

基于虚拟水视角的四川省农业水资源压力时空演化

赵思翔¹, 王伟^{2*}, 刘艺琳³, 张萍³, 张慧敏³

(1.四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014; 2.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】探明四川省作物虚拟水流动对农业水资源压力产生的间接影响及其时空演化格局。【方法】以四川省内种植的 16 种作物为研究对象, 基于 AquaCrop 模型模拟 2000—2018 年四川省各市(州)作物生产水足迹, 基于每年作物产品供需平衡和最优运输成本法量化省际间作物贸易格局, 分析各市(州)主要作物虚拟水流动平衡格局, 解析作物虚拟水流动对四川省农业水资源压力的影响。【结果】2000—2018 年, 四川省多年平均作物生产水足迹为 284 亿 m^3/a , 各市(州)作物生产总水足迹呈波动上升趋势, 其中乐山市作物生产总水足迹变化幅度最大。四川省为作物虚拟水净输入地区, 虚拟水净输入量整体呈上升趋势, 西部作物虚拟水净输入量高于东部。作物虚拟水流动缓解了各市(州)农业水资源压力, 因虚拟水输出导致水资源压力小幅度增加的地区由 2000 年的 4 个市(德阳市、资阳市、遂宁市和绵阳市)减少至 2018 年的 1 个市(资阳市)。【结论】根据各市(州)水资源分布现状与作物耗水规律进行种植结构调整、田间管理优化和虚拟水贸易调控, 综合考虑实体水配置和虚拟水贸易可有效缓解四川省农业水资源压力。

关键词: 作物生产水足迹; 时空演变; 虚拟水; 农业水资源压力; 四川省

中图分类号: TV213.4; S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023191

OSID: 

赵思翔, 王伟, 刘艺琳, 等. 基于虚拟水视角的四川省农业水资源压力时空演化[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 85-90, 121.
ZHAO Sixiang, WANG Wei, LIU Yilin, et al. Spatiotemporal Evolution in Agricultural Water Stress in Sichuan Province Evaluated from the Perspective of Virtual Water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 85-90, 121.

0 引言

【研究意义】全球农业生产耗水量占人类活动耗水量的 85%以上, 水资源时空分布不均、水土资源时空不匹配导致农业水资源压力不断增加, 威胁区域及国家水安全和粮食安全^[1]。虚拟水和水足迹概念的提出为应对农业水危机开拓了新视角^[2]。在当前我国粮食生产消费格局下, “北粮南运”伴生的虚拟水“北水南调”格局导致年平均虚拟水调运量超过 860 亿 m^3 , 远超南水北调工程的调水规模^[3]。虚拟水流动在时间和空间尺度将水资源进行了重新分配, 间接改变了虚拟水输出和输入区域的水资源压力^[4]。水资源短缺地区从水资源丰富地区购买高耗水性农产品, 由此在缓解水资源压力的同时确保了粮食安全供给, 这一路径被称为“虚拟水战略”^[5]。明晰区域作物虚拟水流动格局及其间接加重或缓释的水资源压力, 是实现区域农业水资源可持续利用的基础。

【研究进展】作物生产水足迹是目前最为全面的作物生产耗水指标之一, 也是区域作物虚拟水流动评价的基础性指标^[6]。作物生产水足迹是指一定时间、一定地理范围内作物生产过程中所产生的水资源消耗量。与传统作物用水评价指标相比, 作物生产水足迹考虑了作物生长阶段的广义水资源(蓝水与绿水)消耗强度。作物生产蓝水足迹是指作物生长期消耗的灌溉水量, 作物生产绿水足迹是指作物生长期消耗的由降水直接形成的土壤水量。以往研究结合地理信息技术与作物模型, 实现了多空间尺度的作物生产水足迹量化与评价。Tamea 等^[7]构建了 1961—2016 年全球作物生产水足迹和虚拟水贸易数据库; Mao 等^[8]核算了中国大陆田块、县域、三级流域、省域和一级流域尺度的小麦生产水足迹, 定量分析了作物生产水足迹的主要影响因素; Wang 等^[9]解析了中国小麦生产水足迹的时空分布特征。水资源压力这一概念最早由 Falkenmark 等^[10]提出, 旨在定量评估人类活动对水资源产生的影响。操信春等^[11]构建了农业水资源短缺指数, 评估了中国农业水资源压力的时空分布, 指出中国应通过减少作物生产水足迹来保障农业水资源的可持续利用。Zhao 等^[14]解析了中国省际间虚拟水流动对区域水资源压力产生的间接影响。Wang 等^[12]评价

