

引用格式: 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 C J, Li M, Zhuo L, 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.] DOI: 10.18402/resci.2023.01.12

1989—2019年陕西省作物生产水足迹 时空演变与节水潜力评价

闫晨健¹, 栗萌¹, 卓拉^{2,3}, 杨西¹, 吴普特^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:【目的】陕西省是中国重要的粮油果基地, 却大部分地处半干旱区, 有限的水资源是制约当地经济社会可持续发展的最大刚性约束。作物生产耗水及节水潜力定量评价是农业适水发展与绿色高效节水的基础性工作。【方法】本文基于1989—2019年陕西省地级市尺度10种主要作物在灌溉、雨养条件下作物生产蓝水足迹(灌溉水消耗)、绿水足迹(有效降水消耗)和灰水足迹(稀释污染负荷所需水量)时空演变特征, 推演典型年作物生产工程节水潜力和真实节水潜力。【结果】结果显示: ①近30年陕西省各作物生产消耗型水足迹均呈整体下降趋势, 同一作物生产水足迹在市际间存在较大差异。省平均苹果生产消耗型水足迹下降幅度达91.3%; 各市间小麦生产消耗型水足迹差异值可达3.41 m³/kg, 同时, 苹果和油菜籽生产灰水足迹呈上升趋势。②省作物生产消耗型总水足迹在2019年达160.55亿m³/a, 较1989年微降1.8%; 玉米、小麦和苹果贡献了省作物生产消耗型总水足迹的80%以上。③陕西省作物生产工程节水潜力、蓝水真实节水潜力和绿水真实节水潜力分别可达62%、68%和49%。【结论】陕西省农业节水潜力较大, 初步有两方面建议: ①技术与管理措施结合, 加快农业节水增效; ②加快推进科学精准施肥, 减少环境压力。

关键词: 作物生产水足迹; 时空演变; 水足迹基准; 节水潜力; 陕西省

DOI: 10.18402/resci.2023.01.12

1 引言

水资源可持续利用与食物安全保障是人类社会持续发展的最基本支撑点^[1,2]。2021年, 中国农业用水量为3644.3亿m³, 占用水总量的61.5%, 灌溉水有效利用系数仅为0.568, 低于节水先进国家0.7~0.8的水平^[3]。坚持适水发展和节水优先战略, 在保障作物优质高产的前提下减少农业用水量, 是解决当前中国水危机并保障食物安全与农业可持续发展的根本途径^[1]。自1997年Falkenmark提出“蓝水”与“绿水”概念^[4], 农业水管理分析与决策方式发生变革。绿水(有效降水)与蓝水构成农业广义水资源, 二者相互制约与影响, 形成区域农业耗水连续

谱系^[2]。因此, 在基于蓝水和绿水的广义农业可用水资源概念的基础上, 对作物耗水进行准确量化和节水潜力评价是实现农业高效用水, 落实农业适水发展的基础^[5]。

农业节水潜力不仅与用水现状有关, 还与经济发展水平、投资力度、节水模式、用水结构等多因素相关, 是多种因素综合作用的体现^[6]。近年来, 针对不同地区不同作物, 国内外学者从多个角度量化节水潜力^[7,8]。针对印度水稻, Surendran等^[9]探讨了不同节水技术的差异与节水潜力, 发现采用创新的节水技术对于维持粮食安全是绝对必要的; 任晓红等^[10]基于AquaCrop模型, 对比现状和未来水平年在不同

收稿日期: 2022-08-23 修订日期: 2022-12-26

基金项目: 农业农村部农业科研杰出人才培养计划项目(13210321)。

作者简介: 闫晨健, 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事区域农业高效用水研究。E-mail: yanchenjian@nwfufu.edu.cn

通讯作者: 卓拉, 女, 内蒙古呼和浩特人, 研究员, 主要从事区域农业高效用水研究。E-mail: zhuola@nwfufu.edu.cn

2023年1月

情景下的阿勒泰地区春小麦产量及总节水量差异,分析小麦的节水潜力。但是,现有的农业节水潜力评价以灌溉水为范畴,并未区分蓝水和绿水。“保蓝水、稳绿水、提效率”是保证未来粮食安全用水的重要战略举措^[2]。显然,研究作物生产蓝水和绿水节水潜力,以低耗水、高产量为目标,可为中国高效节水灌溉的发展提供数据支撑。

作物生产水足迹指一定时间、一定地理范围内作物生产过程中产生的水资源消耗量和对水环境的影响,可分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹^[11,12]。蓝水足迹指地表水和地下水(灌溉水)的消耗;绿水足迹指降水的消耗;灰水足迹指以自然本底浓度和环境水质标准为基准,将一定污染物负荷稀释所需的淡水体积。蓝水足迹和绿水足迹也统称为消耗型水足迹,灰水足迹也称为稀释型水足迹^[12]。与传统作物生产耗水评价指标相比,作物生产水足迹实现了对作物生产耗水类型及对水环境影响的同时评价^[13],实现了对不同类型农业生产水资源利用效率的统一评价。近5年,国内外学者从全球^[14-16]、国家^[17-19]、流域^[20]、灌区^[21]、县域^[22,23]尺度对作物生产水足迹开展量化研究:Mekonnen等^[14]量化了1996—2005年期间174个国家的146种主要作物生产水足迹;Yang等^[17]计算了2001—2016年中国大陆14种主要作物的生产水足迹,揭示作物水分生产力及其经济价值之间的协同和权衡关系;卓拉等^[20]考虑不同供水和灌溉方式,对黄河流域小麦生产水足迹进行量化和评价,结果表明黄河流域小麦单位生产水足迹呈现上游向下游递减的趋势;高洁等^[16]在灌区尺度上,耦合土壤水分动态平衡模块,定量评价不同典型年灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时间尺度演变规律。目前关于不同地区、不同作物的作物生产水足迹研究取得了一系列进展,但并未进一步解析其节水潜力。

近年来,陕西省已成为农业水足迹评价的热点研究区域。国内外的惠焯等^[24]、王月英等^[25]、史利洁等^[26]等、Dalín等^[27]、Han等^[28]、Wang等^[29]、Yue等^[30]多名学者基于不同研究尺度和研究时段,均揭示了陕西省作物生产水足迹年际间波动较大、空间差异较为明显的特征。然而,一方面,已有研究仅以省域平均灌溉强度和有效降雨量推求作物生产水足迹由作物需水量^[24-28],研究结果不能完全反映实际作物耗

水情况;另一方面,如前文所述,陕西省作物生产节水潜力的问题还未完全回答,需要进一步研究。

综上,本文以地级市为研究单元,运行AquaCrop模型并加载相应水足迹模块,核算陕西省1989—2019年10种主要作物(小麦、玉米、稻谷、大豆、油菜籽、棉花、花生、苹果、烟草、葡萄)生产蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹并解析其时空演变特征;进一步区分蓝水和绿水,计算丰水年、平水年、枯水年工程和真实节水潜力,以期为促进陕西省农业产业一体化,推动陕西省农业适水发展与绿色高效节水,落实最严格水资源管理制度提供科学参考。

2 研究区概况、研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况

陕西省位于中国内陆西北地区(图1),地跨黄河、长江两大流域,是中国重要的粮油果基地^[31-34],其中水果生产规模居全国首位^[33]。省内大部分区域地处半干旱区,降水量不足且时空分布不均。陕北(延安市、榆林市)占全省面积的39.1%,但水资源总量只占8.5%,为35.6亿m³;陕南(汉中市、安康市、商洛市)占全省面积的34.0%,水资源总量却占到68.0%;关中地区(西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市)为陕西省经济中心,年平均GDP占陕西全省的80%以上^[35],水资源总量却仅占23.5%^[36]。

2.2 研究方法

2.2.1 作物生产水足迹计算

本文通过基于土壤水分动态平衡的作物生产蓝、绿水足迹计算方法^[37],区分灌溉(包含蓝水、绿水)与雨养(包含绿水)条件,其中灌溉条件指因降水量不足或分布不均匀,不能满足作物对水分要求,人为地进行灌溉;雨养条件指无人工灌溉,仅靠自然降水作为水分来源的农业生产。搭载AquaCrop模型^[38],模拟各作物逐年生产的蓝、绿水足迹。作物生产蓝、绿水足迹分别指单位产量作物生育期腾发量(ET)中的蓝水和绿水部分。

$$WF_b = \frac{10 \times \sum_{t=1}^{gp} ET_{b[t]}}{Y} \quad (1)$$

$$WF_g = \frac{10 \times \sum_{t=1}^{gp} ET_{g[t]}}{Y} \quad (2)$$

式中: WF_b 、 WF_g 分别为生产蓝、绿水足迹,m³/kg; $ET_{b[t]}$ 、 $ET_{g[t]}$ 分别为作物生长期第 t 天蓝、绿水作物腾发量,mm; gp 表示作物生长期总天数;10为单位

