

山西省作物生产蓝绿水足迹核算及影响因素分析

冯变变, 刘小芳, 赵勇钢, 李 轲

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘 要:基于水足迹理论,对山西省 2005—2014 年 11 个市主要粮食作物生产蓝水和绿水足迹进行了量化,并结合农业与气候数据分析了其时空变异及气候影响因素。结果表明:近 10 年山西省各地区粮食作物生产水足迹呈下降趋势,且蓝水足迹下降趋势较绿水足迹显著;全省综合作物生产蓝水足迹从 1.11 降到 0.64 m³/kg。不同作物间生产水足迹差异显著,大豆生产蓝绿水足迹均最高,分别为 2.74、2.11 m³/kg;前者是玉米生产蓝水足迹的 6.5 倍,后者是小麦生产绿水足迹的 5.1 倍。从蓝绿水构成来看,山西省绿水比例南多北少;其多年均值为 46%,具备提高绿水资源利用效率的空间。不同区域间作物生产蓝绿水足迹均表现出由北向南波动中下降的趋势,大同和吕梁地区水足迹较高。通径分析结果显示气候因子中的日照、气温和降雨是影响作物生产水足迹的主要影响因素。在山西省范围内,气候条件的时空差异是造成作物生产水足迹时空变异的主要原因,农业生产资料投入的影响较小。

关键词:水足迹; 蓝水; 绿水; 粮食作物; 用水效率; 山西省

中图分类号:S271

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0200-06

Estimate of Blue and Green Water Footprint of Crop Production and Analysis of Its Influencing Factors in Shanxi Province

FENG Bianbian, LIU Xiaofang, ZHAO Yonggang, LI Ke

(College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: The green and blue water footprint (WFP) of major grain crops was quantified in 11 cities of Shanxi Province in the period 2005—2014 based on the theory of WFP. The spatiotemporal variations and influencing factors of the WFP were analyzed using meteorological and agricultural data. The results showed that the WFP of crop production declined in different regions of Shanxi Province over the past decade. The blue WFP decreased significantly compared with green WFP. The blue WFP of integrated crop production in Shanxi decreased from 1.11 m³/kg in 2005 to 0.64 m³/kg in 2014. There were the marked differences in the WFP among various crops, and the blue and green WFP of soybean ranked the highest, which were 2.74 m³/kg and 2.11 m³/kg, respectively. The former was 6.5 times of the blue WFP of corn, and the latter was 5.1 times of the green WFP of wheat. From the perspective of WFP composition, the proportion of green WFP in the south of Shanxi Province was higher than that in the north. The average proportion of green WFP in the total water consumption was 46%, showing great potential for improving green water use efficiency in this province. Generally, both the blue and green WFP of crops fluctuated with the downward trend from north to south in all 11 cities. Higher levels of WFP were observed in the Datong City and Lvliang. Path analysis showed that climate factors such as sunshine, temperature, and rainfall were the top three factors influencing the WFP of crops. In Shanxi Province, the spatiotemporal variations in the WFP of crop production were due to the spatiotemporal differences in climate conditions, while the input of agricultural production had less influence.

Keywords: water footprint; blue water; green water; grain crop; water use efficiency; Shanxi Province

随着人口增长和社会经济的高速发展,我国面临的水资源短缺压力也愈发突出。农业作为我国的用

水大户,据统计 2014 年用水量已占到全国总用水量 63.5%^[1],合理调整农业生产过程中的用水结构、提

高单位水资源的农作物产量是实现我国水安全和粮食安全的重要途径。水足迹理论以虚拟水理论为基础,从生产和消费角度揭示人类对水资源的真实需求和占用量,为水资源评价和管理提供了新的方向^[2],近几年已被广泛应用于农业水资源管理和节水农业研究中^[3-7]。

作物生产水足迹(Water footprint of crop production, WFP)作为农业用水的评价指标不仅能够表征农业生产过程中消耗的水资源总量,而且可以反映水资源的利用类型(绿水、蓝水)^[8]。蓝水是指地表水或地下水,即储存在淡水湖泊、河流和含水层中的水;绿水指来源于降水并通过作物蒸发蒸腾消耗掉的水^[9]。目前,对作物生产水足迹在不同时间序列中的动态变化以及在不同空间尺度上的分布特征已进行了一定的研究。吴普特等^[3]以省级行政区为计算单元,量化了2010年中国31个省级行政区的粮食生产水足迹与区域虚拟水流动情况。操信春等^[4]量化了中国灌区粮食生产水足迹并对其用水效率进行了评价。史利洁等^[5]量化了2000—2012年陕西省主要作物生产水足迹与水资源压力指数的时空分异特征,此外还有众多学者就不同尺度区域作物生产水足迹进行了量化^[6-7]。以上研究推动了水足迹理论的完善和进一步发展。然而,目前的研究多集中在较大尺度区域作物生产水足迹的量化,对于省级以下区域尺度的研究不多,并且对于造成水足迹差异影响因素的分析还相对较少。本研究基于水足迹理论,对2005—2014年山西省11个地级市6种主要粮食作物生产蓝水足迹和绿水足迹进行量化,分析其时空演变特征并采用通径分析方法对其影响因素进行分析,以期为区域水资源的高效利用和管理以及种植结构优化提供一定的理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

