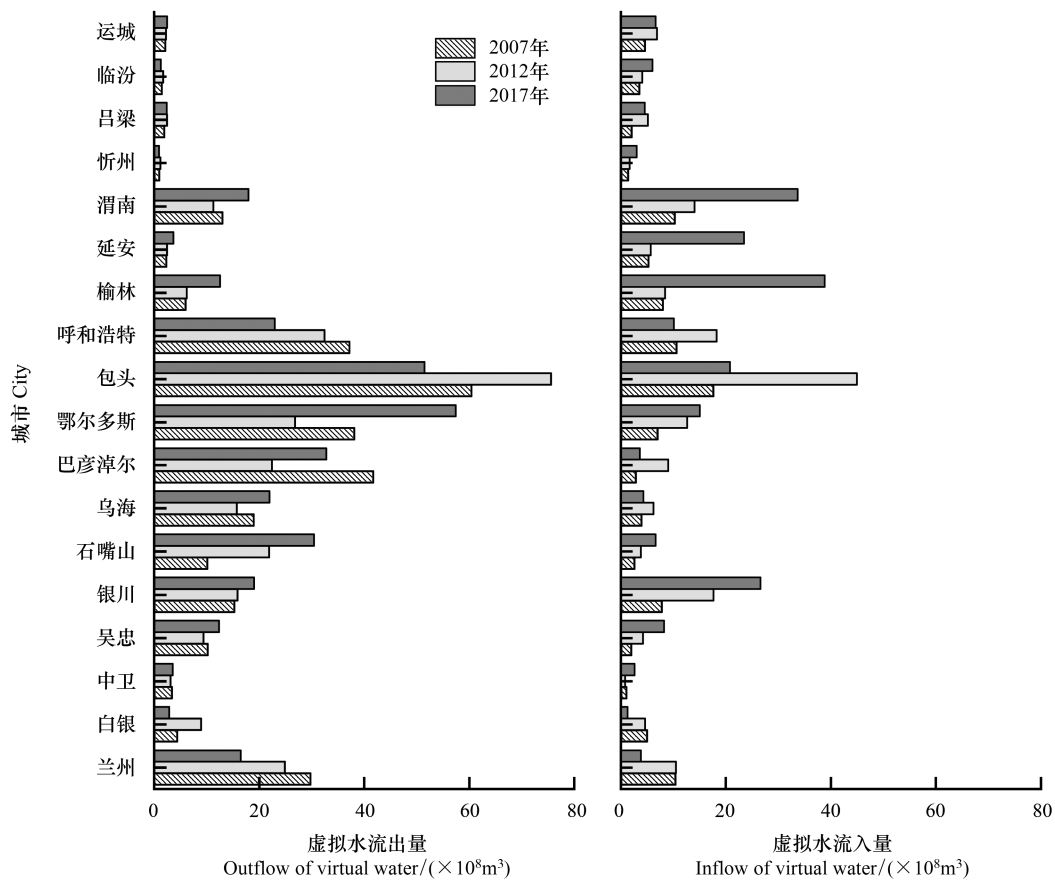


图7 各城市虚拟水流动情况

Fig.7 The flow of virtual water in different cities

4 讨论

2007年、2012年、2017年“几字弯”区域的实体水用量由分别为238亿 m^3 、244.4亿 m^3 和236.9亿 m^3 ,分别增加2.7%和-0.4%,变化并不明显;同期,虚拟水的用量分别增加了19.2%和0.7%。在此期间,“几字弯”区域18个城市的GDP总量由2007年的9576.1亿元增加到2012年的24000.4亿元和2017年的29794亿元,分别增加了1.5倍和2.1倍。将2017年的GDP数据与实体水用水系数进行分析,发现随GDP的增加实体水的用水系数(直接用水系数)出现了幂函数下降关系(图8)。这说明在黄河“几字弯”区域,经济的快速发展并没有引起实体水的用量剧烈增加,这为实体水用量较高的城市节水提供了理论依据。

2017年,“几字弯”18个城市直接用水系数的平均值为63.7 m^3 /万元,最大是巴彦淖尔的303.5 m^3 /万元,最小值是延安的7.2 m^3 /万元,大于平均值的仅有巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市;但其GDP在18个城市中相对较低,中卫、白银、吴忠、石嘴山4市垫底。因此,巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市可作为“几