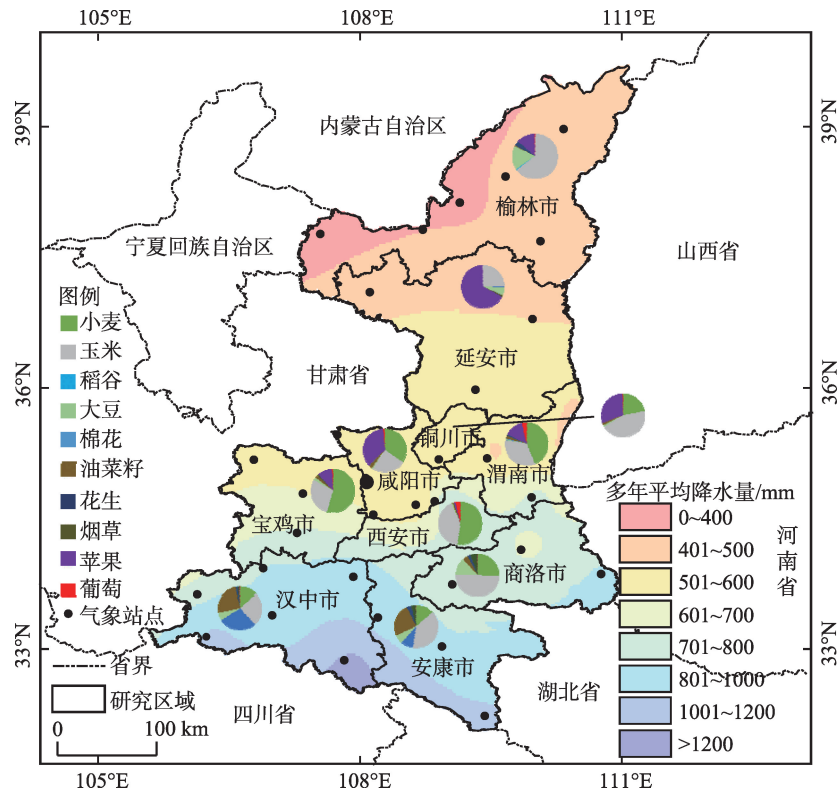


图1 陕西省气象站点分布及2019年各作物种植面积比例

Figure 1 Distribution of meteorological stations in Shaanxi Province and proportion of planting area of each crop in 2019

换算系数; Y 为作物单产, kg/hm^2 。

AquaCrop 模型模拟作物根区土壤水分动态平衡表达为:

$$S_t = S_{[t-1]} + PR_{[t]} + IRR_{[t]} + CR_{[t]} - ET_{[t]} - RO_{[t]} - DP_{[t]} \quad (3)$$

式中: S_t 为生长期中第 t 天土壤含水量, mm ; $PR_{[t]}$ 为第 t 天降水量, mm ; $IRR_{[t]}$ 为第 t 天灌溉量, mm ; $CR_{[t]}$ 为地下水毛细上升量, mm ; $RO_{[t]}$ 为地表径流量, mm ; $DP_{[t]}$ 为深层渗透, mm 。追踪逐日灌溉水与降水量对土壤水分平衡每一要素的贡献比例,即可求得相应的 $ET_{b[t]}$ 与 $ET_{g[t]}$, 实现作物生产蓝、绿水足迹的量化。

$$\left\{ \begin{aligned} S_{b[t]} &= S_{b[t-1]} + \left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]} \right) \times \frac{IRR_{[t]}}{\left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} \right)} - \left(DP_{[t]} + ET_{[t]} \right) \times \frac{S_{b[t-1]}}{S_{[t-1]}} \\ S_{g[t]} &= S_{g[t-1]} + \left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]} \right) \times \frac{IRR_{[t]}}{\left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} \right)} - \left(DP_{[t]} + ET_{[t]} \right) \times \frac{S_{g[t-1]}}{S_{[t-1]}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_{b[t]} &= S_{b[t-1]} + \left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]} \right) \times \frac{IRR_{[t]}}{\left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} \right)} - \left(DP_{[t]} + ET_{[t]} \right) \times \frac{S_{b[t-1]}}{S_{[t-1]}} \\ S_{g[t]} &= S_{g[t-1]} + \left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} - RO_{[t]} \right) \times \frac{IRR_{[t]}}{\left(PR_{[t]} + IRR_{[t]} \right)} - \left(DP_{[t]} + ET_{[t]} \right) \times \frac{S_{g[t-1]}}{S_{[t-1]}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: $S_{b[t]}$ 和 $S_{g[t]}$ 分别代表第 t 天土壤中蓝水和绿水, mm 。作物生长期土壤水分要素中, 每日地表径流中蓝水与绿水的构成是由当日的灌溉与降水的构成比例所决定; 每日 ET 与土壤水深层渗漏中蓝水、绿水的占比是由前一日结束时土壤水中蓝水、绿水所占比例所决定。

作物生产灰水足迹 ($WF_{\text{proc, grey}}$, m^3/kg) 基于国际水足迹网络标准方法^[39]计算, 公式如下:

$$WF_{\text{proc, grey}} = \frac{(\alpha \times AR) / (c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})}{Y} \quad (6)$$

式中: AR 为每公顷土地的化肥施用量, kg/hm^2 ; α 为淋溶率 (即进入水体的污染量占总化学物质施用量的比例); c_{max} 为最大容许浓度, kg/m^3 ; c_{nat} 为污染物的自然本底浓度, kg/m^3 。

在作物生长过程中, 肥料和农药的施用对水质都会产生污染, 污染尺度首先取决于肥料的施用率和作物的吸收率, 其次则跟土壤类型和作物生产阶段可利用的肥料数量有关。土壤中的磷能和其他矿物质反应生成不容易溶解的化合物, 不容易流

2023年1月

动。钾在土壤中的流动性介于磷和氮之间,但是由于钾离子能被土壤胶体离子吸引以至于钾并不容易被过滤。而氮很容易污染地下水和地表水,并且会形成对人体极其不利的亚硝酸根离子^[40]。考虑以上因素,将氮肥作为主要污染物计算其对应的作物生产灰水足迹。因氮肥施用量数据的可获取性,本文中灰水计算以2001—2019年为研究时段。

2.2.2 时间序列趋势分析方法

Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 法)^[41,42]属于非参数检验法,具有不限制样本分布,不受异常值干扰、计算较简便等优点,被众多学者应用于分析径流、气温、降水量和水沙变化等要素时间序列的变化趋势^[43-45]。

本文采用 M-K 检验法解析 1989—2019 年间陕西省市级尺度各作物生产水足迹时间演变趋势。其计算过程如下:

原假定 H_0 时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 为 n 个独立的、随机变量同分布样本;备择假设 H_1 是双边检验。对于所有的 $i, j \leq n$, 且 $i < j$, 统计秩序列 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_j 为时间序列的第 j 个数据值,本文中即为时间序列中第 j 年的水足迹值; x_i 为时间序列的第 i 个数据值,本文中即为时间序列中第 i 年的水足迹值; n 为数据样本长度,即年数; sgn 为符号函数。

当 $n > 10$ 时,标准的正态系统变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Z 为趋势统计量,依据所处的置信区间范围判断其显著性水平; $\text{Var}(S)$ 为 S 的方差。对于统计量 Z , 大于 0 时为上升趋势; 小于 0 时为下降趋势。 Z 的绝对值在大于 1.65、1.96 和 2.58 时, 分别表示通过置信度 90%、95%、99% 的显著性检验。

2.2.3 节水潜力计算

基于地方标准《基于作物生产水足迹调控的农

业节水潜力评价通则》(DB6111/T 183—2021)推荐方法^[46],通过区域作物生产消耗型水足迹与水足迹基准计算典型年陕西省市级尺度作物生产工程节水潜力和真实节水潜力。

工程节水潜力指实施节水灌溉措施前后的毛灌溉用水量差值,即灌溉取用水量(蓝水)的差值,包括减少的蒸散发、渗漏损失量和回归水量,仅涉及灌溉水节水,即蓝水节水。计算公式如下:

$$WSP_e = \left(\frac{WF_b \times Y \times S}{\eta} \right) - \left(\frac{WFB \times \frac{WF_b}{WF_b + WF_g} \times Y \times S}{\eta} \right) \quad (10)$$