山西省位于黄土高原东翼,地势表现为东北高、西南低,地貌复杂多样,山多川少,山地丘陵面积占全省总面积的80%以上。气候属于温带大陆性气候,但南北差异较大,气温从北向南递增,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。全年日照时数为2 200~2 900 h,年蒸发量为1 500~2 300 mm,无霜期为120~220 d。年降雨量400~650 mm,由东南向西北递减,干旱缺水制约着山西省农业生产。

1.2 研究方法

1.2.1 作物生产水足迹计算 作物生产水足迹是指生产单位重量的作物所消耗的水资源,按照所消耗的

水资源类型可以分为蓝水足迹和绿水足迹,本研究中作物生产过程中水足迹的计算按照《水足迹评价手册》^[10]所提供的方法计算,其公式如下:

$$\begin{cases} \text{WFP} = \text{WFP}_g + \text{WFP}_b = 10\text{ET}_g/Y + 10\text{ET}_b/Y \\ \text{ET}_g = \min(\text{ET}_c, P_e) \\ \text{ET}_b = \max(0, \text{ET}_c - P_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中:WFP为作物生产水足迹(m^3/kg); WFP_g 为作物生产绿水足迹(m^3/kg); WFP_b 为作物生产蓝水足迹(m^3/kg); ET_g 为作物绿水蒸发蒸腾量(mm); ET_b 为作物蓝水蒸发蒸腾量(mm);10为单位转换系数; Y 为作物产量; ET_c 为作物蒸发蒸腾量(mm); ET_c 通过收集的气象数据结合CROPWAT 8.0软件求出; P_e 为作物生育期的有效降雨量(mm),可根据CROPWAT 8.0模型中内嵌的美国农业部土壤保护局(USDA SCS)有效降雨量公式进行计算^[11]:

$$P_e = \begin{cases} P(125 - 0.6P)/125 & P \leq (250/3)\text{mm} \\ 125/3 + 0.1P & P > (250/3)\text{mm} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_e 为作物生育期的旬有效降雨量(mm); P 为作物生育期旬降雨量(mm)。

综合作物生产水足迹(Water footprint of integrated crop production, IWFP)是将不同种作物生产水足迹对作物产量加权得到的综合各作物的生产水足迹,能够综合衡量区域农业生产的水资源利用状况,计算公式如下^[5]:

$$\text{IWFP}_j = \frac{\sum_i \text{WFP}_{i,j} \times P_{i,j}}{\sum_i P_{i,j}} \quad (3)$$

式中: IWFP_j 为区域 j (为山西省的11个地级市:大同、朔州、忻州、太原、吕梁、阳泉、晋中、长治、晋城、临汾、运城)的综合作物生产水足迹(m^3/kg); $\text{WFP}_{i,j}$ 为地区 j 作物 i (6种粮食作物:玉米、小麦、高粱、谷子、大豆、马铃薯)的生产水足迹(m^3/kg); $P_{i,j}$ 为区域 j 作物 i 的总产量(t)。

1.2.2 Manna-Kendall 趋势分析方法 Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,用来判断趋势的显著性,它无需样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算公式如下^[12-13]:设定时间序列 $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n, n \text{ 为序列长度})$,

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases}, S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

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

$$s(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (5)$$

式中:sgn 是符号函数;当给定显著性水平 $\alpha=5\%$ 后,若 $|Z| \leq Z_{1-\alpha}/2$,则接收原假设,即趋势不显著;若 $|Z| > Z_{1-\alpha}/2$,则拒绝原假设,即趋势显著;在计算结果满足上述二条件情况下,如果 Z 为正,则表明被检测序列具有上升趋势;若 Z 为负时,说明被检测序列趋势是下降的;当 Z 为 0 时,表明无显著趋势。