字弯”城市中节水的主要对象,当其直接用水系数降低至平均值 $63.7\text{m}^3/\text{万元}$ 时,根据图 8 的回归方程,可以计算出此时的 GDP 为 685.8 亿元,相应的 GDP 增量为 -229.5 亿元、311.7 亿元、177.9 亿元、150.9 亿元和 235.3 亿元。说明直接用水系数的降低,不仅没有影响反而促进了中卫、吴忠、石嘴山和白银市 4 市的经济发展。巴彦淖尔市实体水的利用系数接近平均值的 5 倍,其用水系数降低到平均值, GDP 仅降低 25.1%,说明用水效率具有巨大的提高潜力,这与巴彦淖尔市的产业结构具有密切的关系。

2017 年,巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山、白银市 5 市的农业实体水用量分别为 47.5亿 m^3 、 11.6亿 m^3 、 16.1亿 m^3 、 9.8亿 m^3 、 8.1亿 m^3 ,占区域农业用水总量的 50%,农业实体水用量占比均在 80% 以上,分别为 96.1%、90.1%、93%、83.9%、82.4%,农业虚拟水消耗量分别为 51.4亿 m^3 、 13.9亿 m^3 、 19.2亿 m^3 、 11.6亿 m^3 、 9.7亿 m^3 ,占当地虚拟水消耗量的 93.1%、69.2%、61.5%、29%、44.3%,用于生产的实体水占比与消费过程中消耗的虚拟水占比并不匹配,特别是中卫、吴忠、石嘴山、白银 4 市,水资源的投入量比重远高于水资源的产出量比重。从经济结构来看,5 市第一产业总产出仅占当地总产出的 15.5%、15%、7.6%、2%、4.3% (表 2),农业作为这 5 市的主要用水产业,经济产出十分有限。继续保持农业部门现有的水资源投入产出量会限制当地经济的发展;白银、吴忠、石嘴山 3 市产出最高的部门

为制造业,制造业产出占比为 38.3%、34.8%、57.3%,其实体水所占比例仅为 5.7%、1.6%、5.8%,而对应的虚拟水占比却高达 37.4%、32.4%、93.5%,说明这 3 个城市的制造业水资源的投入产出比非常可观,具有较高的用水效率。中卫和巴彦淖尔市产出最高的部门为服务业,服务业产出占总产出的 30.7%、42.7%,实体水消耗量占比分别为 5.4%、1.8%,虚拟水消耗量占比分别为 11.3%、10.6%,说明中卫和巴彦淖尔市的服务业用水效率较高。因此,在“几字弯”18 个城市的规划与发展中,首先应该将巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市 5 个城市作为节水的重点城市,其水资源利用效率的提高对于“几字弯”区域水资源的利用具有重要的影响。在这些城市内部,农业是重要的节水行业和节水的重点,白银、吴忠、石嘴山 3 市的比较优势是制造业,中卫和巴彦淖尔市的比较优势是服务业。

虚拟水总量反映了区域的社会经济水平,是实体水生产和物质流通中的增值服务总和;虚拟水的输入输出可作为水资源调控的机制。2017 年,“几字弯”18 城市虚拟水净流出 57.8亿 m^3 ;其中鄂尔多斯、包头、石嘴山、巴彦淖尔、乌海虚拟水净流出量大,分别为 39.5亿 m^3 、 22.3亿 m^3 、 21.7亿 m^3 、 19.6亿 m^3 、 14.1亿 m^3 ,相当于向外分别流出了 9.3亿 m^3 、 3亿 m^3 、 6.3亿 m^3 、 17.6亿 m^3 、 1.1亿 m^3 的实体水。兰州、白银、中卫、吴忠、呼和浩特虚拟水净流出量在 $1.3\text{—}8.2\text{亿 m}^3$;银川、忻州、吕梁、临汾、运城呈虚拟水净流入状态,流入量在 $1.2\text{—}7.8\text{亿 m}^3$,榆林、延安、渭南虚拟水流入量较高,分别为 28.6亿 m^3 、 20.3亿 m^3 、 18.7亿 m^3 ,相当于向内分别流入 5.3亿 m^3 、 2.1亿 m^3 、 6.1亿 m^3 的实体水 (图 7)。鄂尔多斯、包头、石嘴山、巴彦淖尔、乌海及榆林、延安、渭南的用水结构受虚拟水流动影响较大 (表 3)。鄂尔多斯市制造业、采矿业虚拟水净流出量为总净流出量的 59.6% 和 20.1%,产出占当地总产出的 22.7% 和 34.6%。鄂尔多斯的优势产业是采矿业,但制造业是虚拟水净流出量最高的部门,对于鄂尔多斯市而言,可压缩制造业用水,并向采矿业供水倾斜。制造业也是包头、石嘴山、乌海净流出量最高的部门,占比分别 79.8%、103.6%、82.5%,其产出占当地总产出的 42.6%、57.3%、36.1%。3 市制造业虚拟水净流出量所占比例均高于产出所占的比例。从 3 市部门水资源的投入产出效率来看,制造业实体水消耗量分比为 1.9亿 m^3 、 0.7亿 m^3 、 0.4亿 m^3 ,分别占各市实体水消耗总量的 18.9%、16.4%、5.8%,制造业虚

