

淮河流域主要农作物水足迹时空演变及影响因素分析

封琼¹, 毕忠飞², 刘俊¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 德清县水利水电工程质量安全中心, 浙江德清 313200)

摘要: 探讨淮河流域主要农作物水足迹, 可以为地区农业用水结构及改善水资源短缺问题提供理论依据。以淮河流域5个省份主要农作物为研究对象, 计算分析了2000–2017年小麦、稻谷、玉米、大豆、油料的蓝、绿、灰水足迹时空变化特征, 并采用通径分析方法探究影响农作物生产水足迹的因素。结果表明: 大豆的水足迹最大, 水足迹大小与作物单位面积产量呈负相关; 年际变化方面, 小麦、稻谷、玉米、油料总水足迹整体呈减小趋势, 大豆总水足迹表现出波动增加的趋势; 空间分布方面, 安徽、河南省的总水足迹居于前位, 且水足迹的空间分布存在一定的聚集性, 总体上中间高四周低; 此外, 对淮河流域农作物水足迹影响最大的因素是氮肥施用量、平均气温和年降雨量。

关键词: 生产水足迹; 蓝水足迹; 绿水足迹; 灰水足迹; 水足迹时空分布; 农作物; 通径分析; 淮河流域
中图分类号: S274; TV93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2022)06-0213-07

Spatial and temporal evolution of water footprints of main crops in Huaihe River Basin and analysis of influencing factors

FENG Qiong¹, BI Zhongfei², LIU Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Deqing Water Resources and Hydropower Center, Deqing 313200, China)

Abstract: The water footprints of main crops in Huaihe River Basin were discussed in order to provide a theoretical basis for the improvement of regional agricultural water use structure and water shortage. Taking the main crops in the five provinces of the Huaihe River Basin as the research objects, the spatial and temporal changes of the blue, green and gray water footprints of wheat, rice, maize, soybean and oil plants from 2000 to 2017 were calculated and analyzed, and the influencing factors of crop water footprints were explored using path analysis. The results show that the soybean had the largest annual average water footprint, and crop water footprints were negatively correlated with the yield per unit. In terms of inter-annual variability, the total water footprint of wheat, rice, maize, and oil plants generally showed a decreasing trend, whereas that of soybean showed a trend of fluctuated increase. As to the spatial distribution, the total water footprints in Anhui Province and Henan Province were the largest, the spatial distribution of the water footprint showed a certain degree of aggregation, which was generally high in the middle and low in the surrounding areas. In addition, the factors that had the greatest impact on the water footprint of crops in the Huai River Basin were the application amount of nitrogen fertilizers, average temperature and annual rainfall.

Key words: water footprint; blue water footprint; green water footprint; gray water footprint; spatial and temporal of water footprint; crop; path analysis; Huaihe River Basin

1 研究背景

农作物生产水足迹表示农作物的生产过程中所耗用的广义水资源量^[1], 已被广泛应用于农业自然

资源评价中^[2-3]。Hoekstra等^[4]最先提出了水足迹的概念, 并把水足迹分为了蓝(灌溉耗水)、绿(降雨耗水)、灰(稀释污染用水)3类水足迹^[5]。近年来针对农作物水足迹的研究迅速发展, 研究主要集中在

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-07-21

作者简介: 封琼(1998-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, 城市防洪与排涝。

通讯作者: 刘俊(1968-), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文水资源, 城市水资源优化配置。

在水足迹量化和驱动力分析等方面。

在农作物生产水足迹量化方面,多以国家、省份、流域为研究单元,作物种类多集中在玉米、小麦、大豆等主要农作物,水足迹组成方面主要以计算蓝、绿水足迹为主,对灰水足迹的量化研究较少,如高海燕等^[6]、王芳芳等^[7]、李杨等^[8]、冯兴兴等^[9]、金谦等^[10]分别量化计算了宁夏、浙江、中部 5 省、辽宁、新疆等省(自治区)的部分农作物蓝、绿水足迹,分析了各区域不同作物的水足迹年际变化及空间分布特点。在影响因素分析方面,目前的研究方法主要有主成分分析法^[11-12]、LMDI 模型^[13-15]、系统动力学法^[16]、通径分析法^[17-19]等,主要分析各影响因子对水足迹的影响程度,为农作物种植结构和农业水资源利用等提供理论参考,如贾浩等^[12]利用主成分分析法发现有效灌溉面积比例、耕地复种指数和农村人口是与农业水足迹关联度最高的 3 个驱动因子;Zeng 等^[15]利用 LMDI 模型探究了影响长江流域各省农业水足迹的驱动因素,发现经济水平是驱动农业水足迹的主要因素;韩宇平等^[19]采用结构方程模型法对人民胜利渠灌区小麦水足迹进行影响因素分析,发现化肥使用折纯量、农业机械总动力和有效降水为冬小麦蓝、绿水足迹的主要影响因素。