式中: WSP_e 为工程节水潜力, m^3 ; S 为实际灌溉面积, hm^2 ; η 为灌溉水利用系数; WFB 为作物生产水足迹基准, m^3/kg , 指所属气候区内现有生产条件下, 某一作物生产消耗型水足迹升序排列时累积作物产量前 25 百分位对应的作物生产水足迹值^[37], 是为减少区域作物生产总消耗型水足迹, 设置的作物生产节水目标阈值。

真实节水潜力是实施节水灌溉或农艺措施前后的作物耗水量(蓝水足迹与绿水足迹)差值, 也称资源节水潜力。分为蓝水真实节水潜力和绿水真实节水潜力, 计算公式如下:

$$WSP_{a-b} = \left(WF_b - WFB \times \frac{WF_b}{WF_b + WF_g} \right) \times Y \times S \quad (11)$$

$$WSP_{a-g} = \left(WF_g - WFB \times \frac{WF_g}{WF_b + WF_g} \right) \times Y \times S \quad (12)$$

式中: WSP_{a-b} 为蓝水真实节水潜力, m^3 ; WSP_{a-g} 为绿水真实节水潜力, m^3 。

2.3 数据来源

本文中气象数据主要来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》, 包括日降水量、蒸发量、气压、气温、地温、湿度、风速风向、日照时数等^[47]。参考作物腾发量数据 FAO ET₀ Calculator 模型计算^[48], 大气 CO_2 浓度数据源于美国夏威夷冒纳罗亚观测站 (<https://www.esrl.noaa.gov/>)。土壤质地数据来自国际土壤参考和资料中心 (ISRIC) 土壤和地形数据库^[49]。各作物栅格尺度灌溉面积和雨养面积分布比例取自 MIRCA2000 数据库^[50]。陕西省各市各作物逐年产

量及播种面积来自1989—2019《陕西统计年鉴》^[51]。各年陕西省各作物单位面积氮肥施用量来自《全国农产品成本收益资料汇编》^[52]。灰水足迹计算使用最大容许浓度与自然本底浓度方法,采取《中国地表水环境质量标准》^[53]中Ⅲ类水标准,即氮的最大容许浓度为1 mg/L,自然本底浓度为0.2 mg/L。各作物生产水足迹基准值来自 Gao 等^[54],其基于中国2004—2013年5弧分栅格尺度作物生产水足迹核算结果。陕西省灌溉水利用系数 η 取自《中国水利统计年鉴》^[55]。

3 结果与分析

3.1 作物生产水足迹年际变化

1989—2019年,随着农业生产水平提高,作物单位面积产量上升,省级平均水平上,灌溉和雨养条件下作物生产消耗型水足迹均呈下降趋势。8种灌溉作物生产消耗型水足迹MK检验值均小于-2.58,通过置信度为99%的显著性检验(表1)。其中,苹果单产水平从1501 kg/hm²激增至18393 kg/hm²,其生产消耗型水足迹缩减91.3%,至0.423 m³/kg。除苹果外,棉花生产蓝、绿水足迹下降幅度最大,主要原因为棉花单产增加(自677 kg/hm²增至1398 kg/hm²)和灌溉比例大幅增加(33%提升至100%)。灌溉条件下,除苹果外,稻谷生产消耗型水足迹最小,2019年为0.906 m³/kg。花生生产蓝水足迹比重最大,为

64.5%。雨养条件下,10种作物生产绿水足迹均呈下降趋势,除稻谷以外的9种作物生产绿水足迹MK检验值均小于-2.58,通过置信度为99%的显著性检验(表1)。2019年,雨养作物中,苹果和葡萄生产消耗型水足迹最小,分别为0.295 m³/kg和0.308 m³/kg。值得一提的是,绝大多数情况下同一种作物生产消耗型水足迹在灌溉条件下均高于雨养条件,这一研究结果同已有国家尺度与省级尺度相关作物生产消耗型水足迹计算结果^[29]一致。陕西省大部分地处半干旱地区且水资源分布不均,降水量较少,不能完全满足作物需水量。基于水足迹模型模拟原理,雨养条件下实际耗水往往小于作物需水,而灌溉农业一定程度上可补充至作物所需水量,结果即体现为省级尺度加权平均后,同种作物灌溉条件生产消耗型水足迹高于雨养条件。同时,满足雨养条件的农田有效降雨量往往大于灌溉农田,结果即表现为雨养条件下 ET_g 均高于灌溉条件。因此,计算结果具有合理性。

在种植结构和灌溉面积显著变化、作物单产水平显著提高和作物生产水足迹下降的共同作用下,近30年陕西省在保障粮果持续增产的同时,作物生产总消耗型水足迹减少1.8%,从163亿m³/a降至161亿m³/a,其中蓝水足迹占比较为稳定,研究时段内平均占比28.2%,2019年为24.1%(图2)。比较各

表1 1989—2019年陕西省级平均作物生产消耗型水足迹年际变化与MK检验值

Table 1 Interannual variation and Mann-Kendall (MK) test value of average crop production consumptive water footprint in Shaanxi Province, 1989-2019

作物	灌溉作物						雨养作物					
	蓝水足迹/(m ³ /kg)		MK 检验值	绿水足迹/(m ³ /kg)		MK 检验值	总水足迹/(m ³ /kg)		MK 检验值	绿水足迹/(m ³ /kg)		MK 检验值
	1989年	2019年		1989年	2019年		1989年	2019年		1989年	2019年	
小麦	1.290	0.967	-2.99**	1.133	0.704	-4.42**	2.423	1.671	-3.94**	2.101	1.490	-3.26**
玉米	0.684	0.498	-2.48*	0.727	0.537	-3.81**	1.411	1.035	-3.60**	1.278	0.913	-3.47**
稻谷	0.646	0.545	-2.58**	0.403	0.361	-1.26	1.049	0.906	-2.65**	0.883	0.776	-1.70
大豆	2.839	1.414	-4.59**	2.230	1.291	-5.41**	5.069	2.705	-5.13**	4.717	2.419	-5.30**
棉花	8.152	2.255	-4.93**	5.622	1.654	-4.59**	13.774	3.909	-4.90**	10.845	3.082	-4.96**
花生	2.039	1.063	-4.56**	1.281	0.710	-5.51**	3.320	1.773	-5.07**	2.988	1.569	-4.66**
油菜籽										2.312	1.493	-4.11**
苹果	2.742	0.242	-7.07**	2.147	0.181	-6.83**	4.889	0.423	-7.34**	3.587	0.295	-7.41**
葡萄										0.837	0.308	-5.98**
烟草	2.553	1.127	-4.56**	2.279	1.092	-5.24**	4.832	2.219	-5.61**	3.485	1.655	-5.58**

注:**代表通过置信度为99%的显著性检验,*代表通过置信度为95%的显著性检验。下同。

2023年1月

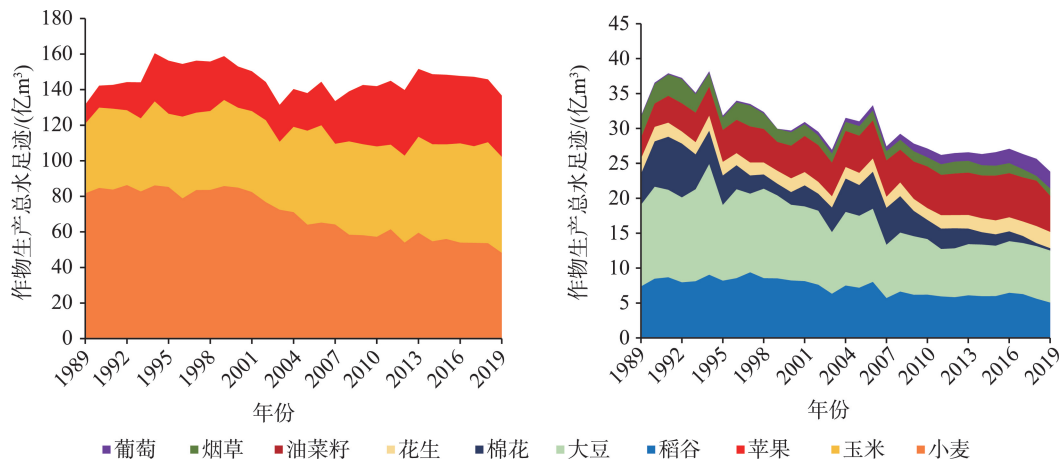


图2 1989—2019年陕西省各作物生产消耗型总水足迹年际演变

Figure 2 Interannual evolution of the total consumptive water footprint of crop production in Shaanxi Province, 1989-2019

作物对陕西省作物生产总水足迹的贡献,玉米、小麦和苹果占比最大:2019年玉米、小麦、苹果分别占2019年作物生产总消耗型水足迹的33.6%、30.0%和21.5%。研究期间,棉花生产总消耗型水足迹下降了92.8%,降幅最大,主要原因是种植面积缩小93.3%;苹果种植面积扩张2.3倍,其生产总消耗型水足迹上升2.2倍。随着稻谷灌溉面积减少,稻谷生产总蓝水足迹下降幅度24.8%,仅次于棉花78.9%。