1.2.3 作物生产水足迹影响因素分析 各影响因素和作物生产水足迹关系的分析,采用 SPSS 17.0 软件进行 Pearson 相关分析,并在此基础上采用通径分析确定各因素对作物生产水足迹的影响。通径分析能够分析多个自变量与应变量之间的线性关系,是回归分析的拓展,可以处理较为复杂的变量关系^[14]。

1.3 数据及来源

气象数据包括 2005—2014 年山西省各地区逐月平均最高气温、月平均最低气温、月平均气温、平均风速、相对湿度、日照时数、降雨量,数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),缺失的气象数据通过反距离权重差值方法取得。作物系数和生育期参考《北方地区主要农作物用水灌溉定额》和联合国粮农组织(FAO)数据库。11 个市逐年的作物产量、单位面积产量、播种面积、化肥使用量和农业机械总动力等数据来源于山西省统计年鉴及各地区统计年鉴(2006—2015 年)。

2 结果与分析

2.1 山西省粮食作物生产蓝绿水足迹时间变化趋势

2005—2014 年山西省 6 种粮食作物生产消耗蓝水和绿水量总体上呈现下降趋势,这与作物单产的增加趋势相反(图 1)。6 种作物中玉米、大豆、马铃薯、谷子蓝水足迹下降趋势均达到显著(M-K 检验值均小于 -1.96),而绿水足迹中仅有谷子下降趋势达到显著,且绿水足迹变异系数均小于蓝水,表明作物蓝水足迹下降趋势和下降幅度均小于绿水足迹。此外,作物水足迹在作物间差异显著,6 种作物中大豆蓝水足迹和绿水足迹年均值皆最大为 2.74, 2.11 m^3/kg ,玉米和小麦作为山西省最主要的粮食作物拥有较低的水足迹,生产单位质量玉米所需蓝水资源最小为 0.42 m^3/kg ,小麦所需绿水资源最小为 0.41 m^3/kg 。

山西省 11 个市综合作物生产水足迹在研究时段内均呈下降趋势(图 2)。大同和吕梁的综合作物生产水足迹下降幅度和波动幅度均较大,2 个区域综合作物生产绿水足迹极差为 0.6 m^3/kg 左右,其余地区极差均小于 0.55 m^3/kg 。区域间综合作物生产蓝水

足迹下降幅度和波动幅度均大于绿水足迹。大同和吕梁综合作物生产蓝水足迹的极差为 1.9, 1.41 m^3/kg ,长治和晋城综合作物生产蓝水足迹呈现相对平稳的下降趋势,极差均小于 0.3 m^3/kg ,其他区域为 0.5 m^3/kg 左右,年际波动相对较大。区域间综合作物整体表现为作物水足迹越高的地区有越大的年际波动。

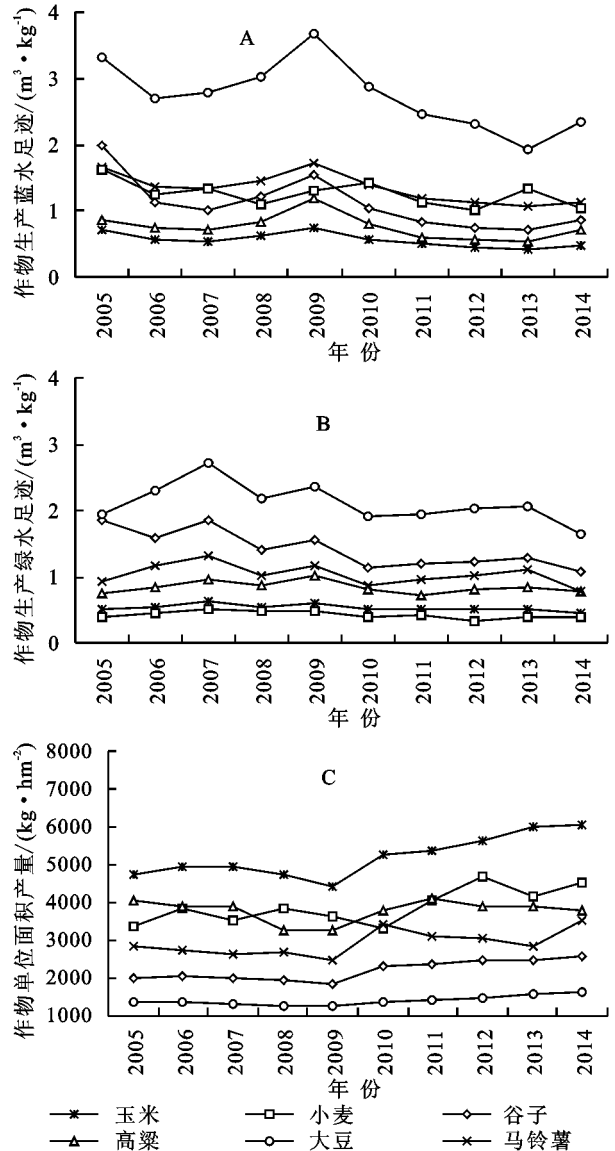
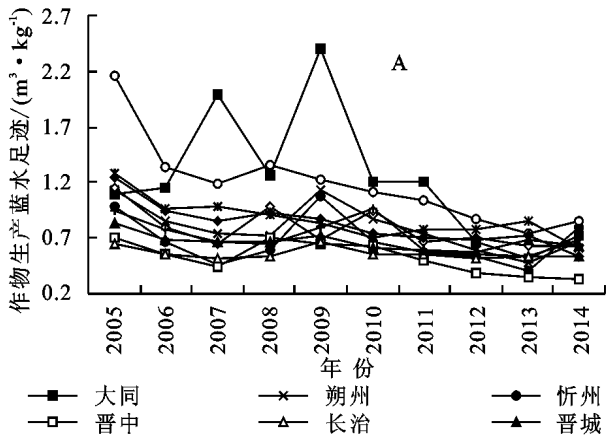


