

虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控

张家欣¹, 邓铭江^{1,2}, 李鹏², 李占斌², 黄会平³, 时鹏², 冯朝红²

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;
3. 华北水利水电大学水资源学院, 郑州 450046)

摘要: 西北地区在我国经济建设、社会稳定、国土安全方面都具有极其重要的战略地位, 但水资源短缺、生态环境脆弱, 当地经济发展与居民生活质量改善受制于稀缺的水资源。本文基于水足迹和虚拟水视角, 分析了西北地区 2000—2018 年农业生产和贸易特征, 以此明确虚拟水流动对当地水资源的影响。研究数据表明, 2000—2018 年西北地区农作物生产水足迹呈波动上升趋势; 虚拟水流出规模随着水果、棉花输出量的增大而逐渐增加, 2018 年水果、棉花的虚拟水输出量为 $3.212 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 占到作物生产水足迹总量的 69.8%; 黄河流域是西北地区虚拟水的主要流入区, “奇策线”西北部是西北地区虚拟水的主要流出区。鉴于西北地区水资源严重短缺, 而水果、棉花种植更多用于贸易以期带动经济的现状, 优化作物种植和虚拟水贸易结构并与跨区域调水相结合, 是实现实体水—虚拟水循环调控、缓解水资源供需矛盾、保障区域水安全的关键措施。

关键词: 西北地区; 农作物生产和贸易; 水安全; 粮食安全; 实体水—虚拟水循环调控; 区域协调发展

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A

Security Pattern and Regulation of Agricultural Water Resources in Northwest China from the Perspective of Virtual Water Flow

Zhang Jiaxin¹, Deng Mingjiang^{1,2}, Li Peng², Li Zhanbin², Huang Huiping³,
Shi Peng², Feng Chaohong²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048, China; 3. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Northwest China is strategically crucial for China's economic development, social stability, and national defense security. However, the shortage of water resources and its fragile ecological environment have been hindering local economic development and life quality improvement for local residents. In this study, we analyze the characteristics of agricultural production and trade in Northwest China from 2000 to 2018 from the perspective of water footprint and virtual water, and clarifies the impact of virtual water flow on local water resources. Research shows that the water footprint regarding crop production in Northwest China showed a fluctuating upward trend from 2000 to 2018. The outflow scale of virtual water gradually increases alongside with the transfer-out of fruits and cotton. The outflow of virtual water regarding fruits and cotton in Northwest China was $3.212 \times 10^{11} \text{ m}^3$ in 2018, accounting

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-10-07

通讯作者: 李鹏, 西北旱区生态水利国家重点实验室教授, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持; E-mail: lipeng74@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国西北‘水三线’空间格局与生态—经济协同配置战略”(2020-XZ-14)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

for 69.8 % of the total water footprint regarding crop production. The Yellow River Basin is the primary inflow area of virtual water from Northwest China, and the region northwest to the “Qice line” is the primary outflow area of virtual water. Water shortage is severe in Northwest China and fruit and cotton are planted for trade to drive economic growth. Therefore, optimizing the crop planting and virtual water trade structures and encouraging inter-basin water transfer are key measures to regulate physical-virtual water cycle, alleviate the contradiction between water supply and demand, and ensure regional water security.

Keywords: Northwest China; crop production and trade; water security; food security; regulation of physical and virtual water cycle; regional coordinated development

一、前言

在我国西北地区，水资源是经济社会发展的命脉，有水就有绿洲，无水皆为荒漠。西北地区作为我国光热资源、土地资源的主要储备地 [1]，对国家经济建设、社会稳定、国土安全都具有重大的价值 [2]。农业产业的发展对于西北地区崛起起着不可替代的作用，然而西北地区是全国最缺水的区域，气候干旱、降雨量少、蒸发量大，水资源总量仅占全国的 5.7%，单位面积水资源量仅为全国平均水平的 15%。尤为突出的是，农业用水占到西北地区用水总量的 80%，水资源供需矛盾突出，水土资源配置失衡，经济发展水平受到严重制约 [3]。因此，充分缓解水资源所面临的严峻压力，可靠承载农业经济的可持续发展，稳定支撑区域粮食供给安全，是实现西北地区健康持续发展的关键所在。

虚拟水概念在 20 世纪末被提出 [4]，为解决水资源短缺问题提供了新的研究视角 [5]，支持研究者重新审视虚拟水视角下的粮食安全、水安全、农产品贸易等课题。经过多年发展，学术界将虚拟水与水足迹概念相结合，认为农产品在生产和消费过程中对水资源的需求可称为“农产品生产（消费）水足迹”，而在农产品发生贸易时才称之为虚拟水 [6]。目前，水足迹依然是相关领域研究和应用的热点，有关水足迹和虚拟水的研究集中在时空差异变化、具体农产品的水足迹计算、与经济水平的耦合关系 [7,8] 等方面；对于水足迹视角下作物生产、消费、贸易情况以及在当前虚拟水流动情况下如何破解水土资源配置不均衡等问题，已有研究涉及不多。

当前，西北地区几乎所有的内陆河流都处于过度开发利用状态，粮食、棉花、瓜果等主产区重心不断北移，使得区域内为了维持棉花、特色林果等大宗农产品流出的虚拟水经济而消耗了 30%~40% 的水资源；当地的水资源状况很难支撑经济社会的

可持续发展目标，西北内陆地区的水安全在中远期面临隐患。针对于此，本文通过剖析大宗农作物生产水足迹的组成及时空演变规律，评价虚拟水流动对区域水资源的影响，尝试提出解决西北地区水资源安全的新发展思路，以期为维系以牺牲生态环境为代价的“虚拟水经济发展模式”提供改善建议。