2001—2019年陕西省各作物生产灰水足迹年际演变如表2所示。苹果和油菜籽生产灰水足迹呈现上升趋势,其中苹果生产灰水足迹MK检验值大

于1.96,通过置信度为95%的显著性检验。此外8种作物生产灰水足迹均呈现下降趋势,除小麦、水稻外6种作物生产灰水足迹MK检验值均小于-1.65,通过置信度为90%的显著性检验。2015年后作物生产灰水足迹均下降更为明显,可见《到2020年化肥使用量零增长行动方案》^[55]发布以来,化肥使用量零增长行动取得明显成效。

3.2 作物生产水足迹市际分布和演变

陕西省各地级市各作物生产消耗型水足迹有较大差异,且在研究期间年际变化趋势不尽相同。如图3、图4所示,小麦生产消耗型水足迹具有较明显的空间差异性,2019年灌溉条件下市际作物生产

表2 2001—2019年陕西省级平均作物生产灰水足迹年际变化与MK检验值

Table 2 Interannual variation and Mann-Kendall (MK) test value of average greywater footprint of crop production in Shaanxi Province, 2001-2019

作物	灰水足迹/(m ³ /kg)					MK 检验值
	2001年	2005年	2010年	2015年	2019年	
小麦	8.344	9.950	10.051	8.967	7.261	-0.07
玉米	10.439	7.887	9.317	8.174	7.497	-1.82
稻谷	5.613	4.768	4.149	3.770	3.225	-1.40
大豆	16.064	11.332	8.233	17.419	11.209	-1.96
棉花	24.547	15.738	20.162	22.691	16.792	-1.82
花生	4.264	3.681	2.877	3.258	2.410	-4.41**
油菜籽	12.997	10.020	8.903	16.144	12.877	0.91
苹果	2.749	2.342	4.441	4.035	2.783	2.10*
葡萄	3.534	3.069	2.981	2.383	2.099	-4.48**
烟草	7.172	0.194	0.047	0.413	0.454	-2.31*

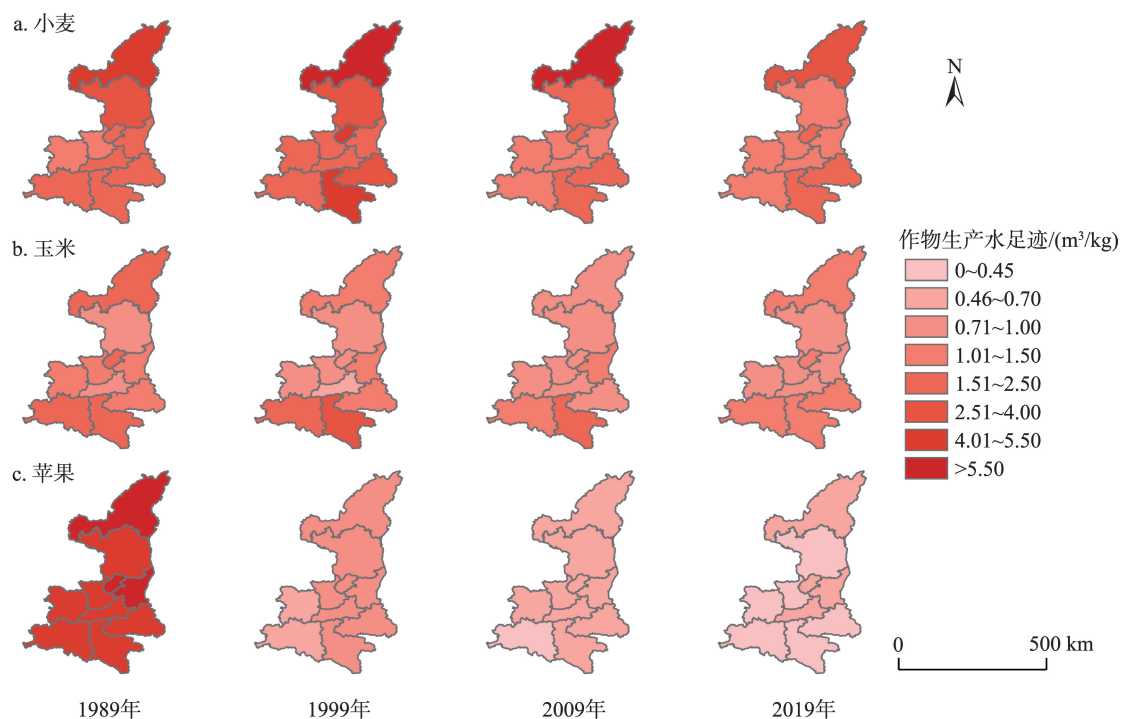


图3 1989—2019年灌溉模式陕西省典型作物生产消耗型水足迹空间分布

Figure 3 Spatial distribution of consumptive water footprint of typical crops under irrigation mode in Shaanxi Province, 1989-2019

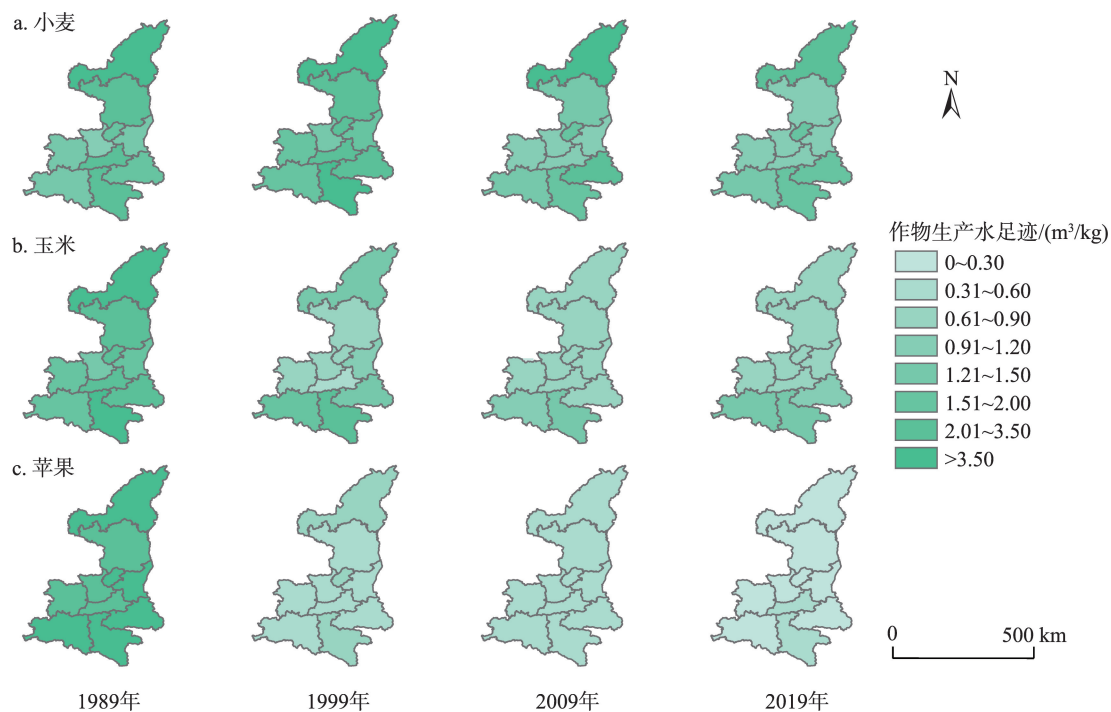


图4 1989—2019年雨养模式陕西省典型作物生产消耗型水足迹空间分布

Figure 4 Spatial distribution of consumptive water footprint of typical rain-fed crops in Shaanxi Province, 1989-2019

2023年1月

消耗型水足迹范围为1.222~2.873 m³/kg,市际间标准差为均值的30.5%;雨养条件下相应范围为0.978~3.075 m³/kg,市际间标准差为均值的40.0%。主要原因是市际间小麦单位面积产量和作物腾发差异大,2019年小麦单位面积产量西安市最大(4753 kg/hm²),榆林市最小(1508 kg/hm²)。苹果因各市单产差异不大且作物腾发量差异较小,其生产消耗型水足迹空间差异较小。榆林市因地处干旱少雨地区,多数情况下作物生产蓝水足迹占比均大于60%,高于其他地区。值得注意的是,西安市玉米、稻谷、大豆生产水足迹在研究时段内与其他地区发展趋势反向,呈上升趋势,主要原因为作物腾发量随西安市日照时数、风速、气温等气候变化呈增加趋势;且西安市稻谷单产水平先增后减,在2011年达到峰值8072 kg/hm²,之后降至4850 kg/hm²。