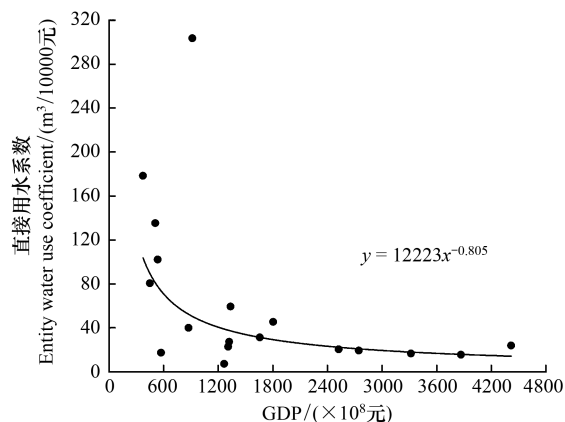


图 8 各城市实体水用水系数与 GDP 的关系

Fig. 8 The relationship between GDP and entity water use coefficient about 18 cities in Jiziwan region

拟水的消耗量分比为 55.9 亿 m^3 、37.4 亿 m^3 、24 亿 m^3 , 分别占各市虚拟水消耗总量的 37.4%、32.4%、93.5%, 水资源的投入产出比均非常可观, 尤其是石嘴山, 制造业虚拟水净流出量高于当地总流出量, 但生产过程中消耗的实体水占比却很低, 表现出该市制造业水资源利用效率高的特征。巴彦淖尔农业部门虚拟净流出量 17.3 亿 m^3 , 相当于流出了 15.5 亿 m^3 的实体水, 占实体水总量的 31.4%。因此, 收缩巴彦淖尔向外流出的农产品总量可有效减缓当地水资源压力。榆林、延安、渭南 3 市实体水用水系数高的农业部门表现出虚拟水向内流的形式, 其中榆林、延安 2 市实体水比重较其它城市更低, 分别 59.4%、41.6%; 3 市农业部门产出占总产出的 11.1%、8.9%、14.9%, 与农业相比, 采矿业、制造业、服务业作为 3 市的优势产业, 3 部门产出占当地总产出的 73.7%、76.3%、68%。这 3 市高耗水、低产出的农业部门通过虚拟水流入得到了水资源补偿, 且其自身农业实体水占比也相对较低, 而单位用水效益高的产业又为当地主要的经济支撑, 这种实体水与虚拟水的分布格局, 更有利于保障区域的水资源安全, 促进当地经济的高质量发展。

表 2 巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市 5 市用水结构

Table 2 Water structure of Bayannur, Zhongwei, Wuzhong, Shizuishan and Baiyin

项目 Items	部门 Sections	巴彦淖尔	中卫	吴忠	石嘴山	白银
各部门用水量	农业	47.520	11.581	16.143	9.793	8.143
Entity water/($\times 10^8 \text{m}^3$)	采矿业	0.029	0.011	0.005	0.017	0.109
	制造业	0.261	0.244	0.285	0.675	0.530
	能源供应业	0.660	0.164	0.169	0.173	0.213
	建筑业	0.082	0.060	0.096	0.098	0.037
	运输邮电业	0.010	0.004	0.002	0.003	0.001
	服务业	0.868	0.686	0.673	0.917	0.853
	总计	49.430	12.751	17.374	11.676	9.887
各部门总产出	农业	252.575	107.294	97.033	22.310	52.770
Total output/($\times 10^8$ 元)	采矿业	22.263	4.237	5.089	10.221	104.598
	制造业	165.410	148.788	447.568	655.154	470.768
	能源供应业	150.436	50.992	135.776	85.992	65.759
	建筑业	230.111	142.471	291.601	154.993	103.029
	运输邮电业	111.954	41.913	30.315	18.869	31.370
	服务业	695.819	219.452	277.161	195.654	399.793
	总计	1628.569	715.146	1284.542	1143.193	1228.088

表 3 鄂尔多斯、包头、石嘴山、巴彦淖尔、乌海、榆林、延安和渭南 8 市虚拟水流动结构

Table 3 Virtual water flow structure in Ordos, Baotou, Shizuishan, Bayannaoer, Wuhai, Yulin, Yan'an and Weinan