二、西北地区水资源调控需求分析

（一）水资源紧缺

西北地区是我国重要的粮食生产后备基地，以占全国 10% 的水资源量、15% 的粮食种植面积生产了全国 12% 的粮食 [9]，承担了我国新增 5×10^{10} kg 粮食生产能力任务中的 65 %。然而，西北地区多年平均地表水资源量为 $1.426 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，地下水资源量为 $6.996 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，水资源多年平均总量只有 $1.593 \times 10^{11} \text{ m}^3$ （扣除重复量，仅占全国总量的 5.7%），是我国最缺水的区域 [1]。

近几十年来，我国气候暖湿化现象明显，如西北干旱地区的平均温度上升速率为 $0.4 \text{ }^\circ\text{C} / 10 \text{ a}$ ，降水量增加速度为 $10.1 \text{ mm} / 10 \text{ a}$ [10]。但从区域水资源量的角度看，这种暖湿化趋势所带来的改善微乎其微：一是西北地区的降水量普遍为 $150 \sim 250 \text{ mm/a}$ ， 1 mm/a 的增长趋势不会改变其降雨量特征；二是西北地区干旱严重，河道和水面蒸发强烈，潜在蒸散量是降水量的 5 倍以上，因而西北干旱区的暖湿化所带来的水资源增加难以改变该区域的干旱特征；三是西北地区的东部降雨量并未呈现出增加趋势。

（二）开发利用量大但效率较低

西北地区水资源开发利用率高，水资源严重超载，用水安全存在巨大隐患。近年来，全国水资源的开发利用率为 22.6%，而西北地区达到 59.8%，其中黄河流域为 62.6%，内陆河流域为 56.3%；尤

其是在石羊河流域、黑河流域、塔里木河流域、准噶尔盆地，内流区水资源开发利用分别高达 154%、112%、91%、92%。

与此同时，西北地区的用水效率相对较低。受客观（干旱和半干旱区）和主观因素的综合影响，2018 年西北地区农田灌溉定额为 476.59 m³/亩（1 亩 ≈ 666.7 m²），是全国平均值的 1.31 倍；万元国内生产总值（GDP）用水量为 224.43 m³/万元，是全国平均值的 3.36 倍；单位水 GDP 产出量为 44.6 元/m³，仅为全国平均值的 30%。

（三）用水结构不合理

从供水结构来看，2018 年西北地区总供水量为 9.29×10¹⁰ m³，其中地表水为 7.16×10¹⁰ m³（占比为 77.1%），地下水为 2.016×10¹⁰ m³（占比为 21.7%），回用污水及利用雨水为 1.133×10⁹ m³（占 1.2%）。从用水结构来看，在 2018 年西北地区全部用水量中，农业用水为 7.71×10¹⁰ m³（占比为 83%），工业用水为 5.117×10⁹ m³（占比为 5.5%），生活用水为 3.581×10⁹ m³（占比为 3.8%）。这些数据表明，西北地区农业用水量过大，用水结构不合理。从用水的发展趋势来看，近二十年来西北地区对生态建设的重视程度逐年增加，但受限于发展水平和发展模式，农业仍然是最主要的产业。

水资源匮乏、生态环境脆弱，有限水资源能否持续支持以农业为主的发展模式，仍然是西北地区发展面临的迫切问题。尤为典型的是，西北地区的大宗农产品以虚拟水的形式转移到中部、东部地区，如新疆维吾尔自治区生产了全国 80% 以上的棉花，为全国供应了大量优质果品。这种以牺牲生态环境为代价的“虚拟水经济”如何维系，是西北地区可持续发展面临的重大抉择。

三、研究方法数据来源

（一）研究区概况

从地形地貌、水文气象、生态景观、社会经济的梯度分布及空间分异特征的角度，可用 3 条大致平行的线对西北地区进行空间格局划分，即西北“水三线”[1]：“胡焕庸线”“阳关线”“奇策线”。“胡焕庸线”作为我国人口、社会经济、生态景观、气象降水分布沿“爱辉—腾冲”一线的天然分界线，

是我国的“九成线”。“阳关线”平行于“胡焕庸线”，向西到敦煌市，是我国干旱区与半干旱区的分界线。“奇策线”是新疆维吾尔自治区人口、经济、水资源时空分布的“九成线”，即此线以西的水资源占全疆 93%，人口、GDP 分别占到全疆的 87%、89%。

考虑市级行政边界区划的因素，将西北“水三线”划分为半干旱草原区、黄河流域、河西内陆河流域、柴达木盆地、新疆地区；再根据天山、“奇策线”，将新疆地区划分为“奇策线”东北、“奇策线”东南、“奇策线”西北、“奇策线”西南等区域。

（二）研究方法

作物生产水足迹（ W , m³/kg）指单位质量的作物在生产过程中消耗的广义水资源量，包括绿水足迹（土壤水， W_{green} ）、蓝水足迹（灌溉水， W_{blue} ）[11,12]。按照《水足迹评价手册》[13]，水足迹计算方法如下：

$$W = W_{\text{green}} + W_{\text{blue}} = 10E_c/Y \quad (1)$$

$$E_{\text{green}} = \min(E_c, P_{\text{eff}}) \quad (2)$$

$$E_{\text{blue}} = \max(0, E_c - P_{\text{eff}}) \quad (3)$$

$$E_c = E_0 \times K_c \quad (4)$$

式（1）~（4）中， Y 为作物单产量（kg/hm²），常量因子 10 是将水的深度（mm）转化为单位陆地面积水量（m³/hm²）的转化系数， E_{green} 、 E_{blue} 分别为作物蒸发蒸腾量中有效降水部分、灌溉水部分（mm）， K_c 为作物系数， P_{eff} 为作物生育期所利用的有效降水量（mm）， E_0 为作物潜在蒸散量（由彭曼公式计算，mm/d）。