图5展示了陕西省地级市小麦、玉米、苹果3种作物生产灰水足迹空间分布特点和变化趋势。与苹果相比,各市小麦、玉米生产灰水足迹相差更大:2019年市级小麦、玉米生产灰水足迹范围分别为5.623~18.573 m³/kg、5.931~17.082 m³/kg,市际间标准差为分别为均值的37.8%、43.7%。小麦、玉米生

产灰水足迹低值区集中在关中地区,这与关中地区科学施肥水平相对较高、肥料使用管理方面的宣传和培训更全面有关。同年各市苹果生产灰水足迹差异不大,相对高值区集中在陕北和关中地区,但苹果主产区也位于此,2019年陕北、关中地区苹果种植面积占全省78.5%,大量的苹果种植于生产灰水足迹较高的地区,无疑会增加当地的生态环境压力,多方参与加快转变陕西省苹果施肥方式、减少不合理化肥投入势在必行。

表3和表4分别列出1989年和2019年各市各作物灌溉和雨养条件下作物生产消耗型水足迹及总消耗型水足迹。可以看出在灌溉、雨养条件下作物生产消耗型水足迹空间差异较为明显,玉米生产消耗型水足迹相对高值集中在陕南地区,此外商洛市油菜籽生产水足迹在研究时段内均为全省最高值,棉花、花生生产消耗型水足迹高值区集中在陕北延安、榆林两市。此外,大多数情况下关中地区各作物蓝水足迹占比均呈现下降趋势,而陕南地区呈现增加趋势。延安市、咸阳市苹果生产总消耗型水足迹增幅最大,灌溉条件下分别为236.6%、139.4%,雨养条件下分别为483.6%、394.2%。

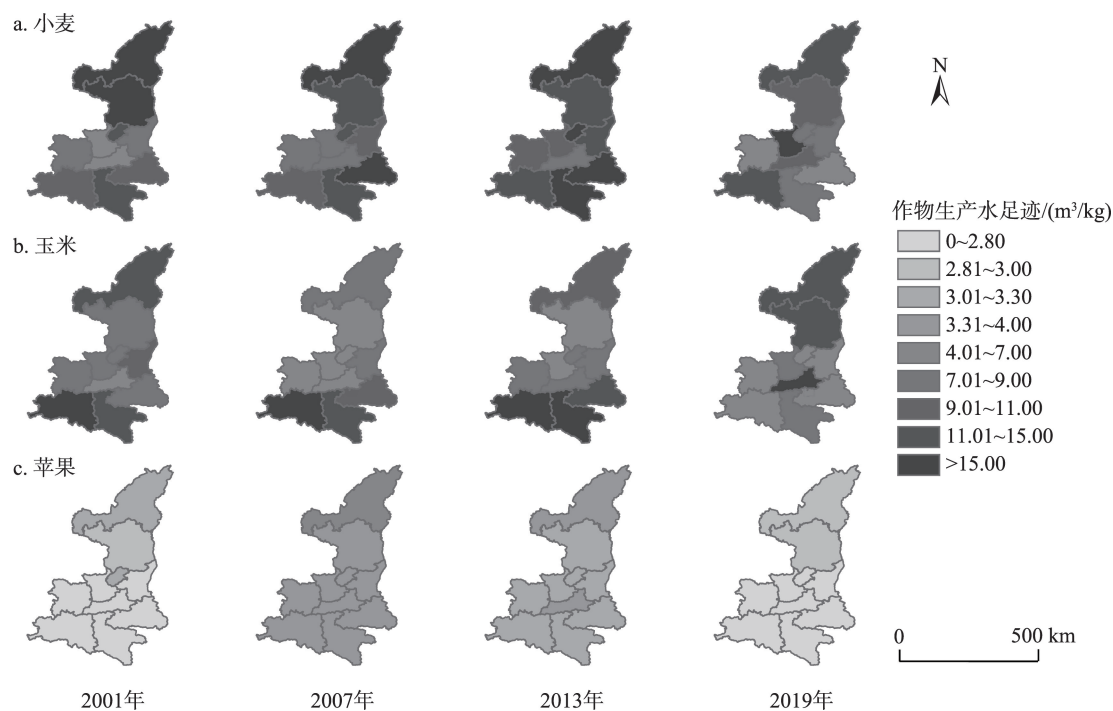


图5 2001—2019年陕西省典型作物生产灰水足迹空间分布

Figure 5 Spatial distribution of grey water footprint of typical crops in Shaanxi Province, 2001-2019

表3 2019年灌溉、雨养条件下各市作物生产消耗型水足迹 (m^3/kg)Table 3 Consumptive water footprint of crop production in each city under irrigation and rainfed conditions, 2019 (m^3/kg)

作物	西安市		铜川市		宝鸡市		咸阳市		渭南市		汉中市		安康市		商洛市		延安市		榆林市	
	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养
小麦	1.319	1.124	2.083	1.695	1.247	1.087	1.286	1.086	1.471	1.169	1.364	1.257	1.747	1.610	2.099	1.815	1.222	0.978	2.873	3.075
玉米	0.998	0.853	1.042	0.899	0.894	0.834	0.850	0.759	0.942	0.725	1.297	1.231	1.325	1.263	1.226	1.107	0.731	0.623	1.039	0.833
稻谷	1.409	1.156	1.262	1.055	0.875	0.785			0.557	0.417	0.707	0.644	0.726	0.665	0.876	0.785	1.090	0.942	0.647	0.532
大豆	3.011	2.608	2.768	2.429	2.789	2.646	2.312	2.096	2.536	1.891	3.152	3.058	2.506	2.438	3.013	2.788	2.075	1.804	2.897	2.428
棉花	4.763	3.652			1.751	1.611			4.030	3.067	0.789	0.757	3.185	3.008			7.330	5.398	5.515	4.079
花生	1.256	1.104					1.844	1.666	1.324	0.979	1.610	1.483	1.806	1.642	1.917	1.672	1.990	1.801	2.436	2.205
油菜籽		1.359		1.728		1.604		1.295		1.497		1.236		1.521		1.979		1.473		1.241
苹果	0.467	0.306	0.453	0.298	0.387	0.295	0.418	0.300	0.481	0.290	0.353	0.300	0.379	0.317	0.390	0.274	0.425	0.275	0.484	0.293
葡萄	0.329			0.317		0.319		0.319		0.308		0.304		0.317		0.288		0.288		0.302
烟草					2.636	2.052	2.270	1.595			1.401	1.197	2.263	1.913	2.206	1.602	2.542	1.569		

表4 2019年灌溉、雨养条件下各市作物生产总消耗型水足迹 ($10^6 \text{m}^3/\text{a}$)Table 4 Total consumptive water footprint of crop production in each city under irrigation and rain-fed conditions, 2019 ($10^6 \text{m}^3/\text{a}$)

作物	西安市		铜川市		宝鸡市		咸阳市		渭南市		汉中市		安康市		商洛市		延安市		榆林市	
	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养	灌溉	雨养
小麦	832.86	79.51	53.50	49.02	546.45	369.71	666.04	300.87	988.47	447.61	123.30	56.32	33.97	105.01	18.44	149.08	0.56	0.84	0.91	0.51
玉米	341.53	269.96	109.85	107.46	225.58	213.35	328.41	302.98	477.28	476.22	148.50	134.89	193.21	182.36	147.00	161.22	83.82	235.10	242.57	1014.39
稻谷	0.85	0.00	0.25	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	3.17	0.00	375.49	0.72	102.52	0.00	0.96	0.00	8.50	0.00	13.92	0.00
大豆	15.03	1.06	3.25	3.95	20.01	15.41	10.33	11.80	16.10	5.01	29.93	42.52	4.25	62.19	3.92	78.34	19.03	56.35	118.97	229.97
棉花	0.58	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	25.62	0.00	0.16	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	3.75	0.00	1.46	0.00
花生	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00	38.01	0.00	24.01	0.05	37.48	2.57	17.63	0.85	4.12	0.00	108.46	0.00
油菜籽	0.00	7.96	0.00	3.45	0.00	21.43	0.00	37.18	0.00	38.91	0.00	210.18	0.00	169.37	0.00	16.46	0.00	5.09	0.00	4.34
苹果	13.55	12.73	27.21	148.32	92.00	139.15	299.79	917.10	77.10	456.74	1.05	4.19	0.18	1.53	0.42	1.05	27.98	945.07	5.76	283.09
葡萄	0.00	55.51	0.00	2.52	0.00	13.85	0.00	27.46	0.00	124.84	0.00	3.42	0.00	1.85	0.00	0.89	0.00	1.08	0.00	9.23
烟草	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	9.52	0.55	2.24	0.00	0.00	5.06	7.82	34.04	3.76	45.19	6.68	0.42	3.61	0.00	0.00
总和	1204.93	426.73	194.06	314.71	885.86	782.42	1305.60	1599.64	1625.75	1549.33	707.49	460.09	406.06	528.64	233.57	414.57	148.17	1247.15	492.04	1541.52