图 1 2005—2014 年山西省粮食作物生产蓝绿水足迹及单位面积产量时间演变

2.2 山西省粮食作物生产蓝绿水足迹空间分布

山西省粮食作物生产蓝水足迹和绿水足迹在区域间差异显著,整体表现为由北向南波动中下降的趋势(图 3)。大同的玉米、高粱、大豆生产蓝水足迹均为全省最高,分别为 1.04, 1.71, 5.22 m^3/kg ,小麦和谷子生产蓝水足迹为吕梁市最高,分别为 1.67, 2.24 m^3/kg 。同样,吕梁市玉米和谷子生产绿水足迹也达到全省最高,分别为 0.65, 2.64 m^3/kg 。晋南地区(包括临汾、运城、晋城市)和晋中市作物生产蓝水足

迹和绿水足迹都比较低。此外,作物间的空间差异水平也有所不同。大豆、谷子和马铃薯生产水足迹波动范围较广,谷子蓝绿水足迹极差均大于 $1.7\text{ m}^3/\text{kg}$,大豆蓝绿水足迹极差分别为 $3.68, 1.97\text{ m}^3/\text{kg}$,空间



差异显著。马铃薯生产绿水足迹和蓝水足迹极差分别为 $1.1, 1.6\text{ m}^3/\text{kg}$,空间差异也较大。而小麦和玉米作为山西省最主要的粮食作物,生产水足迹较低,绿水足迹极差最低为 $0.2\text{ m}^3/\text{kg}$ 。