收稿日期: 2023-04-28 修回日期: 2023-06-11 网络出版日期: 2023-10-17

基金项目: 中央高校科研基本业务费(2452021168)

作者简介: 赵思翔(2002-), 男。主要从事水资源高效利用和区域调控研究。

E-mail: zhao_sixiang@sina.cn

通信作者: 王伟(1995-), 男。博士研究生, 主要从事区域农业高效用水研究。

E-mail: wangwei217@mails.ucas.ac.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

了中国一级流域间的虚拟水流动对各流域水资源压力产生的影响。

【切入点】中国作物生产水足迹与虚拟水流动研究主要集中在流域尺度或省级尺度,而对市级尺度的研究较少。作物生产水足迹在同一省份内的不同城市间有显著差异^[13],且市级尺度上的虚拟水流动格局更为复杂^[14]。此外,对水资源压力的评估大多集中于干旱与半干旱地区,对水资源相对充沛的地区缺乏相关评价。四川省位于中国西南地区,多年平均水资源总量为 4 482 亿 m^3 ,其中农业耗水量占水资源总消耗量的 58%^[15]。水资源作为影响四川省农业可持续发展的关键因素,在各市(州)间的分布极不平衡^[16]。刘莉等^[17]分析了 2003—2011 年四川省各市(州)农业水足迹的时空演变特征,但未明确虚拟水流动对区域水资源压力的影响。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究以四川省内种植的 16 种农作物为研究对象,以其下辖 18 个市和 3 个自治州为地理单元,分析

$$\begin{cases} S_{g[t]} = S_{g[t-1]} + (PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]}) \cdot \frac{PR_{[t]}}{PR_{[t]} + IRR_{[t]}} - (DP_{[t]} + ET_{[t]}) \cdot \frac{S_{g[t-1]}}{S_{[t-1]}}, \\ S_{b[t]} = S_{b[t-1]} + (PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]}) \cdot \frac{PR_{[t]}}{PR_{[t]} + IRR_{[t]}} - (DP_{[t]} + ET_{[t]}) \cdot \frac{S_{b[t-1]}}{S_{[t-1]}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{g[t]}$ 和 $S_{b[t]}$ 分别代表第 t 日土壤中的绿水量和蓝水量 (mm); $S_{g[t-1]}$ 和 $S_{b[t-1]}$ 分别代表第 $t-1$ 日土壤中的绿水量和蓝水量 (mm); $S_{[t-1]}$ 分别代表第 $t-1$ 日土壤含水率 (mm); $PR_{[t]}$ 为第 t 日降水量 (mm); $IRR_{[t]}$ 为第 t 日灌溉水量 (mm); $RO_{[t]}$ 为第 t 日由降水及灌溉产生的地表径流量 (mm); $DP_{[t]}$ 为第 t 日土壤深层渗漏量 (mm); $ET_{[t]}$ 为第 t 日作物实际蒸散发量 (mm)。

AquaCrop 模型中的作物单位面积产量通过地上部生物量与收获指数相乘得到。基于各市(州)农业统计年鉴中的作物单产数据对作物产量模拟值进行验证。

1.2 市(州)级作物虚拟水贸易量的计算

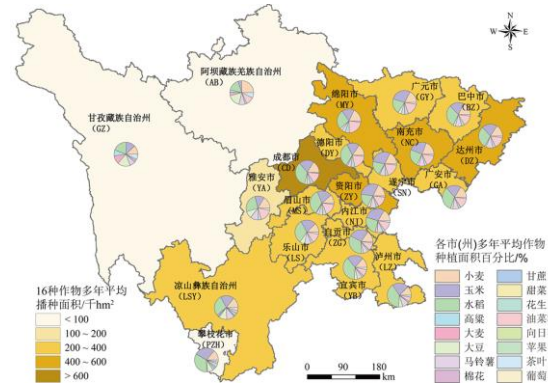
作物虚拟水贸易量为作物生产水足迹与作物贸易量的乘积。作物贸易量分 2 部分计算。首先,基于国际粮农组织和农业统计年鉴的各省每年作物产品供需值,通过最优运输成本法^[21]量化省际间作物贸易格局,得到各省每年作物产品供需平衡表。基于作物产品供需平衡表,根据农业统计年鉴中各市(州)作物产量、人口、牲畜饲养量,将省级作物供需量划分到市(州)级,计算各市(州)每年作物产品供需平衡,进而得到各市(州)最终作物产品的输入量和输出量。四川省各市(州)主要作物播种面积见图 1。