作物消费水足迹（ WF_{con} ）指区域内居民通过消费来占据消费品中所包含的水资源量，计算公式为：

$$W_{\text{con}} = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i \quad (5)$$

$$P_i = P_{\text{city}} \times N_{\text{city}} + P_{\text{country}} \times N_{\text{country}} \quad (6)$$

式（5）、（6）中， W_{con} 为研究区农产品消费水足迹总量（m³）， i 代表消费的农产品类型， P_i 为该类型农产品的年消费总量； P_{city} 、 P_{country} 分别为对应年份下该类型农产品的城市、乡村人均消费量， N_{city} 、 N_{country} 分别为对应年份下城市、乡村常住人口数。

基于区域农业在生产—消费模式下的虚拟水流动过程，即可比较区域内农产品生产水足迹总量与

消费水足迹总量的大小关系 [14]。在分析区域的虚拟水流动量时,应当假设:消费的农产品优先来自于本地区,提供消费后的剩余农产品全部出口到区域外。相应计算公式如下:

$$W_{\text{flow}}=W-W_{\text{con}} \quad (7)$$

式(7)中, W_{flow} 为虚拟水流动量;若 $W > W_{\text{con}}$, 即区域的虚拟水输出到其他地区(国家),差值为输出量;若 $W < W_{\text{con}}$, 即区域虚拟水需要从其他地区(国家)输入,差值为输入量。

采用水资源压力指数 β [15] 来反映区域生产水足迹对区域可利用水资源的占用情况,计算公式为:

$$\beta = \frac{W}{G} \quad (8)$$

式(8)中, G 为区域可利用水资源量。

(三) 数据来源

2000—2018年,西北“水三线”逐日气象观测数据(最高气温、最低气温、相对湿度、降水量、风速、水汽压、日照时数等气象因子以及各站点的经纬度、海拔高程)来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>);作物产量、播种面积、消费量、人口等数据来源于相关省份的统计年鉴和经济年鉴;可利用水资源量来源于相关省份的水资源公报。

四、西北地区农业生产及贸易用水趋势分析

(一) 作物生产水足迹

2000—2018年,西北“水三线”作物生产水足迹呈现先增后减的趋势:从2000年的 $1.243 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 增加至2015年的 $1.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 随后因2015—2018年作物种植面积下降至 $1.401 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 而导致作物生产水足迹呈现持续性的下降趋势,2018年降至

$1.601 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。从用水结构来看,作物生产蓝水、绿水足迹的占比分别保持在67.2%~72%、28.0%~32.8%(见表1),这与西北“水三线”降雨量较少而需要更多的灌溉水来补给有关。

2000—2018年,西北“水三线”具体分区作物的水足迹时空变化差异性显著(见图1)。从时间分布来看,“奇策线”西南部、“奇策线”西北部、黄河流域变化剧烈,以2015年为分界点,作物水足迹呈现出先增加后下降的趋势;半干旱草原区、河西内陆河流域的总生产水足迹近二十年来一直呈增加趋势,年增长率分别为23.2%、27.8%;“奇策线”的东北部、东南部作物水足迹变化量相对较少,2000—2018年分别增加了 $9.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $34.5 \times 10^9 \text{ m}^3$;柴达木盆地的作物水足迹与其他各区差距悬殊,常年维持在 $6 \times 10^8 \sim 8.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从空间分布来看,黄河流域作物生产水足迹最大($6.319 \times 10^{10} \text{ m}^3$),“奇策线”西北部次之,两区作物合计占比超过60%,表明农业耗水量较高;作物水足迹在 $1 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的有半干旱草原区、“奇策线”西南部;其余4个区在 $1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以下。其中,柴达木盆地占比最小(仅占整体的0.4%~0.6%),这与西北“水三线”作物生长格局密切相关:柴达木盆地多年平均作物产量仅有 $2.7 \times 10^5 \text{ t}$, 多年平均作物种植面积仅有 $7.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 仅占西北“水三线”所有作物种植面积的0.5%。

2000—2018年,西北“水三线”地区作物生产水足迹占比演变情况如图2所示,具体作物多年平均生产水足迹占比排序为:粮食 > 水果 > 棉花 > 油料 > 蔬菜 > 牧草。其中,粮食生产水足迹占比逐年下降(由2000年的67.4%下降至2018年的54.3%),水果、棉花生产水足迹占比明显上升(分别由2000年的9.1%、7.4%上升到2018年的15%、13.8%)。这与作物种植面积、种植结构变化密切相

表1 西北“水三线”作物生产水足迹及蓝水、绿水占比情况(2000—2018年)

类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
作物生产蓝水足迹总量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	894.9	887.6	1027.3	1202.7	1080.0
作物生产蓝水足迹占比/%	72.0	69.7	67.2	70.7	67.5
作物生产绿水足迹总量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	347.8	386.5	502.4	497.5	520.8
作物生产绿水足迹占比/%	28.0	30.3	32.8	29.3	32.5
作物总生产水足迹/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	1242.7	1274.1	1529.7	1700.1	1600.8