淮河流域是我国重要的农业生产地区,部分区域存在水资源供需矛盾,水资源压力日益增加^[20],减少作物种植用水量是缓解需水量与可利用水资源之间矛盾的有效途径,而前人对淮河流域农作物水足迹的研究较少。因此,本文旨在合理量化农作物蓝、绿、灰水足迹,探究影响农作物生产用水的驱动因素,为淮河流域各区域农业生产及水资源利用提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

淮河流域位于我国东部,地跨河南、安徽、江苏、山东及湖北 5 省,流域面积约为 $27 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国重要的农作物生产地区之一,农业是支撑该地区经济快速发展的支柱,本次淮河流域主要农作物水足迹研究范围见图 1。淮河流域处于我国南北分界线带,降水量南多北少,空间分布不均,且由于农业技术约束,农业面源污染已成为该地区的主要环境问题之一。流域内耕地面积约占 13%,主要农作物有小麦、大豆、玉米、油料、稻谷、棉花等。

2.2 数据来源

本次淮河流域主要农作物水足迹量化计算主要是基于流域内 5 省的气象数据和农业数据,2000 -

2017 年淮河流域各省逐日气象数据主要来自中国气象科学数据共享网,小麦、水稻、玉米、大豆和油料逐年的播种面积、产量和折纯施氮量来自淮河流域各省份 2000 - 2017 年的《统计年鉴》。

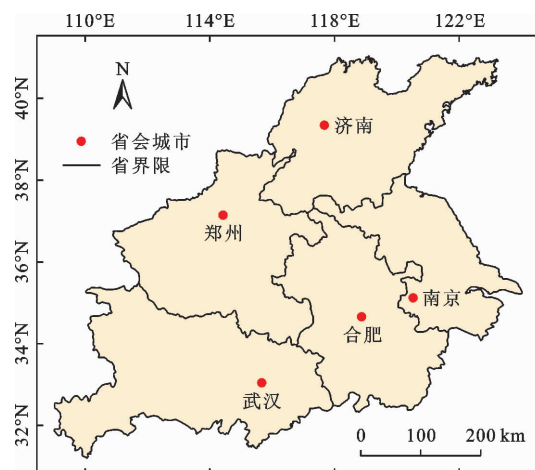


图 1 淮河流域主要农作物水足迹研究范围

2.3 研究方法

(1) 农作物水足迹量化计算。本次农作物生产水足迹 (crop water footprint, CWF) 采用 CROPWAT 软件的作物生产水足迹计算方法,主要基于田间作物蒸发蒸腾量与作物单位面积产量进行计算,计算方法如下:

$$CWF = CWF_{\text{blue}} + CWF_{\text{green}} + CWF_{\text{gray}} \quad (1)$$

CWF_{blue} 、 CWF_{green} 、 CWF_{gray} 分别为农作物的蓝色、绿色和灰色水足迹 (m^3/kg), 计算公式如下:

$$CWF_{\text{blue}} = CWU_{\text{blue}}/Y = 10ET_{\text{blue}}/Y \quad (2)$$

$$CWF_{\text{green}} = CWU_{\text{green}}/Y = 10ET_{\text{green}}/Y \quad (3)$$

$$CWF_{\text{gray}} = \frac{(\alpha \cdot AR)/(C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})}{Y} \quad (4)$$

式中: CWU_{blue} 、 CWU_{green} 分别为作物生长过程中消耗的蓝水、绿水量, m^3/hm^2 ; Y 为农作物的单位产量, kg/hm^2 ; 10 为转化系数,即将水深 (mm) 转化为单位面积水量 (m^3/hm^2); α 为氮肥淋失率; AR 为折纯后每公顷氮肥施用量, kg/hm^2 ; C_{max} 为污染物的水质标准质量浓度, kg/m^3 ; C_{nat} 为受纳水体的自然本底质量浓度, kg/m^3 ; ET_{blue} 、 ET_{green} 分别为蓝水、绿水的蒸发量, mm。

ET_{blue} 、 ET_{green} 的计算公式如下:

$$ET_{\text{green}} = \min(ET_c, P_e) \quad (5)$$

$$ET_{\text{blue}} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (6)$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (7)$$