2000—2018 年市级尺度作物生产水足迹和虚拟水流动的平衡格局,解析作物虚拟水流动时空格局及其在市级尺度对农业水资源压力产生的间接影响。研究结果可为人口密集和水资源丰富地区的农业水资源可持续利用和科学管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 作物生产水足迹的量化

AquaCrop 模型是联合国粮农组织 (FAO) 开发的基于水分驱动的作物生长模型^[18],是计算作物生产水足迹的主流模型之一^[11,19]。本研究在 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的空间栅格尺度上,基于 AquaCrop 模型模拟四川省各市(州)的主要作物生产水足迹。作物生产的蓝水足迹 (WF_b , m^3/kg) 和绿水足迹 (WF_g , m^3/kg) 分别为作物生育期内蒸散发量 (ET , mm) 中的蓝水 (ET_b , mm) 和绿水 (ET_g , mm) 与作物单位面积产量 (Y , kg/hm^2) 之比^[20]。蓝、绿水动态平衡如下:



注 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号:

川 S【2021】00059 号标准地图制作,底图无修改。

图 1 四川省各市(州)主要作物播种面积百分比

Fig.1 Planting area and proportion of main crops in each city (prefecture) of Sichuan Province

1.3 农业水资源压力核算

水资源压力是需求驱动的水稀缺,通过生产生活取水与当地可耗水资源量的比值表示。区域间贸易活动加剧了生产和消费对水资源的依赖方式,不同行业对有限蓝水资源的竞争日益激烈。本研究计算了涵盖作物生产和消费双视角下的各市(州)农业蓝水资源压力 ($AWSI$),考虑了维持基本生态系统健康的环境需水量 (EFR , 取值为区域可用水资源量的 40%^[14]),具体计算方法如下:

$$AWSI = AWSI_0 + AWSI^*, \quad (2)$$

$$AWSI_0 = \frac{\sum_{x=1}^{16} TWF_{b,x}}{(Q-EFR) \cdot AWU/WU}, \quad (3)$$

$$AWSI^* = \frac{T_{i,j,x} \cdot WF_{b,j,x}}{((Q-EFR) \cdot AWU/WU) \cdot WF_{b,i,x}}, \quad (4)$$

式中： $AWSI_0$ 为地区用水消耗的水资源压力； $AWSI^*$ 为考虑地区虚拟水流动的水资源压力，正值表示因作物虚拟水流动缓解的水资源压力，负值表示因作物虚拟水流动增加的水资源压力； $TWF_{b,x}$ 为作物 x 生产总水足迹（ m^3/a ）； Q 为地区可用水资源量（ m^3/a ）； AWU 为地区农业用水量（ m^3/a ）； WU 为地区总用水量（ m^3/a ）； $WF_{b,j,x}$ 和 $WF_{b,i,x}$ 为地区 j 和地区 i 作物 x 的单位面积产量蓝水足迹（ m^3/kg ）。

1.4 数据来源

2000—2018 年四川省作物种植面积数据来源于 MIRCA2000 数据集和中国统计年鉴。AquaCrop 模型所需的月降水量、最低气温、最高气温和参考作物蒸散量来源于 CRU-TS 4.06 数据集。土壤质地数据来源于 ISRIC 土壤和地形数据库。土壤含水率数据来源于 ISRIC-WISE 数据库。作物生育期和最大根深数据参

考 Allen 等^[22]研究，作物播种日期参考陈玉民等^[23]研究。收获指数参考谢光辉等^[24]和张福春等^[25]研究。

2 结果与分析

2.1 四川省作物生产水足迹时空演变

2000—2018 年，四川省多年平均作物生产总水足迹为 284 亿 m^3/a （图 2）。全省作物生产总水足迹整体呈波动上升趋势，在 2017 年达到峰值，为低谷 2003 年的 1.2 倍。多年平均作物生产水足迹排名前 5 的作物由大到小依次为水稻（93.6 亿 m^3/a ）、玉米（60.7 亿 m^3/a ）、小麦（47.4 亿 m^3/a ）、油菜籽（20.1 亿 m^3/a ）、马铃薯（19.8 亿 m^3/a ）。其余 11 种作物生产水足迹共计 42.4 亿 m^3/a 。棉花生产水足迹的年际降幅最大，19 a 间下降了 93.8%；葡萄生产水足迹增幅最高，19 a 间上升了 3.6 倍。

