



淮河流域谷物生产水足迹及用水效率研究

江激宇, 刘嘉铭, 张士云

引用本文:

江激宇, 刘嘉铭, 张士云. 淮河流域谷物生产水足迹及用水效率研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 371–382.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0332>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地理探测器与Tobit模型在粤西地区粮食生产效率及影响因子分析中的比较应用

黄馨亿, 任向宁, 马涛, 胡月明, 李波, 张飞扬, 谢健文

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 818–828 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0482>

基于水-能源-粮食纽带关系的农业资源投入产出效率研究

周露明, 谢兴华, 朱珍德, 王麓翔, 吴俊宇

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 875–881 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0639>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>

基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算——以山东省高密地区为例

朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 邹晓霞

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 473–482 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0180>

集中连片贫困区耕地安全性评价及影响因素分析——以忻州市为例

高艳珍, 郑庆荣, 罗淑政, 李晓

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 919–927 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0535>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

江激宇, 刘嘉铭, 张士云. 淮河流域谷物生产水足迹及用水效率研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 371–382.

JIANG J Y, LIU J M, ZHANG S Y. Study on water footprint and water efficiency of cereal production in the Huai River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 371–382.



开放科学 OSID

淮河流域谷物生产水足迹及用水效率研究

江激宇, 刘嘉铭, 张士云*

(安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036)

摘要:为研究淮河流域水稻、小麦、玉米三大谷类粮食作物生产用水总量和用水效率,保障粮食安全,促进粮食生产可持续发展,本研究以淮河及沂-沭-泗水系的35个地级市为研究对象,基于2000—2019年谷物生产、水资源、气候等数据,采用Penman-Monteith模型、探索性空间数据分析(ESDA)模型、空间杜宾模型,对流域谷物生产水足迹强度进行测度以反映其用水效率,并分析其时空演变特征及影响因素。结果表明,2000—2019年淮河流域谷物生产水足迹逐渐趋于稳定,谷物生产水足迹强度整体下降82.86%。水足迹强度空间集聚显著,集聚状态逐渐稳定。社会经济条件、农业生产投入、农业生产条件、自然条件与资源禀赋对谷物生产水足迹强度影响显著。淮河流域谷物生产用水总量整体增加,用水效率总体不断提升。淮河流域谷物生产用水效率存在显著的空间差异,效率较高的区域为淮河干流下游及沂-沭-泗水系,效率较低的区域为淮河干流安徽段。农村经济发展水平、科技发展水平与有效灌溉面积等因素的提升能促进谷物生产用水效率的提升,城镇化水平、化肥施用量、年日照时长、年平均气温等因素的提升则会对其产生抑制作用,农村经济发展水平、城镇化水平、年平均气温等因素通过要素流动、技术转移等产生空间溢出效应。

关键词:淮河流域;水足迹;谷物生产;用水效率;时空演变

中图分类号:F326.11;S274

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2024)02-0371-12

doi: 10.13254/j.jare.2023.0332

Study on water footprint and water efficiency of cereal production in the Huai River basin

JIANG Jiyu, LIU Jiaming, ZHANG Shiyun*

(College of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: This study explores the total production water use and efficiency of three major cereal crops, namely rice, wheat, and corn, in the Huai River region and provides a reference for ensuring food security and promoting the sustainable development of food production. The study took 35 prefecture-level cities in the Huai River and Yishusi water systems as the study objects, and based on data on cereal production, water resources, and climate in sub-cities from 2000 to 2019, the Penman-Monteith model, Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) model and spatial Durbin model were used to measure the water footprint intensity of cereal production in the basin to reflect its water use efficiency and analyze its spatial and temporal evolution characteristics and influencing factors. The water footprint of cereal production in the Huai River basin tended to stabilize, and the overall water footprint intensity of cereal production decreased by 82.86%. The spatial clustering of the water footprint intensity was significant, and the clustering state gradually stabilized. Socio-economic conditions, agricultural production inputs, agricultural production conditions, natural conditions, and resource endowments had a significant impact on the water footprint intensity of cereal production. The study concludes that the total amount of water used for cereal production in the Huai River basin has increased as a whole, and water use efficiency has generally improved. There are significant spatial differences in the water use efficiency of cereal production in the Huai River basin, with the higher areas being the lower reaches of the

收稿日期:2023-05-24 录用日期:2023-07-14

作者简介:江激宇(1964—),男,安徽桐城人,博士,教授,主要从事资源与环境经济学方面研究。E-mail: jyjiang@ahau.edu.cn

*通信作者:张士云 E-mail: shiyunjf@ahau.edu.cn

基金项目:中国工程科技发展策略安徽研究院咨询研究项目子课题(2020-5-2)

Project supported: Sub-topic of Consulting Research Project of Anhui Research Institute of China Engineering Science and Technology Development Strategy (2020-5-2)

main stream of the Huai River and the Yishusi system, and the lower areas being the Anhui section of the main stream of the Huai River. The improvement in the rural economic development level, technological development level, and effective irrigation area can promote an improvement in the water use efficiency of cereal production, while the improvement in the urbanization level, fertilizer application, annual sunshine hours, and average annual temperature will have a suppressive effect on it.

Keywords: Huai River basin; water footprint; cereal production; water efficiency; spatial and temporal evolution

淮河流域是我国重要的粮食主产区和粮食安全保障区域,流域耕地面积约1 473.33万 hm^2 ,约占全国耕地面积的11%,粮食产量约占全国的1/6,提供的商品粮约占全国的1/4。淮河流域的水资源总量不足全国的3%,却承载了全国约13.6%的人口^[1],其人均、亩(667 m^2)均水资源占有量均低于全国平均水平,粮食生产与水资源空间分布严重不均衡,加剧淮河流域农业用水紧张与粮食产量连续平稳增加之间的矛盾,且灌区面积广、农业用水占比高,用水效率和效益总体偏低。多年来,淮河流域水稻、小麦、玉米三大谷物播种面积占粮食作物总播种面积约90%,这三大谷物是粮食生产的主要作物,因此以消费者视角,基于水足迹理论评价该区域谷物生产用水效率并明晰制约因素,有助于发挥淮河“大粮仓”的作用。