项目 Items	部门 Sections	鄂尔多斯	包头	石嘴山	巴彦淖尔	乌海	榆林	延安	渭南
虚拟水净流出量	农业	5.769	2.541	0.964	17.347	0.352	-7.205	-5.739	-4.061
Net outflow of virtual water/($\times 10^8 \text{m}^3$)	采矿业	7.931	0.381	-0.010	0.060	0.183	-0.664	-1.262	-0.383
	制造业	23.528	17.793	22.460	1.510	11.655	-5.886	-2.922	-5.579
	能源供应业	-0.188	-0.233	-1.385	0.046	0.048	-14.583	-9.953	-8.958
	建筑业	1.315	1.849	-0.157	0.409	1.357	0.204	0.016	0.557
	运输邮电业	0.218	0.102	0.000	0.032	0.058	-0.040	-0.020	-0.022
	服务业	0.933	-0.133	-0.203	0.222	0.470	-0.398	-0.466	-0.209
	总计	39.505	22.299	21.669	19.627	14.122	-28.573	-20.345	-18.655
各部门总产出	农业	45.186	41.267	22.310	252.575	2.235	560.137	328.303	694.923
Total output/ ($\times 10^8$ 元)	采矿业	2227.943	225.286	10.221	22.263	37.531	1108.159	1192.891	583.454
	制造业	1462.078	2715.807	655.154	165.410	530.049	1181.402	485.126	1217.922
	能源供应业	385.601	348.621	85.992	150.436	140.019	242.507	157.735	133.899
	建筑业	444.207	1248.146	154.993	230.111	368.002	355.223	301.838	570.330
	运输邮电业	490.866	460.149	18.869	111.954	101.477	172.817	88.135	88.415
	服务业	1375.448	1330.454	195.654	695.819	289.062	1430.888	1134.649	1362.540
	总计	6431.328	6369.729	1143.193	1628.569	1468.376	5051.133	3688.678	4651.482

5 结论

本文分析了黄河“几字弯”实体水与虚拟水的数量、流入流出的关系以及行业特征与经济发展,得到以下主要结论:

(1)在2007—2017年,“几字弯”区域18个城市的虚拟水增加20%,但实体水总量变化不大,不同城市之间存在显著差异。延安、榆林、渭南、忻州、吕梁、运城、临汾、白银8个城市虚拟水用量随实体水增加而增加,乌海、巴彦淖尔、包头、呼和浩特、中卫5个城市虚拟水用量随实体水用量减小而降低;石嘴山、银川、吴忠、鄂尔多斯、兰州5个城市实体水用量减少,虚拟水用量增加。

(2)“几字弯”18个城市实体水占虚拟水的比例由2007年41.7%下降至2017年的34.8%,水资源利用效率在逐步提高。农业仍是实体水用水大户,农业中实体水所占比例虽然由2007年的81.4%下降到2017年的78.6%,但农业依然具有较高的节水潜力。2007—2017年,服务业实体水和虚拟水用量剧增,分别为79.1%和70.4%,是供水需求增长最快的部门。制造业是虚拟水用水大户、实体水利用相对较少。

(3)从虚拟水流动的角度来看,虚拟水流入量增长明显,但整体依旧呈虚拟水净流出状态。2007年—2017年,流出的虚拟水是流入的1.4—2.8倍,表现出缺水地区虚拟水外流的共同特点。

(4)巴彦淖尔、中卫、吴忠、石嘴山和白银市5个城市水资源利用效率较低,可作为今后一段时间内节水的主要对象;5个城市的农业用水比重较大,产出较低,是今后节水的重点。鄂尔多斯、包头、石嘴山、乌海虚拟水净流出最高的部门为制造业,是当地的优势产业;巴彦淖尔虚拟水净流出最高的部门为农业,而当地优势产业为服务业;通过对优势产业的供水倾斜、提高比较优势,可促进“几字弯”区域的社会经济发展。

对于特定的区域,由于受自然、人文、社会经济等因素的影响,实体水资源利用效率存在上限,因此节水不可能无限进行。而虚拟水消耗量较大的部门往往是该地区具有比较优势的产业,这种比较优势的体现通过流通表现为缺水地区的水资源流出,特别是对落后地区而言,反而体现在耗水较多的产业上。为了区域水资源的合理利用,必须综合考虑生产侧的实体水和消费侧的虚拟水,以此保证区域经济和水资源的高效利用。

参考文献(References):