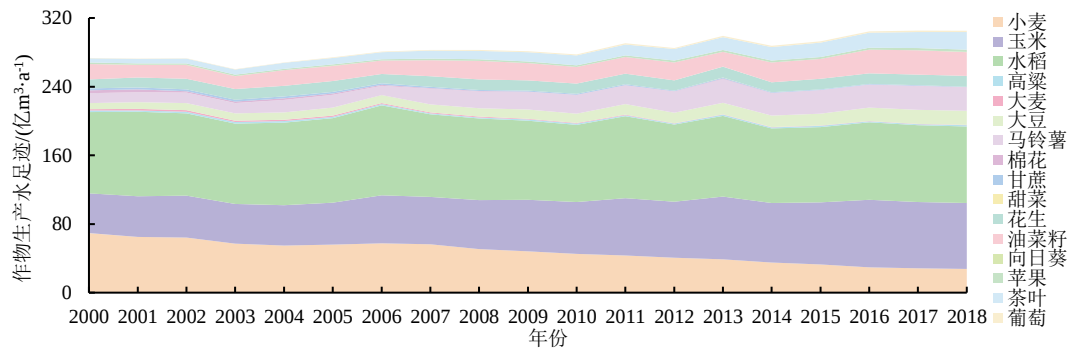


图2 2000—2018 年四川省不同作物生产总水足迹的年际演变

Fig.2 Interannual evolution of the total water footprint of crop production in Sichuan Province from 2000 to 2018

四川省各市（州）的作物生产水足迹变化幅度存在显著差异（表 1）。与 2000 年相比，2018 年乐山市作物生产总水足迹上升了 20.7%，变化幅度最大。成都市作为小麦、玉米、水稻和油菜的主要种植区，作

物生产总水足迹显著高于其他市（州）。作物生产绿水足迹的高值区主要分布在成都市、达州市、南充市和绵阳市，作物生产绿水足迹的高值区主要分布在成都市、南充市、资阳市、达州市和绵阳市。

表 1 四川省各市（州）作物生产总水足迹、蓝水足迹和绿水足迹

Table 1 Total, blue and green water footprint of crop production in each city (prefecture) of Sichuan Province

市（州）	总水	蓝水	绿水	总水	蓝水	绿水	总水	蓝水	绿水
	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3	足迹/亿 m^3
	2000 年	2000 年	2000 年	2010 年	2010 年	2010 年	2018 年	2018 年	2018 年
成都市	28.9	9.4	19.5	28.8	8.0	20.8	30.3	7.8	22.6
自贡市	9.1	2.8	6.2	9.3	2.6	6.7	10.2	2.5	7.8
攀枝花市	2.3	0.7	1.5	2.2	0.8	1.4	2.3	0.6	1.7
泸州市	13.2	4.4	8.8	13.7	4.1	9.6	15.3	3.9	11.4
德阳市	14.4	4.8	9.6	14.0	4.0	10.0	15.1	4.1	11.0
绵阳市	19.6	5.3	14.3	19.0	4.8	14.2	20.8	4.8	16.0
广元市	12.0	2.9	9.2	12.4	2.8	9.7	13.9	2.7	11.2
遂宁市	12.7	2.8	9.9	12.8	2.6	10.2	14.4	2.6	11.8
内江市	11.2	3.0	8.1	11.7	2.7	9.0	13.1	2.7	10.4
乐山市	11.1	3.0	8.0	11.8	2.8	9.0	13.4	2.8	10.5
南充市	23.0	5.2	17.8	23.1	4.9	18.2	25.5	5.0	20.5
宜宾市	16.3	5.1	11.2	16.8	4.9	11.9	18.6	4.6	14.0
广安市	13.5	3.8	9.7	13.6	3.5	10.2	14.9	3.5	11.5
达州市	21.0	5.2	15.7	21.4	5.0	16.4	23.8	5.3	18.5
雅安市	4.1	0.9	3.3	4.3	0.8	3.6	4.7	0.7	4.0
巴中市	12.1	3.3	8.8	12.3	3.1	9.3	13.4	3.3	10.1
眉山市	13.7	4.2	9.6	14.0	3.5	10.5	15.4	3.6	11.8
资阳市	20.7	4.7	15.9	21.1	4.1	17.0	23.7	4.1	19.7
阿坝藏族羌族自治州	1.6	0.3	1.4	1.7	0.3	1.4	1.9	0.3	1.6
甘孜藏族自治州	1.5	0.3	1.1	1.5	0.3	1.1	1.6	0.3	1.3
凉山彝族自治州	11.4	3.0	8.4	11.7	3.3	8.5	12.8	2.5	10.3

2.2 市级尺度作物虚拟水流动格局的时空演变

四川省在 2000—2018 年始终为作物虚拟水净输入型地区,四川省作物虚拟水净输入量整体呈上升趋势

势,虚拟水贸易结构变化较小(图 3)。主要作物虚拟水净输入量在 2016 年到达峰值,为 333.1 亿 m^3 ,是 2000 年的 3.1 倍。2018 年虚拟水净输入量骤减。