据报道,若将灌溉水的粮食生产效率提高0.1 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,旱作区每毫米降水的粮食生产效率提高1.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,我国粮食生产能力可增加500亿 kg 以上^[2],因此,研究粮食生产用水特征及效率对于保障粮食安全具有重要意义。以取水指标评价水资源利用特征及效率的传统方式存在一定局限性,Hoekstra^[3]在20世纪初提出“水足迹”概念,即一个国家(一个地区或一个人)在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量。将水足迹应用于农业领域的研究,改变了以灌溉水量衡量作物对水的消耗的传统方法,更真实地反映了作物需水量,为水资源管理提供了新视角^[4]。目前,关于农业水足迹的研究主要包括三方面:①开展农业水足迹量化研究。Mekonnen等^[5]基于栅格尺度的动态水分平衡模型对全球主要作物生产水足迹进行了综合、详细研究。王圣云等^[6]测度了1990—2016年我国粮食产品和农畜产品水足迹。此外,不同国家和地区各种农作物^[7-8]以及畜产品^[9-10]的水足迹量化研究也很多。②农业水足迹影响因素研究。国外学者研究认为二氧化碳排放、温度、湿度、风速、降水量等自然环境因素^[11]和农用物资、种植密度等生产技术因素^[12]会对作物生产水足迹产生影响。国内研究也不断深入,王倩等^[13]基于系统动力学对北京市农业水足迹进行情景模拟和模型检验,认为其主

要受经济发展和科技进步的影响,范星等^[14]研究发现水足迹响应作物单产水平变化的敏感性较高。③基于水足迹理论的农业用水特征及效率评价研究。卓拉等^[15]结合水足迹计算和能值分析方法,解析了黄河流域各省粮食生产系统中水资源能值投入、能值贡献与能值利用效率。张丽丽等^[16]通过水足迹强度和水资源压力指标从水资源消耗和水污染两个角度分析和评价了水资源安全状态的时空变化。

综合来看,现有研究仍存在继续探讨的空间:一是以水足迹开展农业水资源利用特征的研究重点分析农作物水足迹量化、评价或影响因素,对反映用水效率的作物水足迹强度研究不足;二是研究范围多集中于国家、省市层面,对保障粮食安全具有重要意义的大江大河流域(如淮河流域)的长时间序列作物生产水足迹研究较为缺乏。因此,本研究以淮河流域这一粮食主产典型区域为研究对象,聚焦水稻、小麦、玉米三大谷类粮食作物生产,进行跨省流域性的粮食生产多品种水足迹研究,通过优化谷物生产水足迹强度测度方式反映其用水效率,结合ArcGIS探索其时空特征,分析相关影响因素及空间溢出效应,为促进区域粮食产业的可持续发展提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

淮河流域(33°55′~36°36′N, 111°55′~121°25′E)地处我国东部,地跨河南、安徽、江苏、山东及湖北,总面积27万 km^2 。其包括淮河水系与沂-沭-泗水系,淮河发源于河南省桐柏山区,由西向东,主要流经河南、安徽、江苏三省;沂-沭-泗水系位于淮河东北部,主要流经山东、江苏两省。该流域地处南北气候过渡带,沿淮以北为暖温带区,以南为亚热带区,气候温和,年平均气温11~16 $^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量约920 mm 。淮河流域内日照时数长,光热资源充足,发展农业生产条件良好,是我国七大流域中重要的粮食生产集聚区。剔除市域面积位于流域范围不足一半的地级市,研究区域最终选定的流域涉及河南、安徽、江苏、山东4省35个地级市(图1)。

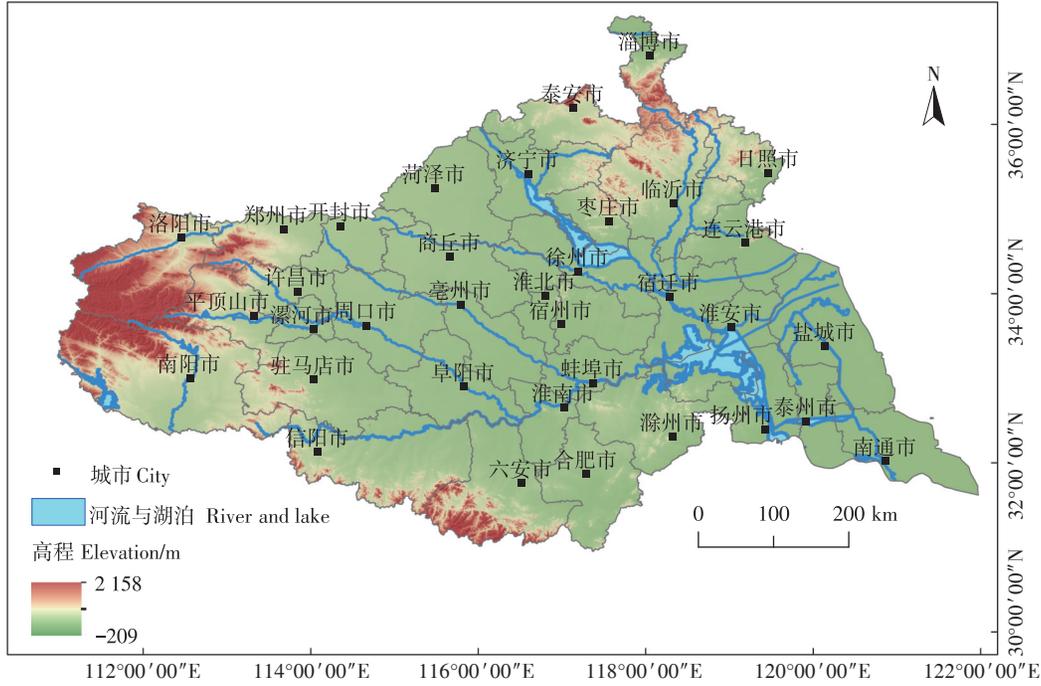


图1 研究区域示意图

Figure 1 Schematic map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 作物生产水足迹计算方法

作物生产水足迹计算依据《水足迹评价手册》^[17], 单位质量作物生产水足迹由蓝水、绿水和灰水足迹构成, 蓝水指作物生产对地下水和地表水的消耗, 绿水指作物生产过程中对降水的消耗, 灰水指稀释作物生产过程因化肥和农药施用而产生的污染物所形成的水资源理论消耗:

$$WF = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (1)$$

式中: WF 、 WF_{blue} 、 WF_{green} 、 WF_{grey} 为单位质量作物生产消耗水足迹及蓝、绿、灰水足迹, $m^3 \cdot kg^{-1}$ 。

(1) 单位质量粮食作物生产消耗的蓝、绿水足迹的计算方法为:

$$WF_{blue} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^n ET_{blue}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{green} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^n ET_{green}}{Y} \quad (3)$$