2023年1月

3.3 作物生产节水潜力

基于年降水量排频计算,选取2010—2019年典型丰水年(2013)、平水年(2018)和枯水年(2016),计算作物生产工程节水潜力和真实节水潜力。陕西省各作物农业节水潜力如表5所示。小麦、棉花、苹果工程节水潜力、蓝水真实节水潜力均为丰水年最大,而玉米、稻谷、大豆工程节水潜力和蓝水真实节水潜力均表现为枯水年节水潜力最大(平均占年内各作物生产消耗型总水足迹的76.5%、74.8%)。因丰水年小麦、苹果作物生产消耗型水足迹相对较大,所以其工程节水潜力、蓝水真实潜力均为3个典型年内最大(占小麦、苹果消耗型总水足迹比例分别为:小麦68.1%、65.7%,苹果82.5%、78.6%)。此外,绿水真实节水潜力与工程、蓝水真实节水潜力

不同,各典型年相差不大。小麦节水潜力最大,占灌溉作物总消耗型水足迹的29.6%(丰水年),玉米次之,为18.6%(枯水年)。

陕西省典型年工程节水潜力和真实节水潜力空间分布如图6所示:相较于陕北、陕南,关中地区节水潜力最大,其中渭南市是陕西省节水潜力最大的城市,3个典型年内渭南市节水潜力平均占全省总节水潜力的22.5%,占当地总消耗型水足迹的66.9%,其中小麦节水潜力占比最大(53.5%),占当地小麦总消耗型水足迹的62.3%。西安市节水潜力仅次于渭南市(20.3%),其中小麦和玉米分别贡献66.5%和30.2%。因陕北地处干旱地区,作物生产水足迹基准相对较低,且作物播种面积相对较少,其节水潜力最小,仅占全省的6.3%(玉米、大豆、花生

表5 陕西省典型年各作物生产节水潜力计算结果 (10⁸m³/a)

Table 5 Calculation results of water-saving potential of crop production in typical years in Shaanxi Province (10⁸m³/a)

作物	工程节水潜力			蓝水真实节水潜力			绿水真实节水潜力		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
小麦	26.9	21.5	18.4	15.5	12.4	10.6	7.8	8.6	8.6
玉米	15.0	15.1	16.0	8.7	8.7	9.3	6.5	7.9	6.2
稻谷	3.6	3.3	4.8	2.1	1.9	2.8	2.5	2.2	1.9
大豆	1.3	1.2	1.5	0.8	0.7	0.9	0.5	0.6	0.5
棉花	1.9	0.4	1.2	1.1	0.2	0.7	0.7	0.1	0.5
花生	1.3	1.6	1.3	0.7	1.0	0.7	0.4	0.4	0.3
苹果	6.2	4.4	6.0	3.6	2.6	3.4	2.0	1.8	1.6
烟草	0.5	0.2	0.5	0.3	0.1	0.3	0.3	0.1	0.2
合计	56.7	47.8	49.7	32.7	27.6	28.7	20.7	21.8	19.8

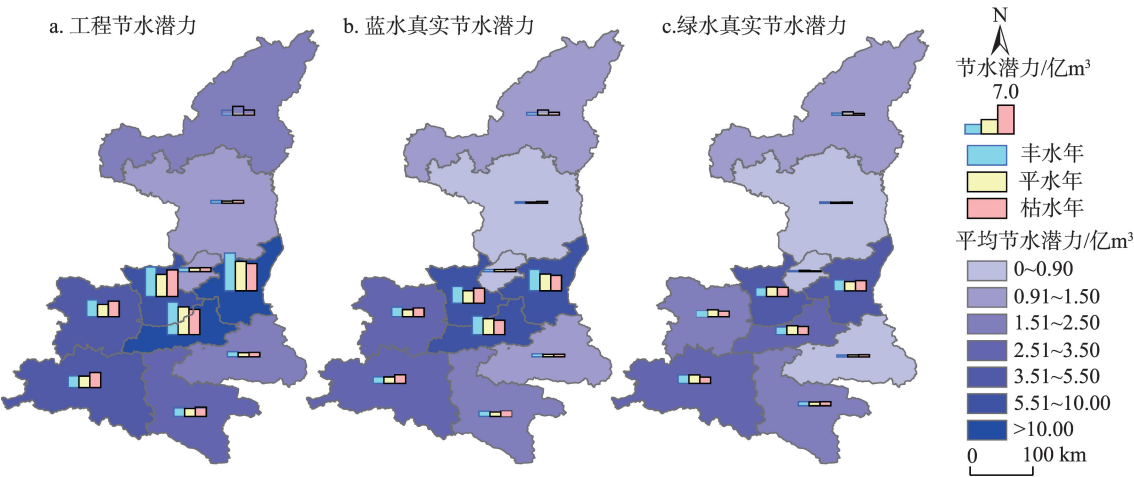


图6 陕西省典型年作物生产节水潜力分布图

Figure 6 Spatial distribution of crop water-saving potentials in typical years in Shaanxi Province

占比较大,依次为42.6%、24.6%、18.7%),陕南地区次之,为19.0%(玉米、稻谷、小麦占比较大,依次为38.2%、34.3%、12.8%)。

4 结论、讨论与建议

4.1 结论

本文基于不同供水条件作物生产水足迹对田间蓝水和绿水消耗有机评价的指标优势,量化1989—2019年陕西省地级市尺度10种主要作物逐年生产蓝、绿、灰水足迹,在解析其时空演变特征的基础上,计算陕西省典型年作物生产工程节水潜力和蓝、绿水真实节水潜力。主要结论如下:

(1)研究期间,陕西省内各地区作物生产水足迹均呈现减小趋势。自1989年以来,陕西省10种作物灌溉和雨养条件下作物生产消耗型水足迹均呈下降趋势,且作物生产消耗型水足迹较高的作物(大豆、棉花、苹果)有明显的下降趋势,其中苹果生产消耗型水足迹缩减91.3%。

(2)作物生产水足迹在作物间和区域间均有较大差异(表3)。灌溉情况下,1989年棉花生产消耗型水足迹均值 $13.774 \text{ m}^3/\text{kg}$,是稻谷值的13.1倍,而在2019年下降至4.3倍。2004年之前,各地区基本以玉米、稻谷生产消耗型水足迹最小,经济类作物生产水足迹较大;由苹果单产水平激增驱动,2004年之后以苹果生产消耗型水足迹最小。

(3)作物生产总消耗型水足迹组成方面,小麦、玉米、苹果占比最大,研究时段内占10种作物生产消耗型水足迹总值的39.7%、27.5%、15.7%,集中在关中地区,分别占其总消耗型水足迹的90.5%、65.9%和96.9%。

(4)陕西省典型年作物节水潜力研究结果与生产总消耗型水足迹空间分布类似,关中地区节水潜力最大,其中渭南市是陕西省节水潜力最大的地区,平均占全省总节水潜力的22.5%,各作物中小麦节水潜力最大,占灌溉作物总消耗型水足迹的29.6%(丰水年)。

4.2 讨论

与以往研究^[25-30]相比(图7),本文陕西省作物生产消耗型水足迹计算结果数量级均一致,大部分计算结果的差异在水足迹计算不确定性范围内

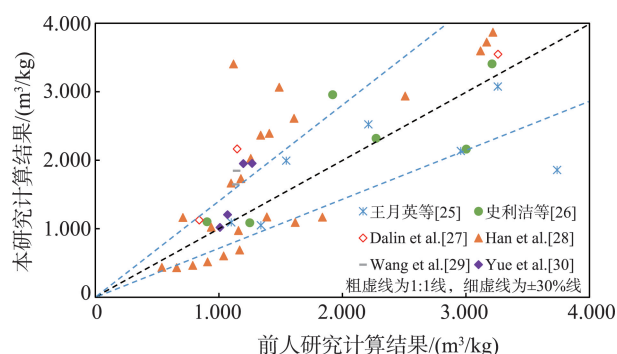


图7 陕西省作物生产消耗型水足迹与同时段以往研究结果的比较

Figure 7 Comparison of consumptive water footprint of crop production in Shaanxi Province with previous research results for the same time period