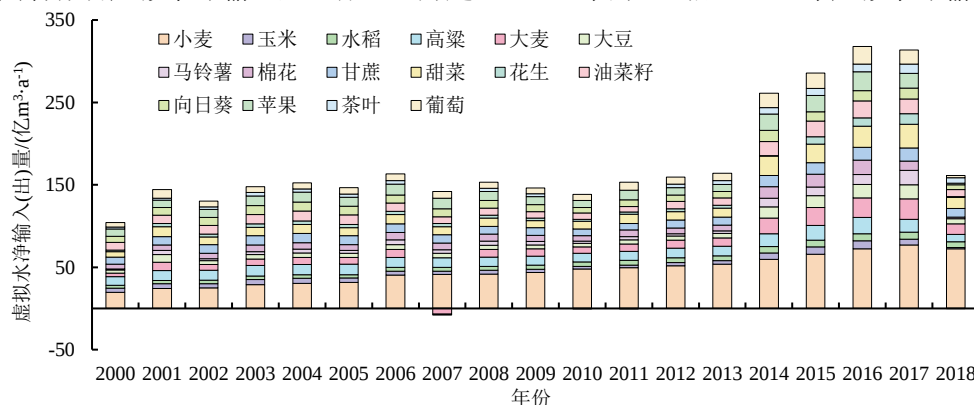


图 3 2000—2018 年四川省主要作物虚拟水净输入（出）量

Fig.3 Net virtual water inflow of major crops in Sichuan Province from 2000 to 2018

2000、2010、2018 年四川省各市（州）虚拟水和虚拟蓝水净输入（出）量的空间分布及作物占比如图 4 所示。虚拟水流动格局表明，四川省西部作物虚拟水净输入量高于东部，最大净输入区为成都市，2018 年虚拟水净输入量为 72.4 亿 m^3 ；资阳市是最大的虚拟水净输出区，2018 年净输出量为 6.2 亿 m^3 。在虚拟水净输入地区，玉米、大豆和小麦的虚拟水输

入量占据主导地位。四川省作物虚拟蓝水净输入量呈西部高于东部的空间分布格局。2018 年，四川省最大作物虚拟蓝水净输入区为成都市，净输入量为 16.3 亿 m^3 ；德阳市是最大的作物虚拟蓝水净输出地区，净输出量为 0.5 亿 m^3 。在虚拟蓝水净输入地区，小麦、玉米和大豆是各市（州）的主要进口作物。

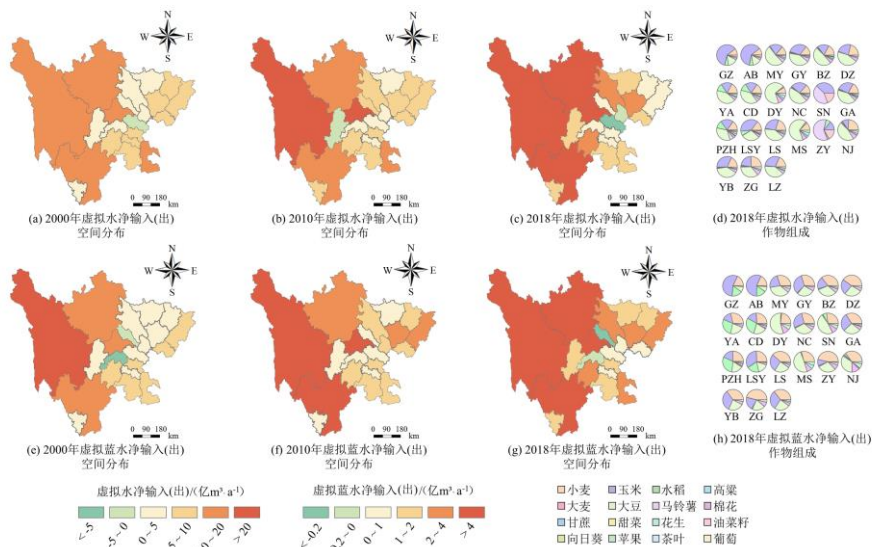


图 4 2000、2010、2018 年四川省各市（州）虚拟水和虚拟蓝水净输入（出）的空间分布及作物组成

Fig.4 Spatial distribution and composition of net virtual water inflow in each city (prefecture) of Sichuan Province in 2000, 2010 and 2018