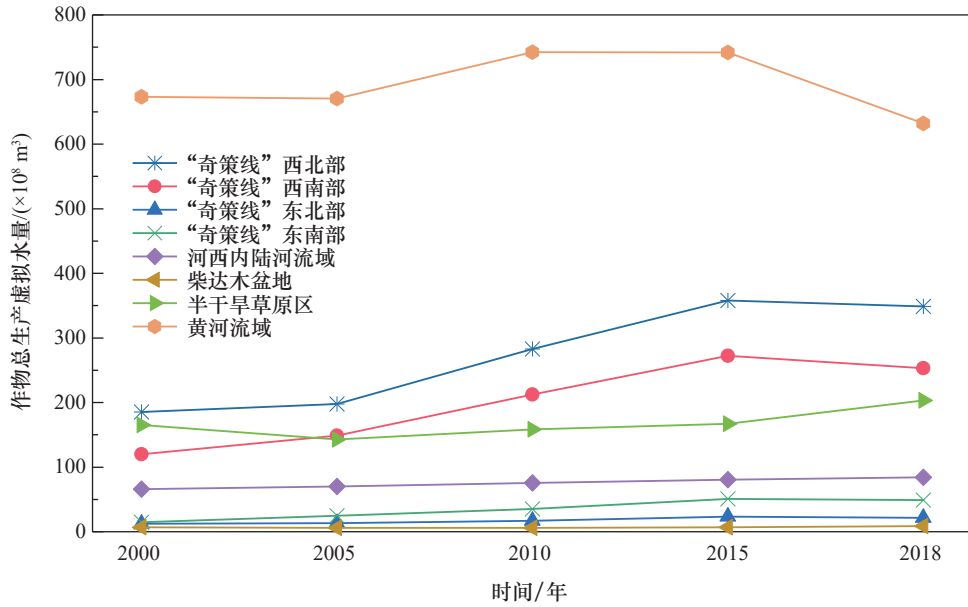


图1 西北“水三线”具体分区作物生产水足迹变化趋势（2000—2018年）

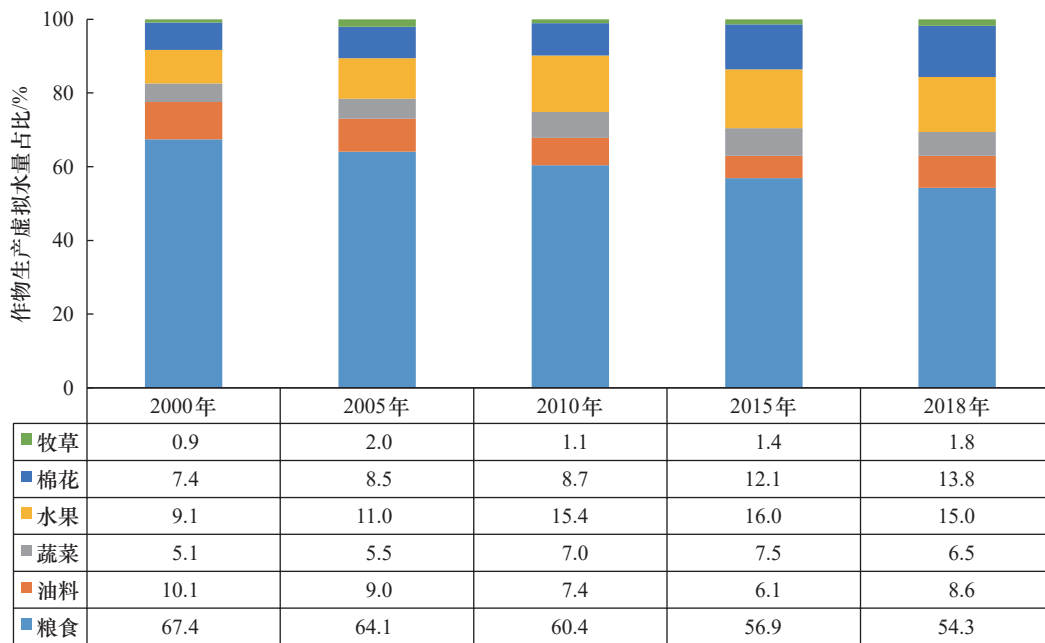


图2 西北“水三线”作物生产水足迹占比演变情况（2000—2018年）

关，2000—2018年粮食种植面积下降了13.1%，棉花、水果种植面积分别上升了7.1%、5.8%。

2018年，西北“水三线”地区具体分区作物生产水足迹结构特征如图3所示。“奇策线”东北部的的水果生产水足迹占比最大（为55.9%），“奇策线”东南部的作物生产水足迹以棉花为主（占比为45.6%），河西内陆河流域、柴达木盆地、半干旱草