式中: ET_c 为作物蒸发蒸腾量, mm; K_c 为农作物系数; ET_0 为参考蒸发量, mm, 根据气象软件结合 CROPWAT

软件求出; P_e 为作物生育期的有效降雨量, mm。

P_e 的计算公式如下:

$$P_e = \begin{cases} P \times (125 - 0.6P)/125 & (P \leq (250/3)\text{mm}) \\ 125/3 + 0.1P & (P > (250/3)\text{mm}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P 为作物生育期的降雨量, mm。

(2) 通径分析。本文旨在分析不同因素对淮河流域农作物水足迹的影响, 而通径分析可以分析多个自变量与因变量之间的关系, 是线性回归的延伸, 因此本次研究使用 SPSS 24.0 软件进行通径分析。

3 结果与分析

3.1 农作物水足迹时序演变分析

3.1.1 主要农作物水足迹时序变化 根据单位面

积产量和氮肥施用量, 利用 CROPWAT 软件计算 2000–2017 年淮河流域各主要农作物的蓝、绿、灰水足迹, 并分析其水足迹的年际变化特征, 2000–2017 年各主要农作物的单位面积产量如图 2 所示, 研究期内各主要农作物的各类水足迹时序变化如图 3 所示。

由图 2 可知, 大豆的单产最小, 最低产量 12.55 t/hm^2 出现在 2011 年, 稻谷的单产最大, 最高产量 41.53 t/hm^2 出现在 2015 年; 整体而言, 5 种农作物在 2000–2017 年间的单产排名为稻谷 > 小麦 > 玉米 > 油料 > 大豆, 其中大豆的单产随年际变化有降低的趋势, 小麦、玉米、油料的单产随年际变化有增加的趋势, 稻谷的单产在 2000–2009 年期间先上升后下降, 到 2009 年之后无较大变化。