2.3 各市（州）作物虚拟水流动对农业水资源压力时空格局的影响

四川省各市（州）农业生产水资源压力见表 2。总体而言，作物虚拟水流动缓解了区域农业水资源压力。与 2000 年相比，2018 年因作物虚拟水流动对全省农业水资源压力的 $AWSP$ 增长了 111.5%。随着人口增长，四川省蓝水消耗较多的作物（大豆和小麦）输入量增多，这种贸易模式分担了输入地区农业生产的蓝水资源压力。在当前作物虚拟水流动模式下，南充市农业水资源压力的缓解程度最大。四川省因虚拟蓝

水输出导致水资源压力增加的地区由 2000 年的 4 个市（德阳市、资阳市、遂宁市和绵阳市）减少到 2018 年的 1 个市（资阳市），主要分布在四川省中东部地区。四川省各市（州）农业水资源压力与地理区位相关，东部四川盆地作物种植面积广阔，农业水资源压力相对较高，而川西高原地区（甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州和凉山彝族自治州）受制于土壤、地形和气候等自然条件，不利于种植业发展，因此需要依赖外部作物输入，农业水资源压力较小。

表 2 四川省各市（州）农业生产水资源压力

Table 2 Water stress of agricultural production in each city (prefecture) of Sichuan Province

市（州）	AWSI ₀	AWSI*	AWSI	AWSI ₀	AWSI*	AWSI	AWSI ₀	AWSI*	AWSI
	2000 年	2000 年	2000 年	2010 年	2010 年	2010 年	2018 年	2018 年	2018 年
成都市	0.414	0.064	0.478	0.268	0.341	0.609	0.181	0.439	0.620
自贡市	0.941	0.089	1.029	0.529	0.072	0.601	0.470	0.040	0.511
攀枝花市	0.076	0.071	0.148	0.074	0.205	0.278	0.033	0.160	0.193
泸州市	0.142	0.009	0.151	0.205	0.068	0.272	0.170	0.047	0.217
德阳市	0.424	-0.073	0.351	0.264	0.008	0.272	0.158	0.021	0.179
绵阳市	0.150	-0.016	0.134	0.119	0.020	0.139	0.077	0.032	0.109
广元市	0.143	0.026	0.169	0.081	0.016	0.097	0.087	0.058	0.145
遂宁市	0.556	-0.016	0.540	0.585	0.246	0.832	0.454	0.629	1.082
内江市	0.939	0.200	1.139	0.482	0.384	0.866	0.502	0.337	0.839
乐山市	0.077	0.022	0.099	0.074	0.026	0.101	0.059	0.020	0.078
南充市	0.283	0.012	0.295	0.220	0.076	0.297	0.388	2.818	3.206
宜宾市	0.211	0.027	0.238	0.339	0.086	0.425	0.182	0.469	0.651
广安市	0.336	0.045	0.381	0.409	0.108	0.518	0.544	0.116	0.659
达州市	0.125	0.018	0.142	0.239	0.116	0.355	0.206	0.055	0.261
雅安市	0.016	0.001	0.017	0.013	-0.001	0.012	0.011	0.087	0.099
巴中市	0.098	0.018	0.116	0.114	0.061	0.175	0.146	0.056	0.202
眉山市	0.219	0.001	0.220	0.108	0.016	0.124	0.106	0.587	0.693
资阳市	0.539	-0.062	0.477	0.451	0.060	0.510	0.345	-0.024	0.321
阿坝藏族羌族自治州	0.002	0.634	0.636	0.002	0.016	0.018	0.002	0.027	0.029
甘孜藏族自治州	0.001	0.049	0.050	0.002	0.030	0.032	0.001	0.024	0.025
凉山彝族自治州	0.013	0.007	0.020	0.020	0.042	0.062	0.012	0.041	0.053

3 讨论

本研究以四川省 16 种作物为研究对象，系统分析了 2000—2018 年四川省各市（州）作物生产水足迹和虚拟水流动格局，在市级尺度解析了作物虚拟水流动对农业水资源压力产生的间接影响。本研究中的作物生产水足迹量化结果与刘莉等^[17]的研究结果在相同空间和时间尺度上表现出良好的一致性。作物生产水足迹高值区域主要分布在成都市、达州市、资阳市、绵阳市和宜宾市，且在时间尺度上呈上升趋势。本研究使用的 AquaCrop 模型在不同气候、土壤质地、灌溉措施和水肥管理中模拟作物产量及耗水量的精度已被广泛证实。由于模型机理和输入数据的不确定性，作物生产水足迹的计算仍存在较大的不确定性，如对同一作物在研究时段采用固定的作物种植日历、收获指数和最大根深等。为了提升模型在作物产量模拟和耗水量估算当中的精度，未来研究应加强基础输入数据的整理和模型优化。