式中: ET_{blue} 、 ET_{green} 分别为作物生长周期内的蓝、绿水蒸散量, mm ; 10 为单位转换系数; Y 为作物单产, $kg \cdot hm^{-2}$; n 为作物生长周期, d 。

$$ET_{blue} = \max\{0, ET_c - P_e\} \quad (4)$$

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

式中: ET_c 为作物蒸散量, $mm \cdot d^{-1}$; P_e 表示有效降水量, mm ^[18]。

$$P_e = \alpha P, \alpha = \begin{cases} 1.0 & 0 \leq P < 50 \text{ mm} \\ 0.75 \sim 0.80 & 50 \leq P < 150 \text{ mm} \\ 0.70 & P \geq 150 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P 为作物生长周期日降水量, mm ; α 为降水有效利用系数。

作物蒸散量由作物系数 (K_c) 对参考作物蒸散量 (ET_0) 进行调整得到:

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

式中: ET_c 为粮食作物蒸散量, $mm \cdot d^{-1}$; K_c 为作物系数, 其值参考以往的相关实测成果^[19-20](表1)。

参考作物蒸散量的计算采用FAO推荐的唯一方法Penman-Monteith模型计算^[21]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} V_2 (P_a - P_d)}{\Delta + r(1 + 0.34V_2)} \quad (8)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量, $mm \cdot d^{-1}$; R_n 为地表净辐射蒸散当量, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; G 为土壤通热量, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; r 为温度计常数, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$; T 为平均气温, $^\circ C$; V_2 为 2 m 高处平均风速, $m \cdot s^{-1}$; P_a 为饱和水气压, kPa ; P_d 为实际水气压, kPa ; Δ 为饱和水气压与温度相关曲线斜率, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ 。

(2) 单位质量作物生产消耗的灰水足迹的计算方法为:

$$WF_{grey} = \frac{\theta \times AR}{Y} \frac{C_{max} - C_{nat}}{Y} \quad (9)$$

表1 不同月份作物系数
Table 1 Crop coefficients in different months

作物种类 Crop type	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水稻 Rice					1.10	1.21	1.28	1.40	1.14	1.02		
小麦 Wheat	0.58	0.73	0.96	1.34	1.24	0.67				0.67	0.83	0.85
玉米 Corn						0.68	1.16	1.59	1.18			

式中： θ 为氮肥淋溶率，即进入水体的氮肥污染量占其总施用量的百分比，取10%； AR 为单位面积氮肥（折纯）施用量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ； C_{\max} 为水体中氮的最大允许含量， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，据《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中Ⅲ类水质标准取值为 $0.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ； C_{nat} 为受纳水体中氮的自然本底含量， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，通常设为0。

作物生产水足迹总量为：

$$WFP_j = \sum_i WF_{ij} \times P_{ij} \quad (10)$$

式中： WFP_j 为地级市 j 的作物 i 生产水足迹总量， m^3 ； WF_{ij} 为地级市 j 的单位质量作物 i 生产消耗的水足迹， $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ； P_{ij} 为地级市 j 的作物 i 产量， kg 。

1.2.2 谷物生产水足迹强度计算方法

本研究基于水足迹强度^[22]、农业水足迹强度^[23]概念，聚焦于谷物生产，提出以谷物生产水足迹总量与农业总产值的比值为谷物生产水足迹强度指标，以体现谷物生产用水效率情况，谷物生产水足迹强度越低，每万元农业产值产出中所消耗的水足迹越少，则水资源利用效率越高：

$$WFI_j = \frac{WFP_j}{TAV_j} \quad (11)$$

式中： WFI_j 为地级市 j 的谷物生产水足迹强度， $\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1}$ ； WFP_j 为地级市 j 的谷物生产水足迹总量， m^3 ； TAV_j 为地级市 j 的农业总产值，万元。

1.2.3 探索性空间数据分析(ESDA)

本研究首先采用全局莫兰指数(Global Moran's I)观测淮河流域谷物生产水足迹强度在空间结构上是否出现集聚或异常，以判断其空间结构的关联程度，其范围介于 $[-1, 1]$ ，当Moran's $I > 0$ 时，数据呈现空间正向关联性，值越大空间关联性越明显；Moran's $I < 0$ 时，数据呈现空间负向关联性，值越小空间差异越明显；Moran's $I = 0$ 时，空间呈现出随机性，即不相关。其计算方法^[24]为：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})^2} \quad (12)$$

式中： n 为研究地级市数量； x_i 和 x_j 表示地级市 i 、 j ($i \neq j$) 谷物生产水足迹强度， $\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1}$ ； \bar{x} 表示地级市谷物生产水足迹强度均值， $\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1}$ ； W_{ij} 为空间权重值。

局部莫兰指数(Local Moran's I)能反映局部地区间谷物生产水足迹强度的关联程度，即是否存在相似或相异特征，计算方法^[24]为：

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (13)$$

1.2.4 空间杜宾模型(SDM)

为进一步将时间与空间效应结合，检测淮河流域谷物生产水足迹强度随时间变动趋势及各影响因素的空间溢出效应，本研究建立的谷物生产水足迹强度影响因素方程如下：

$$Y = \lambda(W \times Y) + X\beta + W \times X\delta + \varepsilon \quad (14)$$

式中： Y 为被解释变量的向量； X 表示各解释变量的向量； W 为空间权重矩阵，本研究使用0-1邻接矩阵，即若两区域间地理边界相邻，则赋值为1，反之为0； λ 为空间自回归系数，反映相邻地区的被解释变量间的依赖情况，即被解释变量间的溢出效应； β 为回归系数，反映解释变量对被解释变量的影响程度； δ 为空间溢出系数，反映解释变量对邻近地区的被解释变量的影响情况，但由于 W 的存在会导致其忽略地区间的大量交互作用，将通过微分法进行效应分解，通过间接效应反映解释变量的空间溢出效应； ε 为残差项。

1.3 指标选取与数据处理

谷物生产用水效率受到多因素影响，参考农业用水效率影响因素相关研究，考虑数据可得性，影响谷物生产水足迹强度的解释变量主要从社会经济条件、农业生产条件、农业生产投入、自然条件与资源禀赋等方面进行选取(表2)。

(1)社会经济条件：选取农村经济发展水平、第三产业比例和城镇化水平为表征指标。农村经济发展水平一方面反映经济状态调整下的政府工作重点与政策大环境的影响，另一方面揭示农民收入增多带来