原区、黄河流域的生产水足迹以粮食为主（占比分别为68.2%、64.6%、69.9%、65.4%），“奇策线”西北部、西南部的生产水足迹分别以粮食、棉花为主。

（二）作物虚拟水流动量

西北“水三线”地区是虚拟水出口区，输出量由2000年的 $8.55 \times 10^9 \text{ m}^3$ 持续增加到2018年的

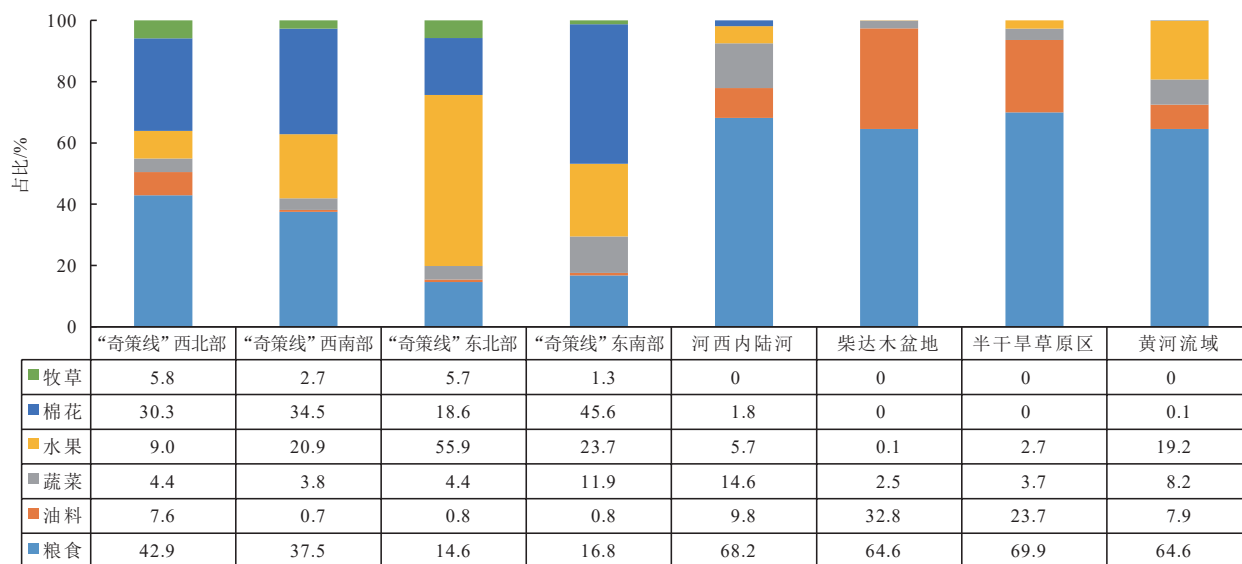


图3 西北“水三线”具体分区具体作物生产水足迹结构特征（2018年）

2.178×10¹⁰ m³。半干旱草原区、河西内陆河流域、“奇策线”西南部、“奇策线”西北部、“奇策线”东南部、“奇策线”东北部是主要的流出区，其中“奇策线”西北部虚拟水输出量最大并保持输出量增加态势（由2000年的9.87×10⁹ m³增加到2018年的1.528×10¹⁰ m³），占“奇策线”输出总量的49.7%~83.5%。黄河流域是主要的流入区，流入量由2000年的7.96×10⁸ m³增加到2018年的1.144×10¹⁰ m³。在生产和消费结构的影响下，柴达木盆地农业虚拟水流动情况发生了明显变化，自2005年起由流出区转变成流入区（见表2）。虚拟水流出逐渐成为影响西北“水三线”水资源短缺问题的重要原因，将会对当地水安全构成直接威胁。

西北“水三线”虚拟水出口量逐年增长，棉花、水果是主要构成；这两种作物多年平均产量占西北“水三线”作物总产量的23.5%，相应出口量分别从2000年的7.59×10⁹ m³、6.68×10⁹ m³上升至2018年的2.026×10¹⁰ m³、1.186×10¹⁰ m³。虚拟水进口主要由粮食引起，这是因为需要依靠进口来满足区域内居民粮食消费需求；区域粮食生产水足迹无法满足区域消耗量，如2018年粮食虚拟水流入量为1.481×10¹⁰ m³（见图4）。

由表3可见，2018年，粮食虚拟水流入区集中在黄河流域、“奇策线”西南部；棉花虚拟水流出区主要是“奇策线”西北部、“奇策线”西南部、“奇策线”东北部、“奇策线”东南部；水果虚拟水

表2 西北“水三线”作物虚拟水流动量演变趋势（2000—2018年）

分区	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年
半干旱草原区	26.8	26.5	12.1	5.4	50.5
黄河流域	-79.6	-90.0	-0.7	-100.8	-114.4
河西内陆河流域	17.5	18.2	21.7	20.8	22.6
柴达木盆地	2.7	-1.2	-1.3	-4.3	-2.2
“奇策线”东北部	0.4	0.1	4.0	5.6	3.9
“奇策线”东南部	2.8	7.6	18.6	26.7	27.2
“奇策线”西北部	98.7	81.2	129.4	130.2	152.9
“奇策线”西南部	16.3	19.9	77.4	99.5	77.2
西北“水三线”总和	85.5	62.2	261.1	183.1	217.8

注：正值表示为输出量；负值表示为输入量。

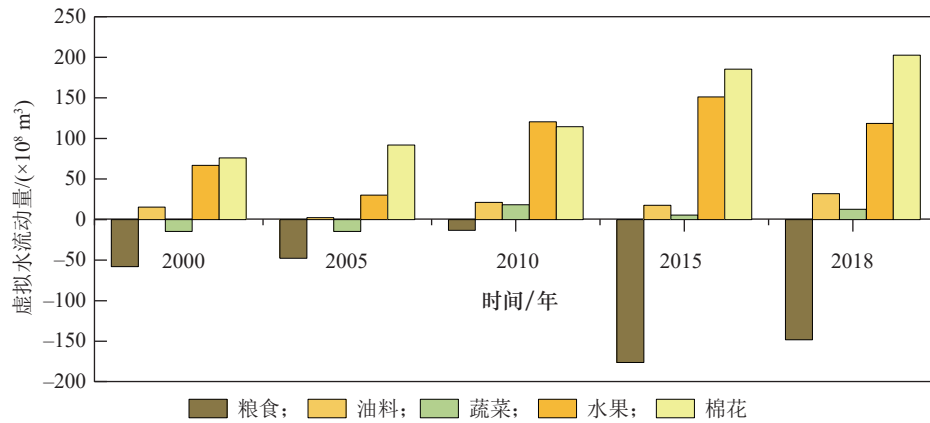


图 4 西北“水三线”具体作物虚拟水流动量演变趋势图 (2000—2018 年)