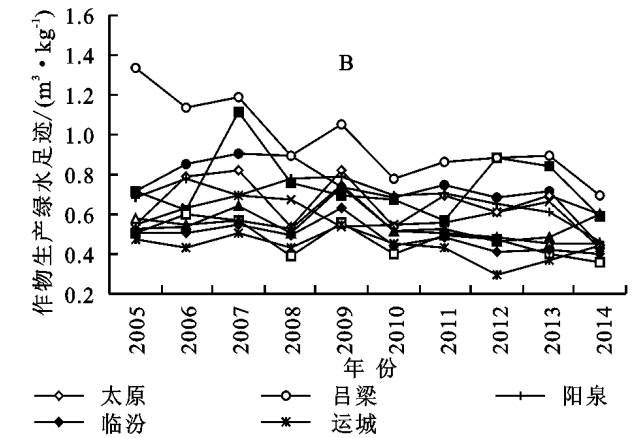


图2 山西省各地区综合作物生产蓝水和绿水足迹时间演变

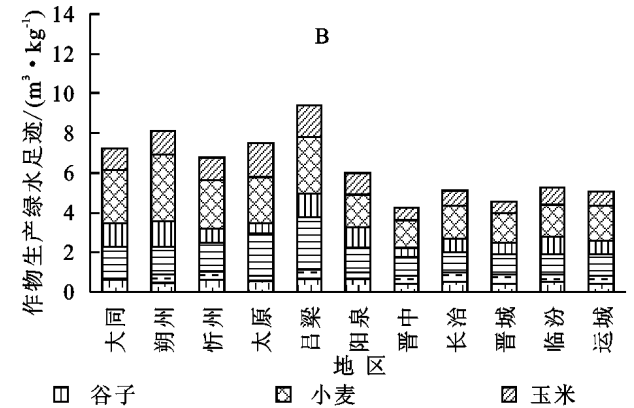
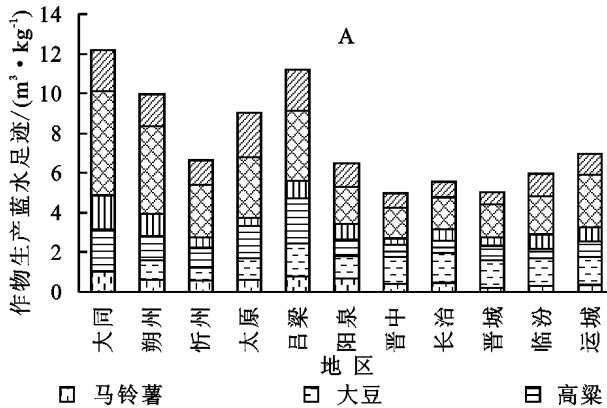


图3 山西省主要粮食作物生产蓝水和绿水足迹空间分布

2.3 作物生产水足迹组成

山西省农业生产用水组成在区域间存在较大差异(表1),晋南地区(包括晋城、临汾、运城市)粮食作物蓝水消耗占比52%低于晋北地区(包括大同、朔州、忻州市)的56%,晋北地区中忻州市各作物蓝水消耗比例明显低于其他地区。作物水足迹组成在作物间差异显著(表1),马铃薯、大豆生产水足迹组成具有相似的空间分布,生产消耗均以蓝水为主,占比均值为55%和56%。玉米蓝绿水消耗基本持平,蓝水利用率由北向南逐渐减小。谷子和高粱生产消耗用水除大同市蓝水消耗较多外,其他地区均小于50%。小麦绿水利用率较低,水资源消耗以蓝水为主。

2.4 影响因素分析

为了进一步定性分析山西省气候变化和农业生产要素投入对于作物生产水足迹的影响,选取气候因子(降雨量 X_1 ,平均风速 X_2 ,相对湿度 X_3 ,日照时数 X_4 ,平均气温 X_5)和生产要素(化肥使用量 X_6 和农业机械总动力 X_7)与综合作物生产水足迹进行相关分析。

表1 2005—2014年山西省11市粮食作物生产蓝水足迹比例

| 区域 | 玉米 | 小麦 | 谷子 | 高粱 | 大豆 | 马铃薯 |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 大同市 | 0.62 | — | 0.56 | 0.60 | 0.66 | 0.66 |
| 朔州市 | 0.58 | 0.69 | 0.46 | 0.48 | 0.57 | 0.57 |
| 忻州市 | 0.47 | 0.65 | 0.39 | 0.42 | 0.52 | 0.53 |
| 太原市 | 0.54 | 0.78 | 0.43 | 0.45 | 0.57 | 0.57 |
| 吕梁市 | 0.54 | 0.77 | 0.46 | 0.44 | 0.56 | 0.56 |
| 阳泉市 | 0.52 | 0.76 | 0.40 | 0.42 | 0.53 | 0.53 |
| 晋中市 | 0.50 | 0.77 | 0.40 | 0.41 | 0.53 | 0.53 |
| 长治市 | 0.49 | 0.74 | 0.39 | 0.46 | 0.49 | 0.50 |
| 晋城市 | 0.34 | 0.76 | 0.41 | 0.42 | 0.52 | 0.52 |
| 临汾市 | 0.37 | 0.78 | 0.32 | 0.45 | 0.55 | 0.56 |
| 运城市 | 0.47 | 0.77 | 0.42 | 0.51 | 0.60 | 0.60 |

据表2可知,气象因子中降雨量、相对湿度、平均气温与综合作物水足迹、综合作物蓝水足迹均呈负相关,且相关性达到显著。平均风速、日照与综合作物生产水足迹呈正相关关系,且与日照达到显著相关。而相对湿度、日照、平均气温与综合作物绿水足迹也达到显著相关。生产投入因子中化肥使用量、农业机械总动力与综合作物总水足迹和蓝水足迹呈显著负相关。在具体作