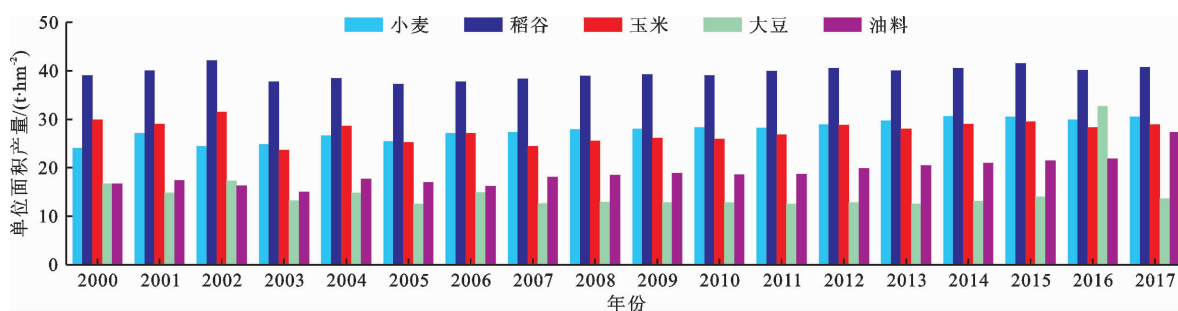


图2 2000–2017年淮河流域各主要农作物的单位面积产量

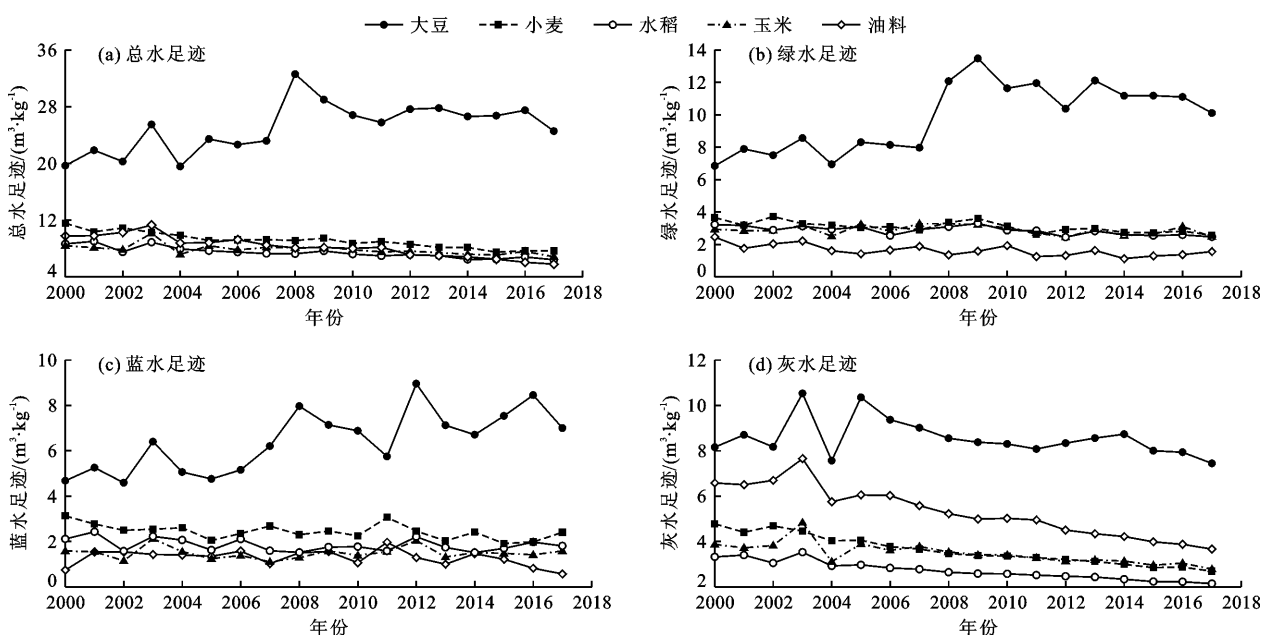


图3 2000–2017年淮河流域各主要农作物总水足迹及绿、蓝、灰水足迹年际变化特征

由图 3 可知, 研究期内淮河流域农作物中大豆的水足迹最大, 是其他 4 种作物的 2~3 倍; 研究期间大豆的总水足迹表现为年际波动上升, 在 2008 年达到了峰值 $32.00 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。小麦、稻谷、玉米、油料的

总水足迹表现为逐年下降, 其中油料的总水足迹下降幅度最大, 由 2000 年的 $9.77 \text{ m}^3/\text{kg}$ 下降到了 2017 年的 $5.79 \text{ m}^3/\text{kg}$, 降幅达 40.74%。结合图 1 农作物单位面积产量发现, 农作物水足迹的增加和

减少与其单位面积产量呈负相关,即农作物单位产量的增加可以有效减少其水足迹。

在淮河流域 5 种主要农作物中,大豆的绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹值均为最大,从研究期内年际变化方面看,大豆的绿、蓝水足迹总体上表现出波动增长的态势,其中绿水足迹在 2009 年达到峰值 13.48 m³/kg,平均增幅约为 43.34%;蓝水足迹在 2012 年达到峰值 8.96 m³/kg,平均增幅约为 37.39%;灰水足迹表现出波动减小的态势,平均降低幅度约为 8.71%。小麦、稻谷、玉米和油料的绿、蓝水足迹整体上呈波动下降趋势,灰水足迹的减小幅度较为明显,从 2000 年到 2017 年,小麦、稻谷、玉米、油料灰水足迹的下降幅度分别达 43.72%、35.54%、28.17%、44.37%。

通过分析各农作物各类水足迹的差异,可以看出作物生长过程中灌溉水的消耗量正在逐渐减少,主要与研究期间淮河流域各区域农业节水设施的普及、有效灌溉面积比例的提升、节水水平不断提高等有关;作物绿水足迹主要与区域降水量有关,降水量多的年份作物生长消耗的绿水足迹更多,对应的蓝水足迹少;作物灰水足迹整体呈下降趋势,说明近些年来淮河流域各区域对农作物种植中化肥的使用加强了控制,有利于改善农业面源污染的问题。

3.1.2 主要农作物水足迹结构分析 淮河流域主要农作物的水足迹组成如图 4 所示。

由图 4 可看出,淮河流域主要农作物水足迹组成中以绿、灰水足迹为主,蓝水足迹最少,说明淮河流域

大部分区域属于降水多的区域,天然降水可以解决大部分农作物用水。稻谷、小麦、大豆的水足迹组成最为相似,蓝水、绿水、灰水占比分别约为 25%~27%、34%~40%、34%~40%。蓝水足迹占比最大的是小麦,比值达 26.8%,占比最小的是油料,蓝水足迹仅占其总水足迹的 15.6%,这也与油料作物的主要种植区域集中在淮河流域的北部降水少的地区有关;绿水足迹占比最大的是大豆,比值达 39.7%,占比最小的是油料,绿水足迹仅占其总水足迹的 19.8%;灰水足迹占比最大的是油料,占其总水足迹的 64.6%,最小的是大豆,占其总水足迹的 34.5%。灰水足迹主要与农作物播种面积有关,播种面积越大,则施用氮肥量越多,用来稀释氮肥所耗用的水也越多。