鉴于四川省水资源总量大但空间分布不均衡、农业水资源紧缺的地域化特征，从虚拟水视角出发评价农业生产水资源压力的时空格局至关重要。四川省作物生产和消费存在较大的时空分异特征，作物虚拟水净输入量及净输出量在川东和川西地区存在显著差异。整体而言，四川省作为作物虚拟水净输入地区，作物虚拟水流动对缓解当地农业水资源压力的效果

显著。对于农业这一用水大户，在关注作物种植结构优化调整以及推广节水灌溉技术的同时，更应重视虚拟水贸易调控，从实体水配置和虚拟水贸易优化两方面共同缓解四川省农业水资源压力。

依据本研究结果，提出以下建议：①通过改良作物品种提高作物产量以及作物水利用效率，例如阿坝藏族羌族自治州水稻产量的大幅度提升显著降低了其作物生产水足迹。②四川省作物单产水足迹空间差异较大，在保证种植面积不增加及粮食供给量不变的约束条件下，通过以区域作物耗水量最低为目标的种植结构优化可以实现各市（州）的农业节水。③对于四川省内种植面积较大且作物生产水足迹占比较高的作物（如水稻、玉米、小麦和油菜籽），应通过推广节水灌溉技术、设置作物生产水足迹基准等方法来提高农业生产用水效率。④对于农业水资源压力较大的川东地区，需要增加从省外农业水资源充沛且用水效率较高的地区输入水密集型作物产品，以间接缓解当地农业用水压力。⑤总体而言，本研究建议从实体水和虚拟水协同的视角，优化四川省各市（州）农业用水结构，实现区域农业用水综合收益最大化。

4 结论

1) 四川省级和市级尺度作物生产水足迹呈波动上升趋势，作物生产水足迹占比较大的作物主要为水稻、玉米、小麦和油菜籽。

2) 四川省作物虚拟水净输入量整体呈上升趋势, 西部地区作物虚拟水净输入量高于东部。

3) 作物虚拟水流动持续缓解了四川省农业水资源压力, 川东盆地种植面积广阔, 农业水资源压力偏大; 川西依赖外部作物输入, 农业水资源压力较小。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] DODORICO P, CHIARELLI D D, ROSA L, et al. The global value of water in agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21 985-21 993.
- [2] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(9): 3 232-3 237.
- [3] 吴普特. “北水南调工程”的警示与应对策略[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 121-123, 180.
WU Pute. Warning and strategy of North-to-South water transfer project[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 121-123, 180.
- [4] ZHAO X, LIU J G, LIU Q Y, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1 031-1 035.
- [5] 马静, 汪党献, A Y Hoekstra, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 102-107.
MA Jing, WANG Dangxian, HOEKSTRA A Y, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 102-107.
- [6] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002[R]. Value of Water Research Report Series No.12. Delft, The Netherlands, 2003.
- [7] TAMEA S, TUNINETTI M, SOLIGNO I, et al. Virtual water trade and water footprint of agricultural goods: The 1961—2016 CWASI database[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(5): 2 025-2 051.
- [8] MAO Y, LIU Y L, ZHUO L, et al. Quantitative evaluation of spatial scale effects on regional water footprint in crop production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 173: 105 709.
- [9] WANG W, ZHUO L, LI M, et al. The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop water footprint and benchmarking[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123 916.
- [10] FALKENMARK M, LUNDQVIST J, WIDSTRAND C. Macro - scale water scarcity requires micro - scale approaches: Aspects of vulnerability in semi - arid development[J]. *Natural Resources Forum*, 1989, 13(4): 258-267.
- [11] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 94-100.
CAO Xinchun, LIU Zhe, WU Mengyang, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 94-100.
- [12] WANG W, ZHUO L, RULLI M C, et al. Limited water scarcity mitigation by expanded interbasin physical and virtual water diversions with uneven economic value added in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157 625.
- [13] 闫晨健, 栗萌, 卓拉, 等. 1989—2019 年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. *资源科学*, 2023, 45(1): 158-173.
YAN Chenjian, LI Meng, ZHUO La, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989—2019[J]. *Resources Science*, 2023, 45(1): 158-173.
- [14] ZHAO D D, LIU J G, SUN L X, et al. Quantifying economic-social-environmental trade-offs and synergies of water-supply constraints: An application to the capital region of China[J]. *Water Research*, 2021, 195: 116 986.
- [15] 四川省水利厅. 四川省水资源公报[R]. 2001—2019.
Sichuan Provincial Water Resources Department. *Sichuan Water Resources Bulletin*[R]. 2001—2019.
- [16] 郭艳荣, 张俊伟, 李莉萍. 四川省农业资源可持续利用评价研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(3): 166-171.
GUO Yanrong, ZHANG Junwei, LI Liping. Research on the sustainable utilization of agricultural resources in Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(3): 166-171.
- [17] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003—2011 年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1 133-1 141.
LIU Li, DENG Ouping, DENG Liangji, et al. Agricultural water footprint space-time change and driving factors research of various cities in Sichuan Province from 2003 to 2011[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1 133-1 141.
- [18] HSIAO T C, HENG L E, STEDUTO P, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. parameterization and testing for maize[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 448-459.
- [19] LI Z B, FENG B B, WANG W, et al. Spatial and temporal sensitivity of water footprint assessment in crop production to modelling inputs and parameters[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107 805.
- [20] HOEKSTRA A Y. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [21] 吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J]. *科学通报*, 2019, 64(18): 1 953-1 966.
WU Pute, ZHUO La, LIU Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1 953-1 966.
- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, 300[M]. Rome: FAO, 1998.
- [23] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
CHEN Yumin, GUO Guoshuang, WANG Guangxing, et al. Main crop water requirement and irrigation of China[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Press, 1995.
- [24] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(1): 1-8.
XIE Guanghui, HAN Dongqian, WANG Xiaoyu, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8.
- [25] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83-87.
ZHANG Fuchun, ZHU Zhihui. Harvest index for various crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83-87.