- [1] 田欣,熊翌灵,刘尚伟,唐志鹏. 中国省际水资源压力的转移模式. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 75-83.
- [2] Allan J A. Virtual water: A long term solution for water short Middle Eastern economies. 1997 British Association Festival of Science, Roger Stevens Lecture Theatre, University of Leeds, Water and Development Session-TUE.51, 14.45, September 1997.
- [3] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路. 中国科学院院刊, 2003 (4): 260-265.
- [4] 程国栋. 虚拟水: 水资源与水安全研究的创新领域. 科学新闻, 2003(15): 13.
- [5] Zhao X, Liu J, Liu Q, Martin R, Tillotson, Guan D, Klaus H. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [6] 许爽爽. 基于投入产出表的中国行业水足迹核算分析[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018.
- [7] 杜依杭,王钧,鲁顺子,李婧贤,蔡爱玲. 城市化背景下中国虚拟水流动空间变化特征及其驱动因素研究. 北京大学学报, 2019, 55(6): 1141-1151.
- [8] 刘雅婷,王赛鸽,陈彬. 基于投入产出分析的北京市虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(6): 1930-1940.
- [9] 姜珊,秦长海,朱永楠,王庆明,王丽珍,何国华. 北京市虚拟水消费与贸易分析. 南水北调与水利科技, 2021, 19(5): 853-861.
- [10] 孙思奥,郑翔益,刘海猛. 京津冀城市群虚拟水贸易的近远程分析. 地理学报, 2019, 74(12): 2631-2645.
- [11] 曹涛,王赛鸽,陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(3): 788-799.
- [12] 谭圣林,邱国玉,熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355-364.
- [13] 吴兆丹,张珊珊,马子建,吴兆磊. 江苏省虚拟水贸易结构调整研究. 水利经济, 2017, 35(3): 31-36+76.
- [14] 吴昊,张兴奇,都金康. 基于水足迹理论与LMDI模型的贵州省水资源利用评价. 中国岩溶, 2019, 38(5): 696-703.
- [15] Cai B, Zhang W, Hubacek K, Feng K, Li Z, Liu Y, Liu Y. Drivers of virtual water flows on regional water scarcity in China. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1112-1122.
- [16] 黄晓荣,裴源生,梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方法. 水科学进展, 2005, 16(4): 564-568.

- [17] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 赵旭. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. 生态学报, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [18] 秦昌波, 张志霞, 贾仰文, 葛察忠, 解建仓. 基于投入产出模型的陕西省虚拟水分析. 水利经济, 2012, 30(5): 1-6+75.
- [19] 韩昕雪琦, 安婷莉, 高学睿, 王玉宝, 吴普特. 我国西北地区主要农作物贸易对区域水资源影响. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 82-97.
- [20] 张金良, 蒋桂芹, 杨立彬, 赵雨婷. 基于投入产出分析的内蒙古虚拟水消费及贸易研究. 水电能源科学, 2018, 36(9): 52-54+18.
- [21] 李方一, 刘卫东, 刘红光. 区域间虚拟水贸易模型及其在山西省的应用. 资源科学, 2012, 34(5): 802-810.
- [22] 蔡玉霜. 黄河流域实施虚拟水贸易的补偿机制研究. 江西农业学报, 2014, 26(6): 127-131.
- [23] 田贵良, 许长新. 虚拟水贸易理论及其在黄河流域实践的设想. 甘肃社会科学, 2007(5): 224-227.
- [24] Tian G, Han X, Zhang C, Li J, Liu J. Virtual Water Flows Embodied in International and Interprovincial Trade of Yellow River Basin: A Multiregional Input-Output Analysis. Sustainability, 2020, 12(3): 1251.
- [25] 安树伟, 张双悦. 黄河“几”字弯区域高质量发展研究. 山西大学学报, 2021, 44(2): 134-144.
- [26] 胡正源. 第四极: 中国黄河几字湾战略经济区. 北京: 中共中央党校出版社, 2013.
- [27] 丁超, 胡永江, 王振华, 赵娜, 董文秀, 王黎明. 虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价. 自然资源学报, 2021, 36(2): 356-371.
- [28] 丁元, 周树高, 杜富荣. 论从业人数与经济增长的关系. 中国劳动, 2003(8): 14-16.
- [29] 国家统计局苏州调查队课题组. 工资收入与劳动生产率关系初探. 统计科学与实践, 2013(12): 26-28.
- [30] 许健, 陈锡康, 杨翠红. 直接用水系数和完全用水系数的计算方法. 水利规划设计, 2002(4): 28-30+36.
- [31] 蒋璐. 基于投入产出分析的中国虚拟水贸易研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [32] 杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 181-190.
- [33] 李玮丽. 兰州市水资源承载力评价及模拟预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [34] 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.