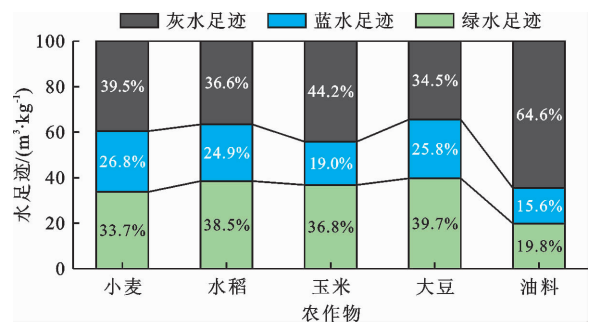


图 4 淮河流域主要农作物的水足迹组成

3.1.3 省域农作物水足迹分析 淮河流域各省水足迹为其省内小麦、稻谷、大豆、玉米、油料水足迹之和,各省份平均总水足迹、平均绿、蓝、灰水足迹占淮河流域水足迹总量之比及 2000-2017 年各省份各类水足迹的平均增长率见表 1。

表 1 淮河流域主要农作物水足迹时序变化主要参数

省份	总水足迹		绿水足迹		蓝水足迹		灰水足迹	
	占淮河流域总比值	平均增长率	占淮河流域总比值	平均增长率	占淮河流域总比值	平均增长率	占淮河流域总比值	平均增长率
山东	17.44	-16.40	11.92	1.26	22.49	-6.95	18.45	-13.63
安徽	25.20	-4.40	35.53	-0.67	15.21	8.53	23.68	-9.48
湖北	19.07	-2.90	23.05	4.48	21.63	-2.58	14.29	-10.46
江苏	14.97	-6.30	12.32	1.49	13.11	-1.46	18.25	-9.36
河南	23.32	0.70	17.18	7.02	27.56	-0.14	25.33	-6.13

由表 1 可知,各省份总水足迹占淮河流域比值最大的是安徽省,达 25.20%,最小的是江苏省,占 14.97%,说明农作物水足迹主要与作物产量有关,安徽省是农业大省,农作物产量高,农作物种植所需水资源量也高。流域内绿水足迹占比最大的是安徽省,比值为 35.53%,占比最小的是山东省,主要归

因于湖北、安徽省降雨量充沛而山东省位于淮河流域北部降雨量少。流域内蓝水足迹占比最大的是河南省,为 27.56%,占比最小的是湖北省,主要与各省份的自然气候和水资源量有关,河南和山东省年降水量少,农作物种植用水主要依赖灌溉水。流域内灰水足迹占比最大的是河南省,为 25.33%,占比

最小的是湖北省,主要与各省份农作物播种面积、农作物种植时施用的化肥量有关,施用氮肥越多,需要用来稀释污染物使其达到标准浓度的水资源越多。

山东、安徽、湖北及江苏省的总水足迹总体上表现为年际减小趋势,减小幅度最大的是山东省,平均减小率为 16.40%,说明淮河流域农业水资源利用率、农业节水水平整体在不断提高;山东、湖北、江苏、河南省的绿水足迹表现为年际增加趋势,增长幅度最大的是河南省,平均增长率为 7.02%,说明研究期内各省份的农作物种植对自然降雨的消耗量呈增长态势;安徽、湖北、河南、江苏省的蓝水足迹表现为年际增长趋势,增长幅度最大的是安徽省,平均增长率为 8.53%,说明各省份农业种植对灌溉水的消

耗仍在增加,一方面是因作物产量增加使灌溉水量增加,另一方面也说明农业水资源利用率还有待提高,未来可以推广农业节水技术,加大节水力度;淮河流域 5 省的灰水足迹均表现为年际减小趋势,其中减幅最大的是山东省,平均减小率达 13.63%,说明 5 省在农作物种植中都减少了对化肥的使用量。

3.2 农作物水足迹空间分布特征

农作物水足迹与区域农作物种类、气候条件、农业水平、播种面积等有关。为了探究淮河流域各省份农业水足迹的空间分布情况,本文计算了淮河流域各省份的主要农作物生产水足迹,采用 ArcGIS 软件绘制出的 2000–2017 年平均水足迹空间分布图如图 5 所示。