表2 指标选取及数据来源

Table 2 Indicators selection and data source

指标 Indicator	指标说明 Indicator explanation	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	标准差 Standard deviation	数据来源 Data source
农村经济发展水平	农村家庭居民人均纯收入/(元·人 ⁻¹)	7 616.30	1 551.00	24 303.00	5 042.17	2001—2020年《中国城市统计经济》《河南统计年鉴》《安徽统计年鉴》
第三产业比例	第三产业产值与地区生产总值之比/%	35.99	17.53	71.21	7.25	《山东统计年鉴》《江苏统计年鉴》及各市统计年鉴
城镇化水平	城镇人口与总人口之比/%	45.11	13.55	77.86	12.74	
科技发展水平	地区科学技术支出/万元	2 201.88	105.04	22 221.04	2 656.84	
种植结构	粮食作物与经济作物播种面积之比/%	302.44	18.93	1 880.81	200.88	
牧业结构	牧业产值与农林牧渔总产值之比/%	29.82	10.7	56.17	7.01	
有效灌溉面积	有效灌溉面积/10 ³ hm ²	334.29	65.54	762.10	153.38	
机械化水平	农业机械总动力/万 kW	513.10	119.98	1 509.07	298.46	
电气化水平	农村用电量/万 kWh	217 293.10	8 057.47	1 891 200.00	266 174.00	
化肥施用量	化肥施用量(折纯)/t	450 858.00	65 702.00	1 582 385.00	333 368.50	
年日照时长	一年受阳光照射总时长/h	1 968.60	1 488.13	2 576.80	200.19	国家气象信息中心-中国气象数据网
年平均气温	一年多日平均气温的平均值/°C	15.41	13.00	17.50	0.86	(https://data.cma.cn/)
年降水总量	一年中所降雨雪化水总量/亿 m ³	85.96	9.03	310.74	54.20	
水资源禀赋	水资源总量/亿 m ³	30.70	3.00	181.67	26.86	2000—2019年河南、安徽、山东、江苏水资源公报及各市水资源公报

生产条件的改善和节水观念的增强^[25];第三产业比例与城镇化水平一方面影响地区用水结构、能耗结构与污染程度,另一方面影响劳动力、水资源与资本等生产要素分配,进而影响谷物生产用水效率^[26]。

(2)农业生产条件:选取科技发展水平、种植结构、牧业结构和有效灌溉面积为表征指标。科技发展水平的提升在水资源的利用过程中不断推动着经济增长,促进生产过程中用水合理化、精准化,优化要素配置,进而提升效率^[26]。不同农作物的耗水情况与抗旱程度存在差异,合理的农作物种植结构能提升作物的水分利用率^[27]。牧业畜产品增长会带动作为上游产品的谷物产量上升,引发区域用水量增长,进而影响谷物生产用水效率^[28]。有效灌溉面积能够反映出农村水利和水库枢纽工程的建设情况^[29]。

(3)农业生产投入:选取机械化水平、电气化水平和化肥施用量为表征指标。机械设备与灌溉设施的使用有效减少水资源损耗,一定程度也能缓解当前农村青壮年劳动力不足的问题,但也可能会带来能耗增加、污染加重等问题^[27]。化肥施用的增加可能带来更多污染,而某种程度上化肥施用量可以作为特定地区农业发展的衡量指标,用量越大说明农业发展相对较好,进而对农户建设和维护本地区农田水利基础设施的“激励”也越大^[30]。

(4)自然条件与资源禀赋:选取年日照时长、年平均气温、年降水总量和水资源禀赋为表征指标。气候

变化会通过日照、温度、降水等气象因子影响整体的谷物生产环境,一方面气候的增(减)产作用会影响作物产出,另一方面要素替代作用会影响谷物生产过程中要素投入,最终两方面都会对谷物生产用水效率产生影响^[31]。水资源是谷物生产必需的要投入,水资源充足能满足作物生产需水量,提高效益,但也可能造成生产者的浪费行为,从而降低用水效率^[26]。

以上涉及价格的变量均以2000年为基期进行平减,消除物价影响。为避免数据性质和关系变化、防止压缩变量的尺度以及减少异方差等问题,回归分析时将变量进行对数化处理。

2 结果与讨论

2.1 淮河流域谷物生产水足迹时序变化

2000—2019年淮河流域谷物生产水足迹总量呈波动上升并趋于稳定的趋势(图2),20年间增长了26.04%,该变化主要与谷物增产有关。水足迹总量历年均值1 560.96亿 m³,于2018年达到峰值1 793.18亿 m³;2002年为枯水年且春季土壤墒情差,导致2003年春旱集中出现,同时2003年进入梅雨季后气候变化异常导致强降雨天气,进而发生1954年以来历史最强洪水,以致谷物生产受损,水足迹总量在2003年为最小值1 165.60亿 m³。水足迹总量构成中,绿水足迹是主要组成部分(64.98%),蓝水足迹仅9.66%,主要是因为淮河流域总体降水量丰富,为作物生长提供

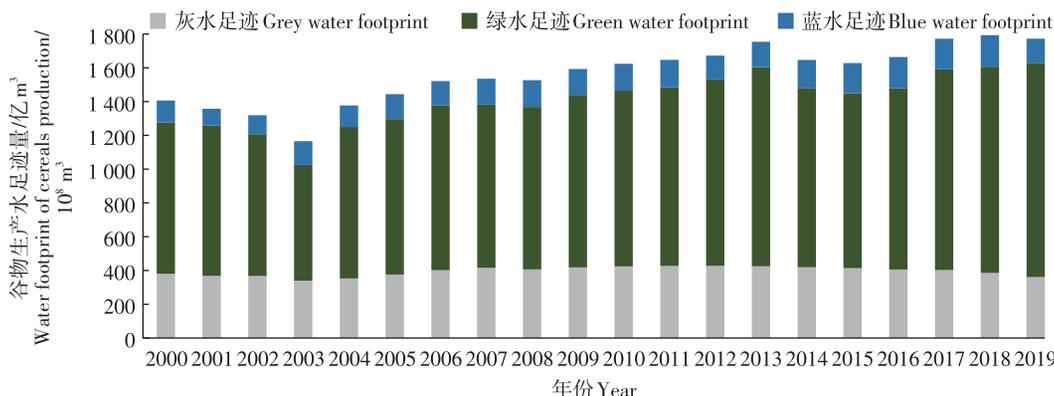


图2 淮河流域谷物生产水足迹总量时序变化(2000—2019年)

Figure 2 Temporal variation in the total water footprint of cereals production in the Huai River basin (2000—2019)

了充足的绿水资源;灰水足迹占比为25.36%,说明在谷物生产中稀释面源污染的需水量较高。研究期内,谷物生产蓝水与绿水足迹显著增长,灰水足迹降低,谷物播种面积扩大导致绿水足迹增加,其中需要水淹生长的水稻的播种面积扩大又导致蓝水足迹增加^[14],灰水足迹的降低可能与化肥施用强度的调整有关。