($\pm 30\%$)^[56]。差异的来源主要包括计算方法、数据来源和计算空间单元的不同。比如Han等^[28]以省域为空间单元,依据全省年灌溉水量、作物播种面积与省平均有效降雨推求作物生产水足迹;相较于其他以往研究基于作物需水量推求作物生产水足迹^[25-28],与本文基于作物实际耗水量计算的作物生产水足迹差异显著。

需特别说明的是,水足迹核算方法主要分为2种类型:一是基于体积的(volumetric oriented)国际水足迹网络(water footprint network, WFN)标准计算方法,也称“WFN方法”^[39],单位为水的体积(m^3);一是基于生命周期环境影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)的环境影响水足迹方法,也称“ISO14046方法”^[57],单位为水当量($\text{H}_2\text{O-eq}$)。2种方法皆可量化评估某种产品或服务在整个生产供应链对水资源及水环境的直接和间接影响,但侧重点和评价目标有所区别^[58]:WFN方法强调水足迹形成的物理过程及其对水资源量、质及水循环的作用,核算结果可直接用于水资源耗用通量核算、虚拟水贸易测算、水资源利用效率评价及水资源压力评价,可直接与传统水资源统计指标进行比较分析;LCIA评价方法旨在量化与评估水足迹对耗水区域形成的潜在环境影响,通常由基于水量的水足迹计算结果与环境特征指标相乘得到。其中特征指标包括水量稀缺度、水的毒性和富营养化指标等,强调水资源利用过程中环境影响的多样化与区域性。水足迹计算方法的选取应依据具体研究目

2023年1月

标准确定^[58]。本文研究目标是通过陕西省作物生产水足迹核算与时空演变特征解析,推算农业节水潜力,作物生产的实际蓝水和绿水消耗量是核心表征通量,更适宜选择WFN方法。

4.3 建议

基于以上结果,对陕西省节水农业可持续发展有以下两方面建议:

(1)技术与管理措施结合,加快挖掘农业节水潜力。过去30年陕西省农业生产水平提高对农业水资源效率提高作用显著,但仍存在可观的农业节水潜力。丰水年关中地区小麦、玉米节水潜力占灌溉作物总消耗型水足迹的39%,应加快关中宝鸡峡等灌区的现代化改造,配套灌排设施,落实农业节水挖潜工作;将工程节水措施与非工程节水措施相结合,提升陕西省各区域农业综合生产能力,高度重视高效节水灌溉技术与农艺技术的配套集成,最大程度减少输水、配水、灌水及作物耗水过程中的奢侈型水损失(如渗漏、水面蒸发和土壤蒸发等),充分提高灌溉水利用率和作物水分利用效率,形成分地区的农业高效节水整体解决方案,可以保障陕西省水安全和粮食安全。

(2)减少化肥不合理投入,推进科学施肥迫在眉睫。研究期间多种作物生产灰水足迹均呈下降趋势,但苹果和油菜籽生产灰水足迹仍具有增长趋势。与卓拉等^[18]研究相比,陕西省小麦、棉花、油菜籽、花生、苹果生产灰水足迹均远大于黄河流域多年均值,其中2019年陕西省小麦生产灰水足迹为7.261m³/kg,是黄河流域多年均值的15.7倍,说明陕西省氮肥施用量仍然偏高;此外,陕西省苹果生产灰水足迹高值位于苹果主要产区,这无疑增大了生态环境压力。要根据不同区域、不同作物生产实际和施肥需要,由政府主导逐步提高肥料利用率并改进施肥方式、调整化肥使用结构,进行精准施肥。

本文结果不仅对促进陕西省农业产业一体化,推动陕西省农业节水发展与绿色高效节水,落实最严格水资源管理制度提供科学参考,相关方法也可用于其他区域同类型研究。此外,本文也有以下不足:一方面,灰水足迹计算方法只选取氮肥为主要污染源,尚未考虑其他污染物类型;另一方面,进行

市级尺度各作物生产灰水足迹核算时,由于数据可获取性,市级尺度的施氮量是根据播种面积进行分配,再将市级总施氮量分配至每种作物,该方法得出的施氮量与实际值可能存在偏差,在更小尺度区域或具体田块应用时还需进一步调研和调整。

未来研究可根据考虑生态、经济、社会、能源等驱动因素,确立生态系统稳定和粮食安全等多目标下的水资源可利用量及节水潜力,提出不同区域、不同情景下的水资源优化方案,且节水潜力未来研究可综合生物节水、农艺节水等方面,在灌区、流域等不同尺度进行计算,形成多区域、多方面的农业高效节水解决方案,保障区域生态环境健康。

参考文献(References):

- [1] 康绍忠. 贯彻落实国家节水行动方案推动农业节水发展与绿色高效节水[J]. 中国水利, 2019, (13): 1-6. [Kang S Z. National water conservation initiative for promoting water-adapted and green agriculture and highly-efficient water use[J]. China Water Resources, 2019, (13): 1-6.]
- [2] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3493-3503. [Li B G, Huang F. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (17): 3493-3503.]
- [3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R/OL]. (2022-06-15) [2022-08-12]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615_1579315.html. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin[R/OL]. (2022-06-15) [2022-08-12]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202206/t20220615_1579315.html.]
- [4] Falkenmark M, Kijne J W, Taron B, et al. Meeting water requirements of an expanding world population[J]. Philosophical Transactions: Biological Sciences, 1997, 352(1356): 929-936.
- [5] 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): 1953-1966. [Wu P T, Zhuo L, Liu Y L, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 1953-1966.]
- [6] 赵令, 雷波, 苏涛, 等. 我国粮食主产区农业灌溉节水潜力估算研究[J]. 节水灌溉, 2019, (8): 130-133. [Zhao L, Lei B, Su T, et al. Estimation of water saving potential of agricultural irrigation in major grain producing areas of China[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (8): 130-133.]

- [7] 崔永正, 刘涛. 黄河流域农业用水效率测度及其节水潜力分析[J]. 节水灌溉, 2021, (1): 100–103. [Cui Y Z, Liu T. Measurement of agricultural water use efficiency and analysis of water saving potential in the Yellow River Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2021, (1): 100–103.]
- [8] Siderius C, Biemans H, Kashaigili J, et al. Water conservation can reduce future water–energy–food–environment trade-offs in a medium-sized African river basin[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266, 107548.
- [9] Surendran U, Raja P, Jayakumar M, et al. Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 1–19.
- [10] 任晓红, 王会肖, 刘昌明, 等. 基于 AquaCrop 模型的阿勒泰地区春小麦节水潜力分析[J/OL]. 中国生态农业学报, 2022, 30(10): 1638–1648. [Ren X H, Wang H X, Liu C M, et al. Analysis of water saving potential of spring wheat in Altay area based on Aquacrop model[J/OL]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30 (10): 1638–1648.]
- [11] Hoekstra A Y. Virtual water trade. In: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[R] // Value of Water Research Report Series No. 12. UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, 2003.
- [12] Hoekstra A Y. The water footprint of modern consumer society[M]. London: Routledge, 2013.
- [13] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7): 1259–1276.
- [14] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Blue water footprint linked to national consumption and international trade is unsustainable[J]. Nature Food, 2020, 1: 792–800.
- [15] 汪艺晗, 杨谨, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 974–986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 974–986.]
- [16] Wiedmann T, Lenzen M. Environmental and social footprints of international trade[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(5): 314–321.
- [17] Yang X, Zhuo L, Xie P, et al. Physical versus economic water footprints in crop production: a spatial and temporal analysis for China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 169–191.
- [18] Abdelkader A, Elshorbagy A, Tuninetti M, et al. National water, food, and trade modeling framework: The case of Egypt[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 485–496.
- [19] Zhai Y, Zhang T, Bai Y, et al. Energy and water footprints of cereal production in China[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 164: 105150.
- [20] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 264–271. [Zhuo L, Wang W, Feng B B, et al. Quantification and evaluation of water footprint of wheat production in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 264–271.]
- [21] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105–112. [Gao J, Wu P T, Xie P X, et al. Quantitative analysis of multi spatial and temporal distribution of blue–green water resources and crop production water footprint in irrigated areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 105–112.]
- [22] 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 & Recycling, 2021, 173: 105709.
- [23] Cheng X, Chen L, Sun R, et al. Identification of regional water resource stress based on water quantity and quality: A case study in a rapid urbanization region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 216–223.
- [24] 惠婷, 陈晓楠, 宋健峰. 基于水足迹的作物生产生态效率评价: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3078–3091. [Hui X, Chen X N, Song J F. Assessing crop production eco-efficiency based on water footprints: The case of Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3078–3091.]
- [25] 王月英, 刘科伟. 陕西省农业水足迹量化及对水资源的影响分析[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 109–116. [Wang Y Y, Liu K W. Quantification of agricultural water footprint and its impact on water resources in Shaanxi Province[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(4): 109–116.]
- [26] 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.]
- [27] Dalin C, Hanasaki N, Qiu H G, et al. Water resources transfers through Chinese interprovincial and foreign food trade[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(27): 9774–9779.
- [28] Han X X Q, Zhao Y, Gao X R, et al. Virtual water output intensifies the water scarcity in Northwest China: Current situation, problem analysis and countermeasures[J]. Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144276.
- [29] Wang W, Zhuo L, Li M, et al. The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop