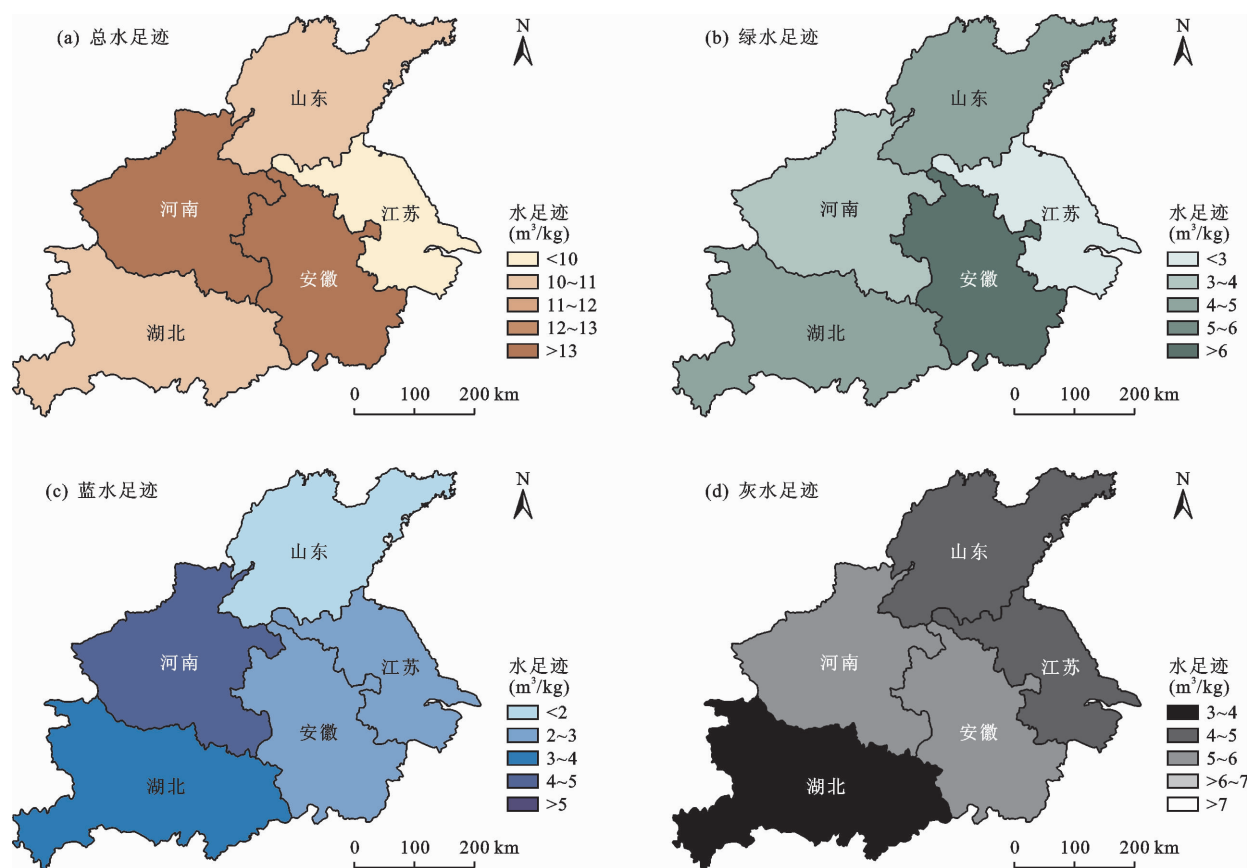


图5 2000–2017年淮河流域5省主要农作物平均水足迹空间分布

由图5可知,淮河流域5省中的安徽省和河南省农作物总水足迹最高,超过了 $13 \text{ m}^3/\text{kg}$,而江苏省最低,农作物总水足迹小于 $10 \text{ m}^3/\text{kg}$,总水足迹在空间上呈现中间高、四周低的分布特征;安徽省绿水足迹最高,超过了 $6 \text{ m}^3/\text{kg}$,江苏省绿水足迹最低,小于 $3 \text{ m}^3/\text{kg}$,绿水足迹在空间上呈现东南低、西北高的分布特征;河南省蓝水足迹值在淮河流域5省中最大,超过了 $5 \text{ m}^3/\text{kg}$,而山东省蓝水足迹值则为最小,不足 2

m^3/kg ,蓝水足迹在空间上呈现西南高、东北低的特征;湖北省和安徽省灰水足迹最高,在 $5 \sim 6 \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,湖北省灰水足迹值在5省中最小,小于 $4 \text{ m}^3/\text{kg}$,灰水足迹在空间上呈现中间高、四周低的分布特征。总体来看,农作物产量大的区域(如河南省和安徽省)则农作物水足迹大,江苏省农作物种植面积较小也是该省水足迹小于其他几省的主要原因;降水量丰富的区域农作物绿水足迹大,蓝水足迹小,农作物生长过