表 3 西北“水三线”各分区的作物虚拟水流动量 (2018 年)

(单位: $\times 10^8 \text{ m}^3$)

分区	主要作物虚拟水流动量					总计
	粮食	油料	蔬菜	水果	棉花	
“奇策线”西北部	-2.6	19.2	9.4	22.7	104.1	152.9
“奇策线”西南部	-36.0	-8.5	-1.4	38.1	85.1	77.2
“奇策线”东北部	-9.1	-1.0	-0.4	10.7	3.7	3.9
“奇策线”东南部	-7.2	-0.8	4.7	8.3	22.2	27.2
河西内陆河流域	14.9	3.4	6.6	-2.6	0.3	22.6
柴达木盆地	-2.7	1.9	-0.4	-0.8	-0.1	-2.2
半干旱草原区	23.5	36.7	-2.1	-5.7	-1.9	50.5
黄河流域	-128.8	-18.8	-3.8	47.9	-10.8	-114.4
西北“水三线”总和	-148.1	32.0	12.7	118.6	202.6	217.8

流出区以“奇策线”西北部、“奇策线”西南部、“奇策线”东北部、“奇策线”东南部、黄河流域为主。考虑西北“水三线”水资源短缺的大背景,对实体水的过度开发利用使得区域水安全面临隐患。

(三) 区域水资源压力评价

2000—2018 年,西北“水三线”具体分区水资源压力指数分布见图 5,其中黄河流域、半干旱草原区、“奇策线”西北部、河西内陆河流域的水资源压力指数都高于 1,说明这些地区作物生产水足迹大于可用水资源量,区域水资源承压较大而处于超载状态。柴达木盆地的农业生产用水量占该区可利用水资源量的比重最小,水资源压力数仅为 0.1,这与区域生产结构密切相关。

对 2000—2018 年西北“水三线”生产—消费—贸易格局进行研究,发现当地消费量占比由 2000 年

的 93.1% 降至 2018 年的 86.4%;随着产品调运量的增加,虚拟水输出量整体呈增加趋势(见图 6)。这表明,西北“水三线”农作物的种植规模与产出,并非仅为满足流域自身范围内的消费需求,更多的是期望通过贸易来满足外地需求进而获取更大收益。然而,这种以农业为主体的区域经济发展模式导致的大量虚拟水消耗和输出,需要更多的实体灌溉水支持,使得当地农业用水量在不断增长。

根据作物虚拟水流动情况,进一步研究西北“水三线”水果、棉花的生产—消费—贸易格局。2000—2018 年,西北“水三线”水果、棉花的虚拟水输出量分别占作物生产水足迹的 21.5%~59.1%、82.9%~91.6%(见图 7)。水资源内嵌于水果、棉花中,从经济欠发达的西北“水三线”向经济相对发达的东部输出,由缺水的北

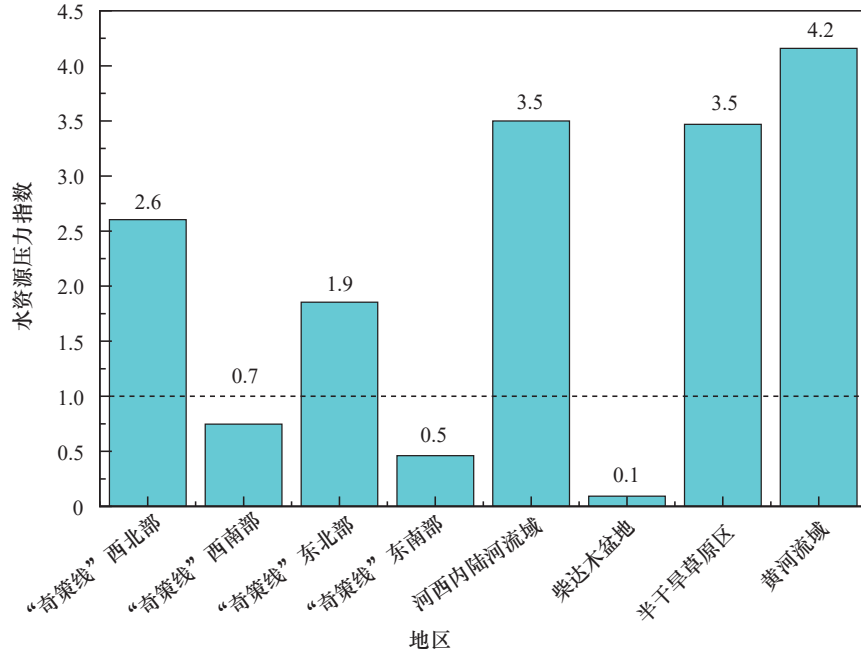


图5 西北“水三线”多年平均水资源压力指数空间分布情况 (2000—2018年)