2023年1月

- water footprint and benchmarking[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123916.
- [30] Yue Z W, Ji X X, Zhuo L, et al. Spatiotemporal responses of the crop water footprint and its associated benchmarks under different irrigation regimes to climate change scenarios in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(18): 4637–4656.
- [31] 王卫东, 曹旭. 陕西省主要粮食作物种植结构时空变化特征分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(9): 155–162. [Wang W D, Cao X. Temporal and spatial variation characteristics of main grain crop planting structures in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(9): 155–162.]
- [32] 杨华, 芮晓, 李炬霖, 等. 陕西省农业现代化水平时空特征及障碍因素[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 172–183. [Yang H, Rui Y, Li J L, et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province[J]. *Resources Science*, 2020, 42(1): 172–183.]
- [33] 丁振民, 姚顺波. 陕西省耕地转移对生态系统服务价值的影响[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1070–1081. [Ding Z M, Yao S B. Effects of cultivated land transition on ecosystem service value in Shaanxi Province of China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1070–1081.]
- [34] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1059–1069. [Zhuo L, Li M, Wu P T, et al. Assessment of crop related physical-virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1059–1069.]
- [35] 陶冶, 李军, 冯开文. 陕西省农业灌溉水资源保障程度及空间差异分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(8): 97–104. [Tao Y, Li J, Feng K W. Analysis on the guarantee degree of irrigation water resources and its spatial difference in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(8): 97–104.]
- [36] 陕西省水利厅. 2020陕西省水资源公报[EB/OL]. (2021-08-26) [2022-08-12]. http://slt.shaanxi.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/zd gz/szygb/202108/t20210826_2188399.html. [Shaanxi Provincial Water Resources Department. 2020 Shaanxi Provincial Water Resources Bulletin[EB/OL]. (2021-08-26) [2022-08-12]. http://slt.shaanxi.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/zd gz/szygb/202108/t20210826_2188399.html.]
- [37] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Benchmark levels for the consumptive water footprint of crop production for different environmental conditions: A case study for winter wheat in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 20(11): 4547–4559.
- [38] Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. Aqua Crop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426–437.
- [39] Hoekstra A, Chapagain A, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [40] 盖力强, 谢高地, 李士美, 等. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(11): 2066–2071. [Gai L Q, Xie G D, Li S M, et al. A Study on production Water Footprint of winter-wheat and maize in the North China Plain[J]. *Resources Science*, 2010, 32(11): 2066–2071.]
- [41] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [42] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245–259.
- [43] 甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1824–1834. [Gan R, Xu M S, Zuo Q T. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River basin[J]. *Resources Science*, 2022, 44(9): 1824–1834.]
- [44] 李慧娟, 师长兴, 马小晴, 等. 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 499–507. [Li H J, Shi C X, Ma X Q, et al. Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 499–507.]
- [45] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. CMIP5模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估: 以开都-孔雀河为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1141–1153. [Li X F, Xu C C, Li L, et al. Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of Northwest China by the CMIP5 models: A case of the Kaidu-Kongqi River Basin[J]. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1141–1153.]
- [46] 杨凌示范区市场监督管理局. 基于作物生产水足迹调控的农业节水潜力评价通则: DB 6111/T 183–2021[R/OL]. (2021-11-23) [2022-08-23]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=EB32A613C0325382E05397BE0A0A01F4>. [Market Supervision and Administration Bureau of Yangling Demonstration Zone. General Rules for Agricultural Water Saving Potential Evaluation Based on Water Footprint Regulation of Crop Production: DB 6111/T 183–2021[R/OL]. (2021-11-23) [2022-08-23]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=EB32A613C0325382E05397BE0A0A01F4>.]
- [47] 国家气象信息中心. 中国地面气候资料日值数据集(V3. 0)[EB/OL]. (2017-12-30) [2018-01-31]. http://data.cma.cn/data/cdc-detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html. [National Meteorological Information Center. Daily Ground Climate Data Set in China (V3. 0) [EB/OL]. (2017-12-30) [2018-01-31]. http://data.cma.cn/data/cdc-detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.]

- http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.]
- [48] Raes D. The ETo Calculator. Evapotranspiration from a Reference Surface. Reference Manual Version 3. 2[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- [49] Dijkshoorn K, Engelen V V, Huting J. Soil and landform properties for LADA partner countries[M]. Wageningen, the Netherlands: ISRIC-World Soil Information and FAO, 2008.
- [50] Portmann F T, Siebert S, Doll P. MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24: 1-24.
- [51] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴[DB/OL]. (2020-11-05) [2022-08-12]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/nds/tjnj/>. [Shaanxi Province Bureau of Statistics. Shaanxi Statistical Yearbook[DB/OL] (2020-11-05) [2022-08-12]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/nds/tjnj/>.]
- [52] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2001-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. [Department of Price, National Development and Reform Commission. China Energy Statistic Yearbook 2001-2019[M]. Beijing: China Statistic Press, 2020.]
- [53] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国地表水环境质量标准[EB/OL] (2002-06-01) [2022-11-06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Environmental Quality Standards for Surface Water of the People's Republic of China[EB/OL] (2002-06-01) [2022-11-06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml.]
- [54] Gao J, Zhuo L, Liu Y L, et al. Efficiency and sustainability of inter-provincial crop-related virtual water transfers in China[J]. Advances in Water Resources, 2020, DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103560.
- [55] 中华人民共和国水利部. 2010-2020 中国水利统计年鉴[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2010-2020 China Water Conservancy Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2020.]
- [56] 中华人民共和国农业部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案[N/OL]. (2015-02-17) [2022-11-06]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Action Plan for Zero Growth in Fertilizer Use by 2020[N/OL]. (2015-02-17) [2022-11-06]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827907.htm.]
- [57] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: A case study for the Yellow River basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18: 2219-2234.
- [58] ISO. ISO 14046: 2014 Environmental Management- Water Footprint- Principles, Requirements and Guidelines[R]. Switzerland: ISO, 2014.
- [59] Ji X X, Xie D, Zhuo L, et al. Water footprints, intra-national virtual water flows, and associated sustainability related to pork production and consumption: A case for China[J]. Water Resources Research, 2022, DOI: 10.1029/2021WR029809.

Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989–2019

YAN Chenjian¹, LI Meng¹, ZHUO La^{2,3}, YANG Xi¹, WU Pute^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] Shaanxi Province is an important grain, oil, and fruit production base in China, but most part of the province is located in the semi-arid zone. Limited water resources are the biggest constraint to the sustainable development of local economy and society. Quantitative evaluation of water consumption and water-saving potentials in crop production is crucial for water resource-adapted agricultural development and green and high-efficiency water-saving. [Methods] Based on the spatiotemporal evolution characteristics of the annual blue water footprint (irrigation water consumption) and green water footprint (effective precipitation consumption) of growing 10 major crops under irrigated and rainfed conditions in Shaanxi Province from 1989 to 2019, the engineering water-saving potential and real water-saving potential of crop production in typical years were deduced. [Results] The results show that: (1) The consumptive water footprint per yield of all crops in Shaanxi Province showed an overall downward trend in the 30-year study period, and the water footprint of individual crops had visible differences between cities. The provincial average unit consumptive water footprint of apple production decreased by 91.3%; the difference of consumptive water footprint of wheat production between cities reached 3.41 m³/kg. At the same time, the grey water footprint of apple and rapeseed production showed an increasing trend. (2) The total consumptive water footprint of crop production was 16.055 billion m³/a in 2019, slightly decreased by 1.8% from 1989. Corn, wheat, and apple production contributed more than 80% of the total consumptive water footprint of provincial crop production. (3) The water-saving potential, blue water saving potential, and green water saving potential of crop production in Shaanxi Province were 62%, 68%, and 49%, respectively. [Conclusion] There is a great potential of agricultural water-saving in Shaanxi Province. There are two preliminary suggestions: (1) Combining technology and management measures to accelerate agricultural water-saving and efficiency; (2) Accelerate scientific and accurate fertilization to reduce environmental pressure.

Key words: water footprint of crop production; spatiotemporal evolution; water footprint benchmark; water-saving potential; Shaanxi Province