程中的大部分耗水可以依靠天然降水。

4 农作物水足迹影响因素分析

4.1 淮河流域农作物水足迹的正态性检验

对因变量农作物水足迹 y 实施 Kolmogorov - Smirnov (K - S) 检验,输出结果如表 2 所示。Shapiro - Wilk Test 统计量淮河流域农作物水足迹 y 的显著水平 $\text{Sig.} = 0.120 > 0.05$,说明农作物水足迹服从正态分布,满足进行通径分析的条件(表 2)。

4.2 通径分析

农作物生长期用水量会受到当地气候和生产条

件的影响。为了分析引起淮河流域各区域农作物生产水足迹产生差异的主要因素,本文选取平均气温(X_1)、平均湿度(X_2)、年降雨量(X_3)、平均风速(X_4)、平均日照时数(X_5)和氮肥施用量(X_6)6个参数进行通径分析,各影响因素之间的相关性分析结果见表 3,通径分析结果见表 4。

表 2 农作物水足迹正态性检验

K - S 检验			Shapiro - Wilk		
Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
0.176	18	0.144	0.860	18	0.120

表 3 淮河流域主要农作物水足迹各影响因子的相关系数

影响因子	氮肥使用量	年降雨量	平均日照时数	平均湿度	平均风速	平均气温
氮肥使用量	1.000	0.608	0.637	0.510	-0.735	0.614
年降雨量	0.608	1.000	0.471	0.279	-0.564	0.783
平均日照	0.637	0.471	1.000	0.516	-0.605	0.506
平均湿度	0.510	0.279	0.516	1.000	-0.307	0.413
平均风速	-0.735	-0.564	-0.605	-0.307	1.000	-0.481
平均气温	0.614	0.783	0.506	0.413	-0.481	1.000

表 4 淮河流域主要农作物水足迹影响因子通径分析

影响因子	直接通径系数	间接通径系数						总影响
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
X_1	0.326		0.135	0.255	-0.157	0.165	0.200	0.924
X_2	-0.224	-0.092		-0.062	0.069	-0.116	-0.114	-0.539
X_3	0.243	0.190	0.068		-0.137	0.114	0.148	0.626
X_4	0.136	-0.065	-0.042	-0.077		-0.082	-0.100	-0.230
X_5	0.084	0.043	0.043	0.040	-0.051		0.054	0.213
X_6	0.443	0.271	0.226	0.269	-0.325	0.282		1.166

分析表 4 中各影响因素的直接通径系数可知,淮河流域主要农作物水足迹与平均气温、年降雨量、平均风速、平均日照时数和氮肥施用量之间呈正相关,与平均湿度呈负相关。对淮河流域主要农作物水足迹直接影响最大的是氮肥施用量,直接通径系数为 0.443,然后是平均气温和年降雨量,直接通径系数依次为 0.326 和 0.243,而直接影响最小的是年平均风速,直接通径系数为 0.084。结合各影响因素通过影响其他因素对淮河流域主要农作物水足迹的间接影响可以发现,氮肥施用量依旧对水足迹的总影响最大,然后是平均气温和年降雨量,最小的是平均风速,与直接通径系数的结果一致。氮肥施用量主要是对作物产量和灰水足迹产生影响,湿度对农作物水足迹影响呈负相关,主要是影响作物生

育期的蒸散发,湿度越大则蒸散发越小,即农作物耗水越小。总体来看,对淮河流域农作物水足迹影响程度按大小排序为氮肥施用量 > 平均气温 > 年降雨量 > 平均湿度 > 平均风速 > 平均日照时数。

5 讨 论

对比前人研究结果^[5-10]发现,农作物水足迹中灰水足迹占比最大,绿水足迹次之,蓝水足迹占比最小,作物绿、蓝水足迹成果与前人研究成果相符,说明本次研究成果可靠。焦士兴等^[21]研究中得出河南省 2000 - 2017 年粮食作物水足迹大于经济作物水足迹,其中小麦和玉米水足迹居于首位,与本研究相符,差异在于大豆水足迹,主要原因是对水足迹的量化单位选取不同,焦士兴等^[21]采用的是 m^3 ,为研