2.2 淮河流域谷物生产水足迹强度时空特征

2.2.1 谷物生产水足迹强度时序变化

2000—2019年淮河流域谷物生产水足迹强度呈前期快速下降后期逐渐放缓趋势(图3),由2000年的 $4\ 788.02\ \text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$,降低至2019年的 $820.55\ \text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$,下降82.86%,年均降幅4.36%,表明单位农业产值所消耗的水资源量仅为2000年的1/6,水资源利用效率显著提升,这是由于谷物生产水足迹强度能在一定程度反映农业经济发展水平,农业经济发展对降低水足迹强度有一定积极作用,但随着水足迹强度下降,这种积极作用在一定程度上被掩盖^[32]。谷物生产蓝水、绿水和灰水足迹强度分别降低85.02%、80.75%和87.11%,蓝水、绿水足迹强度的降低表明由于农业

生产方式逐渐向节水型转变,滴灌、喷灌等高效灌溉技术的应用,使谷物生产中水资源浪费减少,灌溉用水效率提升;灰水足迹强度的下降说明区域面源污染形式有所改善,这得益于淮河流域严格的监管制度以及高效生态农业的发展中对化肥施用强度和农业生产结构的调整^[33]。

2.2.2 谷物生产水足迹强度空间演变特征

本研究首先利用ArcGIS计算全局莫兰指数(Global Moran's I),再对淮河流域谷物生产水足迹强度的空间集聚效应进行判断(表3)。研究期内流域各市谷物生产水足迹强度Moran's I 在1%显著性水平下均为正,表明水足迹强度呈正向空间关联特征,存在显著的集聚现象,说明各市谷物生产水足迹强度互相影响,不可忽视空间效应的作用。2000—2013年Moran's I 波动上升,表明该阶段谷物生产水足迹强度高市与强度低市的空间集聚增强,空间差异增大,用水效率趋于不平衡;2014—2019年Moran's I 下降,表明谷物生产水足迹强度空间集聚程度不断减弱,空间差异减小,谷物生产用水效率逐渐趋于平衡。

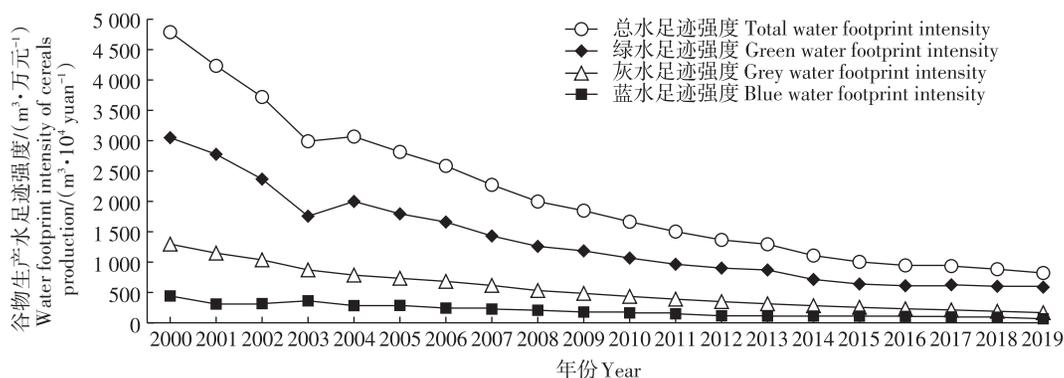


图3 淮河流域谷物生产水足迹强度时序变化(2000—2019年)

Figure 3 Temporal variation of water footprint intensity of cereals production in the Huai River basin (2000—2019)

表3 全局莫兰指数值

Table 3 Global Moran's I

年份 Year	莫兰指数 Moran's I	年份 Year	莫兰指数 Moran's I
2000	0.354(3.645)	2010	0.466(4.796)
2001	0.367(3.769)	2011	0.601(6.024)
2002	0.358(3.690)	2012	0.602(6.043)
2003	0.419(4.280)	2013	0.603(6.016)
2004	0.431(4.477)	2014	0.557(5.630)
2005	0.428(4.449)	2015	0.308(4.508)
2006	0.440(4.557)	2016	0.307(4.486)
2007	0.450(4.671)	2017	0.295(4.269)
2008	0.460(4.750)	2018	0.266(4.373)
2009	0.443(4.579)	2019	0.279(4.530)

注:括号内为Z值,以衡量样本均值偏离方差的程度;Moran's I均在1%水平下显著。下同。

Note: The Z-values in parentheses measure the extent to which the sample mean value deviates from the variance; Moran's I was all significant at the 1% level. The same below.

这说明淮河流域谷物生产用水效率的空间分布变化是受气候变化、农业经济发展、灌溉方式变化等影响

的动态过程。

为弥补全局莫兰指数无法识别区域内部集聚状况以及同质性假定带来的局限,本研究计算各市局部莫兰指数(Local Moran's I),并通过 ArcGIS 绘制反映谷物生产水足迹强度聚类情况的 LISA 集聚图(图4)进行可视化表达,集聚方式包括以下四种:

(1)高高集聚(HH),即局部谷物生产水足迹强度高值集聚类型。研究期内,谷物生产水足迹强度高高集聚区域呈扩大态势。2000年高高集聚区仅包括六安、淮南和合肥3市,主要原因是该区域以大水漫灌和土渠输水为主的灌溉方式造成水资源浪费,且当时受旱灾影响农作物大面积减产或绝收,导致用水效率较低。谷物播种面积上升导致需水量上升,同时年均温上升使植物蒸腾和土壤蒸发速率加快,2006年高高集聚区域扩大为六安、淮南、合肥、阜阳、蚌埠和信阳6市,2012年又进一步涵盖滁州。2019年高高集聚区域面积有所减小并向淮北平原转移,包括六安、合肥、阜阳、淮南、蚌埠、亳州和滁州7市。这一区域虽