物中,气候因子、生产要素投入与玉米水足迹的相关性较强,除风速外其他因子均与水足迹达到显著相关。高

粱、大豆、马铃薯水足迹与降雨量呈显著负相关关系。高粱水足迹和日照呈显著正相关关系。

表 2 作物生产水足迹与影响因素的相关分析

| 作物 | 水足迹 | 降雨量/ mm | 平均风速/ (m·s ⁻¹) | 相对 湿度/% | 日照/ h | 平均 气温/℃ | 化肥使用量/ 10 ⁴ kg | 农机总动力/ 10 ⁴ kW |
|------|------------------|------------|-------------------------------|------------|----------|------------|------------------------------|------------------------------|
| 综合作物 | WFP | -0.378** | 0.137 | -0.297** | 0.445** | -0.369** | -0.223* | -0.247** |
| | WFP _g | -0.002 | -0.014 | -0.286** | 0.341** | -0.430** | -0.447** | -0.470** |
| | WFP _b | -0.512** | 0.191* | -0.236* | 0.412** | -0.255** | -0.057 | -0.074 |
| 玉米 | WFP | -0.442** | 0.059 | -0.520** | 0.556** | -0.630** | -0.434** | -0.502** |
| | WFP _g | -0.013 | 0.148 | 0.056 | -0.059 | 0.032 | -0.031 | -0.092 |
| | WFP _b | -0.314** | 0.072 | -0.055 | 0.100 | -0.079 | -0.087 | -0.170 |
| 小麦 | WFP | 0.032 | 0.000 | -0.159 | 0.189 | -0.088 | -0.002 | -0.001 |
| | WFP _g | -0.035 | 0.138 | -0.106 | 0.117 | -0.107 | -0.049 | -0.052 |
| | WFP _b | 0.042 | -0.038 | -0.151 | 0.184 | -0.073 | 0.007 | 0.010 |
| 高粱 | WFP | -0.412** | 0.041 | -0.154 | 0.192* | -0.051 | -0.019 | -0.074 |
| | WFP _g | -0.376** | 0.057 | -0.155 | 0.137 | -0.027 | 0.011 | -0.055 |
| | WFP _b | -0.387** | 0.027 | -0.135 | 0.201* | -0.058 | -0.034 | -0.076 |
| 谷子 | WFP | -0.158 | 0.007 | 0.064 | -0.032 | 0.038 | 0.016 | -0.094 |
| | WFP _g | -0.070 | 0.018 | 0.116 | -0.107 | 0.079 | 0.053 | -0.052 |
| | WFP _b | -0.0215* | -0.004 | 0.015 | 0.031 | 0.001 | -0.016 | -0.120 |
| 大豆 | WFP | -0.384** | 0.073 | 0.041 | 0.08 | 0.028 | -0.073 | -0.155 |
| | WFP _g | -0.290** | 0.128 | 0.114 | -0.006 | 0.060 | -0.043 | -0.137 |
| | WFP _b | -0.382** | 0.036 | 0.013 | 0.108 | 0.017 | -0.078 | -0.151 |
| 马铃薯 | WFP | -0.237* | 0.016 | -0.001 | 0.003 | -0.029 | -0.081 | -0.160 |
| | WFP _g | -0.110 | 0.044 | 0.051 | -0.066 | 0.001 | -0.046 | -0.114 |
| | WFP _b | -0.282** | -0.003 | -0.033 | 0.045 | -0.043 | -0.092 | -0.166 |

注: * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$), WFP, WFP_g 和 WFP_b 分别代表作物生产总水足迹、绿水足迹和蓝水足迹。

将综合作物生产水足迹与各影响因素进行通径分析(表 3)。从各因素对于综合作物生产水足迹的总体影响来看,日照对于综合作物生产水足迹的影响最大,其次是平均气温、降水量、平均湿度、农业机械

总动力、化肥使用量、风速。其中风速和日照时数对综合作物生产水足迹的作用为正作用,其余因素皆为负作用,与相关分析结果相一致。降雨量和日照对综合作物生产水足迹的直接影响较大。

表 3 山西省作物生产水足迹影响因素通径分析

| 影响 因素 | 直接通径 | 间接通径系数 | | | | | | | 总影响 |
|----------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|
| | 系数 | X ₁ —WF | X ₂ —WF | X ₃ —WF | X ₄ —WF | X ₅ —WF | X ₆ —WF | X ₇ —WF | |
| X ₁ | -0.235 | | -0.004 | -0.032 | -0.143 | -0.030 | -0.008 | -0.012 | -0.464 |
| X ₂ | 0.078 | 0.013 | | -0.004 | 0.047 | 0.008 | -0.002 | -0.001 | 0.139 |
| X ₃ | -0.073 | -0.103 | 0.004 | | -0.139 | -0.054 | -0.012 | -0.016 | -0.393 |
| X ₄ | 0.349 | 0.096 | 0.010 | 0.029 | | 0.052 | 0.017 | 0.020 | 0.573 |
| X ₅ | -0.077 | -0.092 | -0.008 | -0.051 | -0.237 | | -0.022 | -0.027 | -0.514 |
| X ₆ | -0.042 | -0.045 | 0.005 | -0.020 | -0.144 | -0.040 | | -0.043 | -0.329 |
| X ₇ | -0.047 | -0.058 | 0.002 | -0.025 | -0.150 | -0.045 | -0.039 | | -0.362 |