(下转第 121 页)

interactions. **【Result】** In comparison to the control, application of biochar significantly increased soil pH and available potassium ($P<0.05$). Application of lime nitrogen alone increased pH, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the soil ($P<0.05$). Combined application of biochar and lime nitrogen significantly increased pH, electrical conductivity, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available potassium of the soil ($P<0.05$). It was found that applying biochar alone or in combination with lime nitrogen significantly reduced the fungal Shannon diversity index ($P<0.05$), although there were no significant differences in the relative abundance of the dominant fungal phylum between the treatments. Additionally, combined application of biochar and lime nitrogen led to a significant reduction in the relative abundance of *Fusarium* ($P<0.05$). The Mantel-Haenzel test revealed significant positive correlations between the *Fusarium* community and soil conductivity, ammonium nitrogen, and alpha diversity of the fungal community ($P<0.05$). Network analysis showed that separate or combined application of biochar and lime nitrogen reduced the number of both positive and negative connections and nodes between the *Fusarium* community and fungal community. **【Conclusion】** The combined application of biochar and lime nitrogen enhanced the competition between the *Fusarium* community and the fungal community, which is beneficial for mitigating soil pathogens.

Key words: greenhouse; biochar, lime nitrogen; *Fusarium*; fungal community diversity

责任编辑：赵宇龙

(上接第 90 页)

Spatiotemporal Evolution in Agricultural Water Stress in Sichuan Province Evaluated from the Perspective of Virtual Water

ZHAO Sixiang¹, WANG Wei^{2*}, LIU Yilin³, ZHANG Ping³, ZHANG Huimin³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This paper aims to assess the indirect influence of virtual water flow on metropolitan-scale agricultural water stress in Sichuan province. It investigates the spatiotemporal variation in this context, elucidating how persistent growth in agricultural water use and the movement of virtual water through agricultural products across the province indirectly impacts regional water stress. **【Method】** The AquaCrop model was employed to calculate the water footprint of 16 different crops from 2000 to 2018 in all metropolitan cities within the province. The calculation of inter-province virtual water flow was based on annual balance between crop production and food demand, by considering the minimum transportation costs cross the province. These calculated results were then used to analyze the influence of virtual water flow on agricultural water stress. **【Result】** From 2000 to 2018, the average water footprint of crop production in Sichuan was estimated to be 28.4 billion cubic meters per year. The total water footprint of crop production in the province exhibited a fluctuation during the studied period, with the most notable change observed in Leshan. The province experienced a net increase in virtual water inflow, with the Western areas receiving more inflow than the Eastern regions. The continuous influx of virtual water has contributed to the alleviation of agricultural water stress in the province, reducing the number of cities experiencing increased water stress due to virtual water outflows from four in 2000 to one in 2018. **【Conclusion】** The analysis of physical and virtual water highlights the need for Sichuan province to enhance the regulation and optimization of virtual water trade as a means to mitigate agricultural water stress.

Key words: water footprint of crop production; spatiotemporal evolution; virtual water; agricultural water stress; Sichuan Province

责任编辑：韩 洋