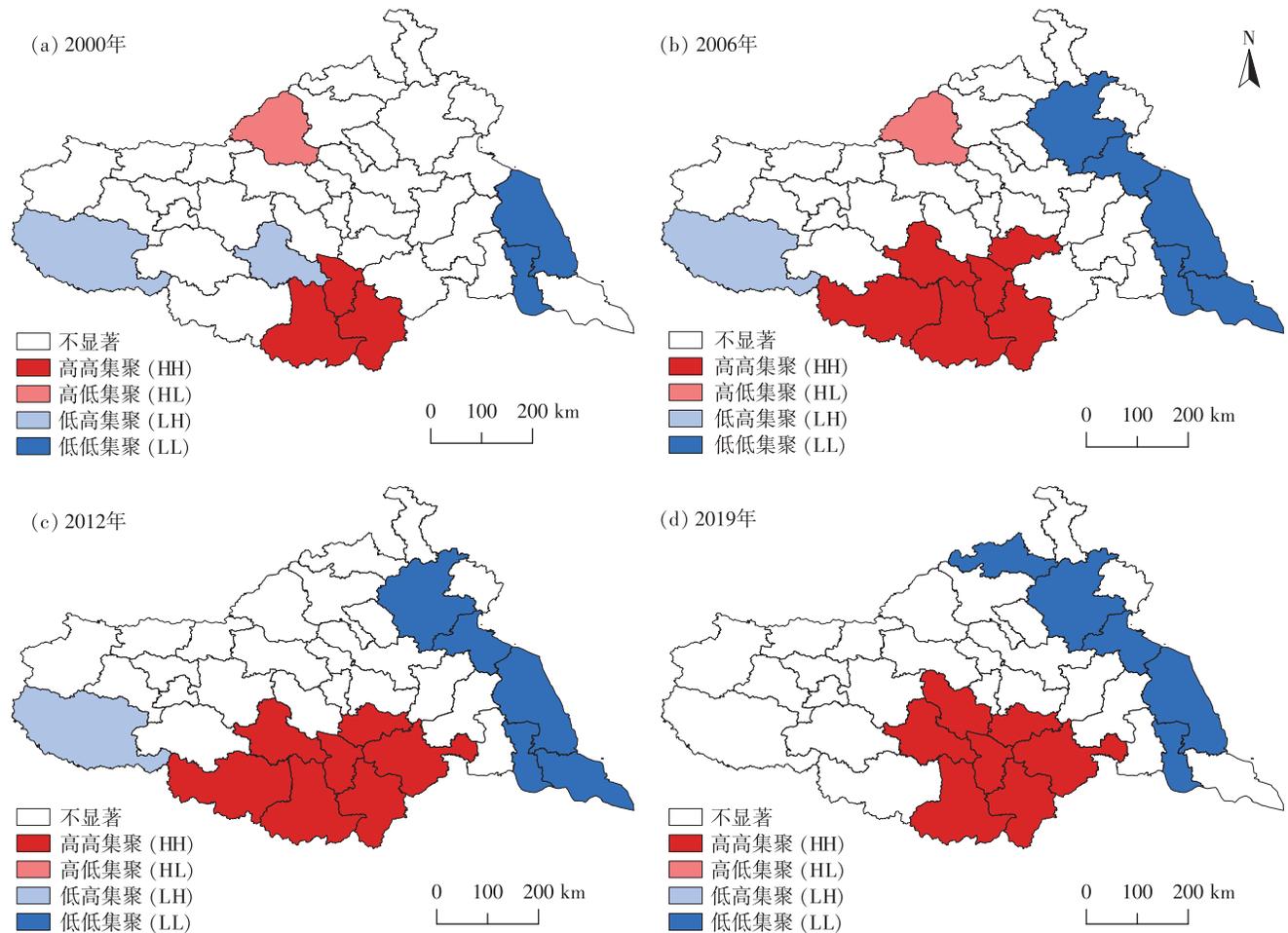


图4 淮河流域谷物生产水足迹强度 LISA 集聚图

Figure 4 LISA cluster map of water footprint intensity of cereals production in the Huai River basin

然在洪涝灾害防治、灌区现代化建设与改造方面有所成效,但依旧存在水资源配置不优、缺水形势严峻及城市用水与农业用水供需矛盾突出等问题,进而空间上呈现高高集聚,较其他区域用水效率低。

(2)低低集聚(LL),即局部谷物生产水足迹强度低值集聚类型。研究期内,谷物生产水足迹强度低低集聚区域向北延伸。2000年低低集聚区分布在流域下游泰州和盐城2市,原因是当地普遍推广硬质化渠道,且属水网地区,农业渠系水利用系数高。2006年形成了包括临沂、连云港、泰州、盐城和南通5市的连片低低集聚区域,2019年该区域又进一步覆盖泰安。如此“低值俱乐部”的形成,一方面是由于山东地处沂-沭-泗水系,江苏河湖交错、水网纵横,两省水资源禀赋优势明显;另一方面是由于《山东省用水总量控制管理办法》颁布实施,以及江苏节水技术的大力发展改变了大水漫灌的方式。

(3)高低集聚(HL),即在谷物生产水足迹强度较低区域分布的高值离群点。该“凸点”仅在2000、2006年菏泽有分布,之后随着菏泽谷物生产用水效率的提升,与周围城市差异变小,“凸点”逐渐消失。

(4)低高集聚(LH),即在谷物生产水足迹强度较高区域分布的低值离群点。2000年仅在南阳和阜阳分布,2006、2012年仅南阳有分布,随着时间变化,最终消失。这类“凹点”的水资源利用效率较高,主要围

绕在高高集聚区域周围,随其变化而发生改变。

综上可知,淮河流域谷物生产水足迹强度存在显著的空间集聚现象并不断演化,随时间推移集聚状态逐渐稳定,呈现以淮河中游安徽段为主要分布的高高集聚区和以淮河下游及沂-沭-泗水系为主要分布的低低集聚区两种状态。

2.3 淮河流域谷物生产水足迹强度影响因素

根据上述分析,淮河流域谷物生产水足迹强度空间自相关显著,通过空间杜宾模型进一步分析其影响因素及空间溢出效应,回归结果见表4。

2.3.1 影响因素

(1)社会经济条件:农村经济发展水平回归系数显著为负,农村经济发展水平每增长1%,谷物生产水足迹强度会相应降低0.843%,即农村经济发展水平的提升会有效提升谷物生产用水效率,这与李静等^[34]的研究结果一致。农村经济发展繁荣,带动农户收入增长,进而提升农户的节水意识与节水资金投入。第三产业比例、城镇化水平对淮河流域粮食作物水足迹强度在1%显著水平下有0.326%和0.380%的正向作用,徐依婷等^[26]也得出同样结论,这可能是由于随着工业化与城镇化发展,农村劳动力减少,农业经营相对粗放,导致用水效率降低。

(2)自然条件与资源禀赋:年日照时长和年平均气温均在1%水平下显著增加谷物生产水足迹强度,

表4 淮海流域谷物生产水足迹强度影响因素回归结果

Table 4 Regression results of water footprint intensity of cereals production and impact factors in the Huai River basin