注: WF 为综合作物生产水足迹。X₁—X₇ 分别为降雨量、平均风速、平均湿度、日照、平均气温、农用化肥总使用量、农机总动力。

3 讨论与结论

山西省作物生产水足迹在研究时段内均呈现下降趋势,且作物蓝水足迹年际波动和下降趋势较绿水足迹明显,表明灌溉水资源利用效率在逐年提高。在空间上作物生产水足迹呈现出由南向北增长的趋势,这主要与区域作物生产的气候条件、用水效率、农业

生产技术和管理等因素的差异有关。孙世坤等^[15]将中国不同区域小麦生产水足迹与区域降水量和作物单产进行对比得出三者 在空间分布上的一致性。山西省降水量南北差异显著,从东南向西北递减,晋南地区降雨丰富,水利设施便利,更能满足作物生长发育,且作物单产较高,其中晋南地区大豆、马铃薯单产达到晋北地区的 2 倍^[16-17]。小麦生产水足迹与其他

作物呈现不同的空间分布主要是因为晋北地区气候条件和土壤条件与其他地区有较大差异,不同于晋南和晋中部地区种植冬小麦,晋北部地区种植春小麦,生育期不同,降水量差异也较大,生产单位质量小麦所需水分也有不同^[18]。

山西省农业生产用水组成在区域间和作物间差异显著,区域间蓝水比例由南向北逐渐增大,作物间小麦绿水足迹比例较低。作物生产绿水足迹来源于降雨,相比较蓝水(灌溉水)来说,具有较低的机会成本,且绿水在维持陆地生态系统和雨养农业粮食安全方面具有重要意义^[19],因此分析作物水足迹组成对于明晰区域作物生产过程中水资源利用类型,改善用水结构方面具有重要意义。水足迹组成和降雨关系密切,晋南地区气候湿润,降水充沛,这是晋南地区蓝水足迹比例较小的主要原因。同处晋北的大同和忻州,研究时段内大同年平均降水量为 384 mm,而忻州地区年平均降水量约为 433 mm,降水相对丰富是忻州地区绿水足迹比例高于大同地区的主要原因。作物对于绿水资源的利用,受当地的降水量、降水时间与作物生育期吻合度影响。山西省各市降雨集中在 6—8 月,与玉米、高粱、谷子等作物生育期比较吻合,这是这类作物绿水比例高于小麦的主要原因。

归因分析结果显示区域农业生产水平和气候因素都对作物生产水足迹产生影响,其中气候因素中日照和降雨是造成水足迹差异的最直接因素。分析原因主要为:日照直接影响作物光合作用,从而影响作物生长发育和产量,降雨量直接影响作物生长过程中的绿水消耗^[15]。日照时数通过平均气温对作物生产水足迹的间接作用较大,降水量除了直接影响外,主要通过相对湿度对作物生产水足迹起作用。风速主要通过影响作物冠层的水汽扩散速率进而影响作物生产水足迹^[20]。在农业生产资料方面,已有研究表明化肥和农机总动力可大大提高农业生产力,促进作物产量提高^[21]。

结合作物生产水足迹内涵及其影响因素来看,控制和减缓作物水足迹增长的途径有:(1)调整种植业结构,扩大生产水足迹比较优势区作物的播种面积,降低缺乏生产水足迹比较优势作物的播种面积,并通过虚拟水战略方式进口高耗水作物^[22];(2)增加农业生产投入,加强农业机械化,提高作物单位面积产量;(3)加强节水技术的应用和推广,提高降雨和灌溉水利用率。此外,化肥虽然是重要的农业生产投入要素,在提高作物单产方面具有重要作用,但是过度使用化肥会造成土壤肥力下降和农业面源污染^[23],同时随着化肥和农业机械动力投入的增加其边际效应逐渐减弱,对于作物增产方面的作用会逐渐降低,