究期内作物耗用的水量,本研究采用的水足迹单位为 m^3/kg ,为单位质量作物耗用的水量,因大豆产量最少计算到的水足迹较大;徐鹏程等^[22]研究表明,农作物单位面积产量越高,则生产单位质量农作物所需的水资源越少,与本研究结论一致;姜旭海等^[18]提出影响水足迹总量的因子中,生育期降水量和平均气温等气象因子对冬小麦水足迹的影响较大,与本文研究结论一致。

本次研究对淮河流域5种主要农作物水足迹进行了量化分析,较单个作物水足迹量化来说更为精细,但仍存在很多不足,如气象数据中站点的选择以及数据源之间的统计误差对水足迹量化会产生一定影响,建议优化淮河流域作物种植结构、控制高耗水中等价值作物的种植面积、减少化肥施用量以改善农业面源污染等问题。

6 结 论

(1)2000–2017年淮河流域的总水足迹整体呈减小态势,空间上水足迹大小呈中间高四周低,河南、山东省水足迹居于前位,对作物水足迹影响较大的因素为氮肥施用量、气温和降雨量。

(2)水足迹的大小与淮河流域各省份的农作物种植面积和单位面积产量有关,单产越大,则水足迹越小;在农业生产中,在保证经济效益的同时也要兼顾降低农业生产耗水量,可以通过提高农作物单位面积产量、调整种植结构、提升农业节水技术、合理使用化肥等来缓解农业水资源压力;

(3)本研究在水足迹量化方面考虑了灰水足迹,但是研究对象数量较少,对淮河流域其他农作物的水足迹没有进行量化,计算偏保守,不能完全真实地反映流域内农作物的实际耗水。

参考文献:

- [1] 冯变变. 基于水足迹的山西省农业水资源压力评价及其驱动力分析[D]. 太原:山西师范大学,2018.
- [2] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. 人民黄河,2021,43(11):87–91+96.
- [3] 刘静,余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. 水资源保护,2019,35(5):35–39.
- [4] HOEKSTRA A, HUNG P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[J]. Water Science and Technology, 2002, 49(11): 203–209.
- [5] 张旭东,吴迪,郝迪,等. 辽宁省玉米生产水足迹影响因素分析及空间聚类[J]. 节水灌溉,2019(12):82–87+101.
- [6] 高海燕,李王成,李晨,等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(3):110–118.
- [7] 王芳芳,赵春芳,余凤荣,等. 浙江省主要农作物水足迹时空特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(3):232–240.
- [8] 李杨,张容,顾强,等. 水足迹视角下中部5省主要粮食作物用水分析[J]. 人民黄河,2020,42(12):56–60.
- [9] 冯兴兴,王学风,阳辉,等. 辽宁省春玉米生产水足迹的时空变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2020,18(6):447–454.
- [10] 金谦,桂东伟,高霄鹏,等. 新疆主要农作物生产水足迹研究[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(6):243–249.
- [11] 李曼,何巧凤,刘焕才. 疏勒河流域中下游地区主要粮食作物生产水足迹变化及影响因素分析[J]. 节水灌溉,2020(9):94–99+105.
- [12] 贾浩,王振华,张金珠,等. 基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉水利用系数影响因素研究——以新疆建设兵团第十二师中型灌区为例[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(6):167–175+233.
- [13] 张瀚元,李璐骥,高坤. 东北地区农业水足迹的空间差异及其影响因素分析[J]. 湖北农业科学,2022,61(5):214–221.
- [14] 杨洋,丁镭,曾克峰. 基于 LMDI 模型的广西水足迹驱动力分析[J]. 国土资源科技管理,2017,34(2):20–29.
- [15] ZENG Wen, HE Junchen, QIU Yaliu, et al. Unravelling the temporal-spatial distribution of the agricultural water footprint in the Yangtze River Basin (YRB) of China[J]. Water,2021, 13(18): 2562.
- [16] 王倩,黄凯. 基于系统动力学的北京市农业水足迹模拟与影响因素分析[J]. 系统工程,2021,39(3):13–24.
- [17] 郭相平,高爽,吴梦洋,等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报,2018,49(5):295–302.
- [18] 姜旭海,李帆,史仓颀,等. 河南省冬小麦生产水足迹时空变化特征及影响因素分析[J]. 农业与技术,2020,40(18):1–5.
- [19] 韩宇平,张嘉晟,代小平,等. 灌区粮食生产水足迹的影响因素研究[J]. 人民黄河,2017,39(2):42–46.
- [20] 胡惠兰,周亮广. 淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(6):59–65.
- [21] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. 人民黄河,2021,43(11):87–91+96.
- [22] 徐鹏程,张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):232–237.