变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	空间溢出系数 Spatial overflow coefficient	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
农村经济发展水平	-0.843***(-10.49)	1.306*** (8.64)	-0.763***(-9.74)	1.429*** (6.51)	0.667*** (2.92)
第三产业比例	0.326*** (5.10)	-0.611***(-4.50)	0.280*** (5.28)	-0.705***(-3.74)	-0.425***(-2.12)
城镇化水平	0.380*** (5.49)	0.158 (1.16)	0.408*** (6.10)	0.387** (2.37)	0.796*** (4.86)
科技发展水平	-0.037**(-2.15)	0.072* (1.77)	-0.031(-1.53)	0.089 (1.49)	0.058 (0.81)
种植结构	0.338*** (15.61)	0.121** (2.19)	0.357*** (17.89)	0.317*** (4.09)	0.674*** (7.81)
牧业结构	0.178*** (3.62)	0.427*** (4.21)	0.204*** (3.70)	0.647*** (5.01)	0.851*** (5.95)
有效灌溉面积	-0.262***(-6.57)	0.396*** (4.19)	-0.237***(-6.94)	0.422*** (3.44)	0.185 (1.42)
机械化水平	0.088** (2.30)	-0.009(-0.12)	0.093** (2.45)	0.034 (0.29)	0.127 (1.00)
电气化水平	-0.017(-0.94)	-0.297***(-6.92)	-0.042**(-2.19)	-0.421***(-5.95)	-0.463***(-6.27)
化肥施用量	0.340*** (11.55)	-0.159**(-2.57)	0.332*** (13.15)	-0.071(-0.89)	0.261*** (3.17)
年日照时长	0.440*** (2.83)	-0.848***(-3.12)	0.382** (2.39)	-1.011***(-3.18)	-0.629* (-1.89)
年平均气温	1.584*** (5.79)	1.092** (1.97)	1.715*** (5.78)	2.191*** (3.00)	3.906*** (4.84)
年降水总量	0.063 (1.46)	0.188** (2.16)	0.080* (1.92)	0.283** (2.34)	0.363*** (2.98)
水资源禀赋	-0.046(-0.105)	0.017 (0.33)	-0.046(-1.62)	0.005 (0.07)	-0.041(-0.55)
λ	0.318*** (6.44)				

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平下显著。下同。

Note:***, **, and * indicate that they are significant at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively. The same below.

日照时长的增加与平均气温的升高,会增强作物的蒸腾作用,增加蓝水、绿水足迹,增大耗水量。年降水总量和水资源禀赋与谷物生产水足迹强度相关性不显著。不同区域有不同的气候状况,因此气象因素的影响研究结论不尽相同^[35]。

(3)农业生产条件:科技发展水平回归系数在5%显著水平下为-0.037,说明科技发展水平对谷物生产用水效率的提升有促进作用,马慧君等^[36]同样认为科技进步将会增加水资源利用的经济、社会和生态效益,有利于水资源利用效率的提升。种植结构每提升1%,在1%水平下导致谷物生产用水效率降低0.338%,表明目前淮河流域农作物种植比例存在一定的优化空间。牧业结构回归系数为0.178,通过1%显著性水平,意味着畜牧业的发展会增加饲料作物比例和动物粪便的水污染,进而降低谷物生产用水效率。在1%显著性水平下,有效灌溉面积对谷物生产水足迹强度降低有0.262%的积极作用,水利设施的建设完善,可提升灌溉效率,减少水资源浪费,提升谷物生产用水效率,这与王学渊等^[35]的研究结果一致。

(4)农业生产投入:机械化水平回归系数在5%显著性水平下为0.088,表明机械化水平的提高会造成谷物生产用水效率降低,与李静等^[34]的研究结论一致。这可能是由于农业机械动力源主要为柴油及石化产品,造成能源消耗加剧,且农户节水意识和要求不高,仍使用大功率水泵,造成水资源浪费。电气化水平与谷物生产水足迹强度相关性不显著。化肥施用量在1%显著性水平下使谷物生产水足迹强度提高0.340%,由于化肥施用增加需要更多水稀释其中氮、磷等元素带来的污染,灰水足迹增加,用水效率下降。

2.3.2 空间溢出效应

空间自相关系数 λ 在1%水平下为0.318,表明谷物生产水足迹强度存在显著的正向溢出效应,即本地谷物生产水足迹强度每提升1%,相邻城市的谷物生产水足迹强度会提升0.318%,说明本地在谷物生产用水效率的提升方面开始向相邻城市发挥“示范效应”,城市之间互相学习交流节水技术,生产要素不断流动,优势区域不断集聚。

本研究进一步探索谷物生产用水效率空间溢出效应的内在原因,对空间溢出系数进行效应分解。直接效应为本地区解释变量对本地区粮食生产水足迹强度的影响,间接效应为本地区解释变量对邻近地区粮食生产水足迹强度的影响,总效应为解释变量对整

体粮食生产水足迹强度的影响,因此影响因素的溢出效应程度由间接效应体现。对于谷物生产水足迹强度,农村经济发展水平、城镇化水平(效应值1.429、0.387)分别在1%、5%水平下具有的正向溢出效应,农村经济发展水平与城镇化水平的提升会激发优质资本、劳动力等向本地集聚,产生“虹吸效应”,对邻市谷物生产用水效率的提升产生抑制。种植结构、牧业结构的溢出效应为0.317、0.647,均在1%水平下显著,相邻城市之间的种植结构与牧业结构调整通常会有相似规模与空间连接的特点,因此对谷物生产用水效率的影响存在溢出效应。电气化水平的间接效应为-0.421,在1%水平下显著,主要是由于电网系统具有连片性。1%水平下,有效灌溉面积每提升1%,邻近地区的谷物生产水足迹强度上升0.422%,主要是由于随着本地水利设施建设水平的提高,流入邻市的水资源减少,且邻市可能没有进行同等水利设施的建设,从而抑制了邻市的水资源供给和谷物生产用水效率的提升。第三产业比例(效应值0.705)在1%水平下具有的负向溢出效应,第三产业比例上升带来产业间要素流动,对周边市域有借鉴效应,产生谷物生产用水效率提升的空间溢出。年日照时长、年平均气温、年降水总量的间接效应显著,效应值分别为-1.011、2.191、0.283,气候变化并不是一个封闭的系统,影响气候变化的各类温室气体排放具有很强的空间流动性,因此气象因子的空间溢出效应显著。

2.3.3 稳健性检验

本研究利用以下两种方式对实证结果进行稳健性检验:

(1)利用地理反距离平方矩阵替代0-1邻接矩阵重新回归,地理反距离平方矩阵为:对角线元素为0,非对角线元素为 $W_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^2}$,其中 d_{ij} 为两城市间地理距离。0-1邻接矩阵只考虑了两市相邻的情况,但忽略了不邻城市各因素对谷物生产用水效率产生的可能影响,因此采用地理反距离平方矩阵替代来进行稳健性检验,结果见表5。空间自相关系数 λ 为0.611,在1%水平下显著,各解释变量回归系数与显著性未发生根本性改变,结果与前文研究相符。

(2)利用空间误差模型(SEM)和空间自回归模型(SAR)进行回归。在SEM与SAR中,分别通过误差项和空间自回归系数来体现空间依赖性,其值为0.428与0.339,在1%水平下显著,各解释变量回归系数与显著性结果与SDM模型结果一致。