因此,提高水资源利用效率是降低水足迹的一项综合性的技术措施。

本文以地级市为计算单元研究山西省近 10 a 的 6 种粮食作物生产蓝水和绿水足迹,尺度较为精细,时间序列较长,作物种类较全,更能综合反映山西省农业生产的用水效率,但是受限于数据的制约,本文未对灰水足迹进行量化。此外,在对造成作物生产水足迹差异影响因素分析时仅考虑了气候因子和农业生产资料的影响,而未对人口、生产规模、农业技术和经济发展等因素进行分析,阐明这些因素对作物生产水足迹的影响大小及其作用机制可为降低作物生产水足迹提供较为全面的思路。这些都需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2014[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [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): 3232-3237.
- [3] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2010 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [4] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(11): 1826-1835.
- [5] 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.
- [6] Sun S K, Wu P T, Wang Y B, et al. Temporal variability of water footprint for maize production: The case of Beijing from 1978 to 2008 [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(7): 2447-2463.
- [7] 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.
- [8] Siebert S, Döll P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3/4): 198-217.
- [9] 戚瑞,耿涌,朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 486-495.
- [10] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual-Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [11] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1-8.
- [12] 章诞武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490-496.

- 202,315.
- [23] Lu P, Laurent U, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004,46(6):631-646.
- [24] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987,3(4):309-320.
- [25] Coupel-Ledru A, Lebon E, Christophe A, et al. Reduced nighttime transpiration is a relevant breeding target for high water-use efficiency in grapevine[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016,113(32):8963.
- [26] 王进鑫,黄宝龙,王明春,等. 侧柏幼树不同生长阶段对水分的敏感性与蒸腾效率[J]. *生态学报*,2005,25(4):711-718.
- [27] Ma L H, Wu P T, Wang Y K. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Plant Soil*, 2012,354:57-68.
- [28] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,402(3):388-400.
- [29] Roccuzzo G, Francisco J. Villalobos, et al. Effects of water deficits on whole tree water use efficiency of orange[J]. *Agricultural Water Management*, 2014,140(3):61-68.
- [30] Link P, Simonin K, Maness H, et al. Species differences in the seasonality of evergreen tree transpiration in a Mediterranean climate: Analysis of multiyear, half-hourly sap flow observations [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(3):1869-1894.
- [31] Namirembe S, Brook R M, Chin K O. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya[J]. *Agroforestry Systems*, 2009,75(3):197-210.
- [32] 赵现华. 修剪对葡萄液流和光合同化物运输分配特性的扰动[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [33] 桑玉强,郭芳,张劲松,等. 毛乌素沙地新疆杨蒸腾变化规律及其影响因素[J]. *林业科学*,2009,45(9):66-71.
- [34] 姚勇哲,李建明,张荣,等. 温室番茄蒸腾量与其影响因素的相关分析及模型模拟[J]. *应用生态学报*,2012,23(7):1869-1874.
- [35] 高照全,张显川,王小伟. 桃树冠层蒸腾动态的数学模拟[J]. *生态学报*,2006,26(2):489-495.
- [36] Jackson N A, Wallace J S, Ong C K. Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya[J]. *Forest Ecology & Management*, 2000,126(2):133-148.
- [37] Jiang W Y, Yang S L, Yang X X, et al. Negative impacts of afforestation and economic forestry on the Chinese Loess Plateau and proposed solutions[J]. *Quaternary International*, 2015,399(5):165-173.

~~~~~

(上接第 205 页)

- [13] 张淑杰,张玉书,隋东,等. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J]. *自然资源学报*,2010,25(10):1750-1761.
- [14] 蔡甲冰,刘钰,许迪,等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. *水利学报*,2008,39(1):83-90.
- [15] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. *农业工程学报*,2015,31(13):142-148.
- [16] 赵乾坤. 山西省水土保持功能分区及生态脆弱性评价[D]. 山东泰安:山东农业大学,2014.
- [17] 朱晓磊,辛存林,卢李朋,等. 山西省粮食生产的时空变化和驱动因子分析[J]. *中国农学通报*,2014,30(8):82-88.
- [18] 张立生,温辉芹,程天灵,等. 山西省小麦生态区划研究[J]. *中国生态农业学报*,2010,18(2):410-415.
- [19] Rockstr M J, Falkenmark M, Karlberg L, et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):142-143.
- [20] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. *农业工程学报*,2008,24(5):1-5.
- [21] 马少先. 农业机械在现代农业生产中的地位与作用探析[J]. *北京农业*,2012(3):172-173.
- [22] Shi J, Liu J, Pinter L. Recent evolution of China's virtual water trade: analysis of selected crops and considerations for policy [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2014,18(4):1349-1357.
- [23] Ruttan V W. The transition to agricultural sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999,96(11):5960-5967.