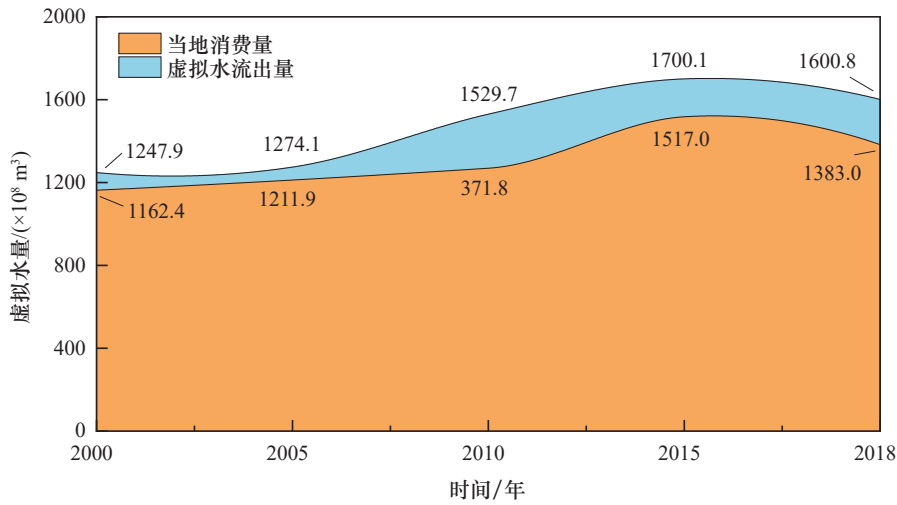


图6 西北“水三线”作物虚拟水生产/消费量演变趋势图 (2000—2018年)

方向丰水的南方输出，这一趋势加剧了西北地区本就匮乏的水资源压力。

五、研究结论与调控对策

(一) 研究结论

2000—2018年，西北“水三线”作物生产水足迹呈现波动增长趋势。粮食作物是主要农作物生产水足迹最大的作物，其次是水果、棉花。西北地区

内的作物生产水足迹时空分布不均且差异较大，其中黄河流域的作物生产水足迹远大于其他区域。

西北“水三线”作物虚拟水流动量日益增加，虚拟水输出量由2000年的 $8.55 \times 10^9 \text{ m}^3$ 上升至2018年的 $2.178 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。水果、棉花的出口使得西北“水三线”整体表现为虚拟水流出区，其中黄河流域为主要的虚拟水流入区，“奇策线”西北部为主要的虚拟水流出区。

2000—2018年，西北“水三线”分别约

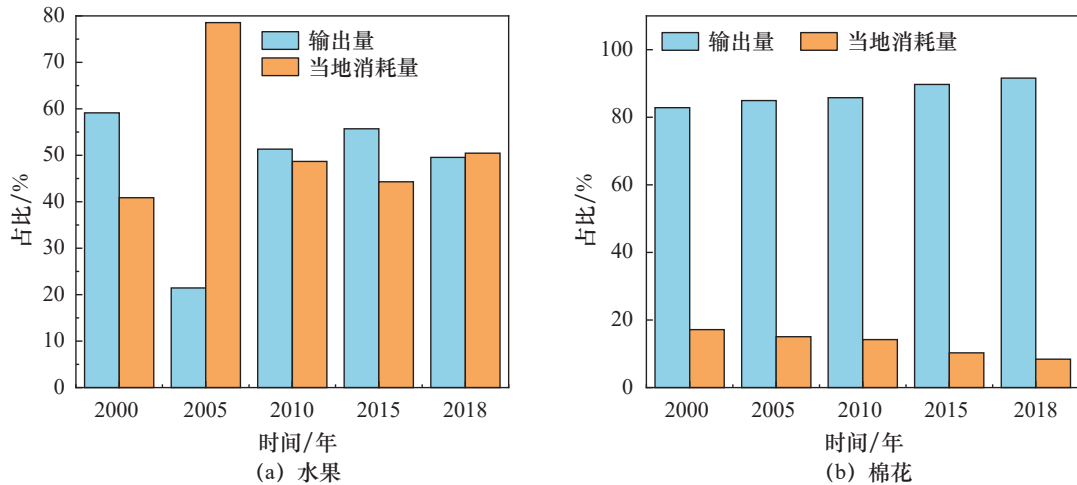


图 7 西北“水三线”水果和棉花虚拟水输出量及当地消费量 (2000—2018 年)

21.5%~59.1%、82.9%~91.6% 的水果、棉花生产水足迹用于贸易, 以此获取更大收益。当地水资源系统超载严重, 不足以支持区域社会经济发展的需求。可以考虑外水调入来缓解该区域的水资源短缺问题, 提升水安全保障能力。

(二) 调控对策

综合考虑经济效益, 结合当地水资源存量状况, 应采取优化种植结构、调整贸易结构、实施实体水—虚拟水调控等措施, 以此缓解西北地区水土资源空间错位压力, 进而通过可持续发展以更好保障水资源安全。

1. 优化作物种植结构, 挖掘农业节水潜力

在保障区域粮食安全、守住口粮自给率的前提下, 西北地区可考虑调整作物种植结构, 减少高耗水作物面积, 科学规划农作物种植空间, 提高种植布局契合度。积极发展风力发电、太阳能发电等开发项目, 因地制宜加大新能源项目反哺农业的力度, 为减少水资源使用、缓解水安全压力提供间接条件。加强农业清洁生产力度, 推进农药、化肥减量化行动, 减少农业灰水排放, 为提高农业水资源的循环利用效率创造条件。

2. 调整贸易结构, 促进虚拟水经济与区域协调发展

西北“水三线”作为新亚欧大陆桥经济走廊、中国—中亚—西亚经济走廊的必经之地, 在服务“一带一路”倡议、新一轮西部大开发等方面具有

重大价值。中亚五国均是传统的农业国家, 以畜牧业和种植业(粮食、油料、棉花)为主, 尤其是在棉花育种及种植、棉花生理生化、灌溉制度等方面技术水平较高 [16]。我国具有农业技术与管理优势以及相对的资金优势, 同时西北地区的哈密瓜、葡萄、红花、西红柿等经济作物世界驰名。因此可充分利用这一地缘优势, 发挥中国—中亚的农业互补性、互利性, 优先从产品贸易的角度出发着手解决西北“水三线”水资源短缺问题。例如, 在保障当地粮食自给能力的前提下, 可适度增加当地粮食进口量, 加大水资源密集型产品的进口量, 缓解当地水资源短缺的矛盾; 加强与中亚国家之间的技术合作交流, 克服水资源和种植技术对提高单产的限制, 促进品种改良与节水灌溉技术的应用。

3. 实施实体水—虚拟水循环调控措施, 缓解水土资源空间错位压力

水资源对保障西北地区棉花、瓜果生产甚至是全国的纺织业、瓜果业、肉蛋奶业的稳定等都起着决定性作用。西北“水三线”以棉花、瓜果、蔬菜、油料形式输出了大量的虚拟水, 农产品外调造成的虚拟水间接输出, 给西北地区当地的可利用水资源造成了直接压力。如果不能解决农作物种植过程中的水源问题, 那么通过开发西北地区土地来实现全国耕地占补平衡、保障粮食安全的设想也将难以落实 [17]。目前, 西北内陆地区调水工程的水源均来自于内部, 没有外部水源调入; 从维持区域水量平衡的角度看, 虚拟水的持续流出进一步加剧了西北

内陆干旱区的水资源压力；在没有外部水资源补充的情况下，区域经济发展受阻、生态危机加剧是大概率事件。建议从水量平衡的角度对虚拟水流出的西北地区以实体水的形式给予补偿，推动国家大水管建设，通过跨流域调水保障西北地区农业生产安全，实现西北地区实体水—虚拟水平衡的可持续性发展。

参考文献

- [1] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189–1203.
Deng M J. “Three water lines” strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in Northwest China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 73(7): 1189–1203.
- [2] 郜延华. 石羊河流域水污染防治案例研究[D]. 兰州: 兰州大学(硕士学位论文), 2008.
Gao Y H. Study about water pollution control case of shiyang river basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University(Master’s thesis), 2008.
- [3] 宋万祯. 黔中水利枢纽工程区域水资源演变规律及水资源配置研究[D]. 天津: 天津大学(博士学位论文), 2016.
Song W Z. The Research on runoff evolution and allocation of water resources in area of Qianzhong water diversion project [D]. Tianjin: Tianjin University(Doctoral dissertation), 2016.
- [4] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro political future would be impossible [C]. Southampton: Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, 1992.
- [5] 钱海洋. 中国区域间粮食贸易量化方法及虚拟水流动格局评价[D]. 西安: 西北农林科技大学(硕士学位论文), 2020.
Qian H Y. Development of quantitative method of inter-provincial grain trade and evaluation of virtual water flow pattern in China [D]. Xi’an: Northwest A & F University(Master’s thesis), 2020.
- [6] 陈洪星, 李江月, 杨德刚, 等. 水足迹视角下的农业生产空间布局——以天山北麓农产品主产区为例[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(2): 240–251.
Chen H X, Li J Y, Yang D G, et al. Spatial distribution of agricultural production from perspective of water footprint: A case study of north-piedmont major agriculture production regions of Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 38(2): 240–251.
- [7] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988—2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究——基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242–253.
Zhang P, Long A H, Hai Y, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988—2015: Based on statistical analysis of crop water footprint [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 242–253.
- [8] 孙才志, 陈丽新, 刘王玉. 中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 637–643.
Sun Z C, Chen L X, Liu Y Y. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 637–643.
- [9] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与粮食安全可持续发展研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 38–44.
Wang Y B, Liu X, Shi L J, et al. Sustainable development of water resources and food security in Northwest China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 38–44.
- [10] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 等. 基于自然分区的1960—2018年中国气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 750–760.
Zhao D S, Gao X, Wu S H, et al. Trend of climate variation in China from 1960 to 2018 based on natural regionalization [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(7): 750–760.
- [11] 李新生. 京津冀农业水足迹协调度与调控研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学(硕士学位论文), 2020.
Li X S. Study on coordination and regulation of agricultural water footprint in Beijing, Tianjin and Hebei [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power(Master’s thesis), 2020.
- [12] 秦娅青. 水足迹视角下河南省农业水土资源匹配研究[D]. 焦作: 河南理工大学(硕士学位论文), 2019.
Qin Y Q. Study on the matching of agricultural water and soil resources in Henan Province from the perspective of water footprint [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology(Master’s thesis), 2019.
- [13] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Alday M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- [14] 李新生, 黄会平, 韩宇平, 等. 京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 40–48.
Li X S, Huang H P, Han Y P, et al. Agriculture virtual flow and its impacts on regional water resources in Beijing-Tian-Jin-Hebei region [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(2): 40–48.
- [15] 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650–658.
Shi L J, Wu P T, Wang Y B, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 650–658.
- [16] 李天奇. “一带一路”背景下达州市构建区域商贸物流中心发展战略及竞争博弈研究[D]. 成都: 西南交通大学(硕士学位论文), 2019.
Li T Q. A Study on the development strategy and competition game of the construction of the regional commercial and trade logistics center in Dazhou City under the background of the “One Belt and One Road” [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University(Master’s thesis), 2019.
- [17] 杨朝晖, 王婷, 游进军, 等. 我国用水演变趋势及驱动效应分析[J]. 中国水利, 2020 (21): 26–28.
Yang Z H, Wang T, You J J, et al. Evolution of water consumptions and analysis of driving effect in China [J]. *China Water Resources*, 2020 (21): 26–28.