上述两种方法的结果表明本研究的实证结果具有可靠性和稳定性。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究利用 Penman-Monteith 模型、ESDA 方法、空间杜宾模型对淮河流域谷物生产水足迹及用水效率进行研究,得到如下结论:

(1)2000—2019 年淮河流域谷物生产水足迹总量增加 26.04%,水足迹强度不断降低,年均降幅 4.36%,农业产值每万元谷物生产消耗水资源量逐渐降低,用水效率提升显著。

(2)淮河流域谷物生产水足迹强度空间上存在显著的集聚现象,即谷物生产用水效率存在地区差异。谷物生产用水效率较高的地区为淮河干流下游及沂-沭-泗水系区域,效率较低的地区为淮河干流安徽段。

(3)农村经济发展水平、科技发展水平、有效灌溉面积等因素会促进谷物生产用水效率的提升;种植结构、第三产业比例、城镇化水平、牧业结构、机械化水平、化肥施用量、年日照时长、年平均气温等因素会抑制谷物生产用水效率的提升;由于要素流动、技术互通等,农村经济发展水平、种植结构、城镇化水平、年平均气温等因素存在显著的空间溢出效应。

3.2 建议

为促进淮河流域谷物生产用水效率提升,合理利

用地区农业水资源,建议从以下几方面采取措施:

(1)深化区域协同发展,搭建高效节水农业示范平台,推动资源流动与技术扩散,促进区域共同提升。同时,各地要充分考虑自身条件,因地制宜、因时制宜地开展特色节水技术研究与水资源配套管理,深入挖掘水资源合理利用潜力,加强水资源管理,提高多维思考效率和粮食生产用水效率。

(2)促进经济发展和水资源协同发展。提高农村经济发展水平能够提升粮食生产用水效率,可采取经济措施,如改革农业水价和组建用水者协会等,来减少水资源浪费、增加农民节水积极性,同时结合农业节水补贴或强农惠农富农政策提高农户收益,促进节水技术和设备的推广与升级。

(3)建设更完善的基础设施和持续推进节水技术是关键。针对有效灌溉面积对粮食用水效率的正向作用,各级政府应积极推进水库、灌渠、管道等基础设施的完善和管理运营,同时结合高标准农田建设,进一步提升农田节水设施建设,推广喷灌、微灌、滴灌、低压管道输水灌溉、集雨补灌等技术,减少采用大功率水泵等机械所导致的大水漫灌,实现高效节水。

(4)优化农业生产方式,调整农业物资投入。在控制农业面源污染的前提下,合理施用化肥、农药,改善施用程度,提升利用效率。同时,结合自身水资源条件和降水特征,因地制宜调整种植结构,优化耗水结构,推动畜牧节水建设,比如推广节水饲喂设备、稻渔

表5 实证结果的稳健性检验

Table 5 Robustness test of empirical results

变量 Variable	地理反距离平方矩阵 Geographic inverse distance square matrix		空间误差模型 SEM	空间自回归模型 SAR
	回归系数 Regression coefficient	空间溢出系数 Spatial overflow coefficient	回归系数 Regression coefficient	回归系数 Regression coefficient
农村经济发展水平	-0.764***(-9.19)	1.414*** (5.39)	-0.769***(-9.04)	-0.520***(-7.11)
第三产业比例	0.384***(6.21)	-1.293***(-6.31)	0.112(1.61)	0.012(0.18)
城镇化水平	0.543***(8.52)	-0.344(-1.39)	0.442***(6.46)	0.361*** (5.62)
科技发展水平	-0.030*(-1.70)	0.046(0.558)	-0.099***(-6.17)	-0.100***(-6.44)
种植结构	0.346*** (16.20)	-0.292***(-3.19)	0.353*** (15.46)	0.383*** (17.41)
牧业结构	0.084*(1.78)	0.347**(2.21)	0.173*** (3.46)	0.207*** (4.48)
有效灌溉面积	-0.255***(-7.11)	1.380*** (8.07)	-0.245***(-6.36)	-0.238***(-6.61)
机械化水平	-0.026(-4.63)	-0.318**(-2.03)	0.019(0.52)	0.030(0.89)
电气化水平	-0.076***(-4.63)	-0.422***(-5.54)	-0.009(-0.52)	0.009(0.51)
化肥施用量	0.438*** (15.50)	-0.575***(-5.43)	0.303*** (10.27)	0.291*** (10.87)
年日照时长	0.443*** (2.99)	-0.452(-1.04)	-0.222(1.42)	-0.207(-1.54)
年平均气温	1.378*** (5.18)	-0.092(-0.10)	2.803*** (10.42)	2.564*** (10.33)
年降水总量	0.175*** (4.84)	0.219(1.26)	0.193*** (4.76)	0.208*** (5.90)
水资源禀赋	-0.057**(-2.12)	0.068(0.71)	-0.066*** (15.46)	-0.078***(-2.93)
λ	0.611*** (9.93)		0.428*** (7.15)	0.339*** (9.54)

综合种养等方式,促进水资源利用效率提升。

参考文献:

- [1] 马天儒,杨朝晖,张慧.基于水足迹理论的淮河流域水资源节约与保护[J].治淮,2016(11):42-43. MA T R, YANG Z H, ZHANG H. Water conservation and protection in Huaihe River basin based on water footprint theory[J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2016(11):42-43.
- [2] 农业部.农业部关于推进节水农业发展的意见[EB/OL].(2012-02-10)[2022-10-18]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201202/t20120210_2478622.htm. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Opinions of the Ministry of Agriculture on promoting the development of water-saving agriculture[EB/OL].(2012-02-10)[2022-10-18]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201202/t20120210_2478622.htm.
- [3] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction[C]. Delft: International Expert Meeting on Virtual Water Trade, 2003: 12-13.
- [4] 吴普特,孙世坤,王玉宝,等.作物生产水足迹量化方法与评价研究[J].水利学报,2017,48(6):651-660. WU P T, SUN S K, WANG Y B, et al. Research on the quantitative methods for water footprint of crop production[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 651-660.
- [5] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [6] 王圣云,林玉娟.中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素:水足迹与灰水足迹视角[J].地理科学,2021,41(2):290-301. WANG S Y, LIN Y J. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(2): 290-301.
- [7] 冯变变,卓拉,杨西,等.供应链视角小麦与初加工产品生产水足迹分析[J].农业机械学报,2021,52(12):358-367. FENG B B, ZHUO L, YANG X, et al. Water footprint analysis of wheat and derived products based on supply-chain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12):358-367.
- [8] 张静,白红莉,雍会.基于农作物灌溉定额的干旱区棉花节水潜力分析[J].棉花科学,2022,44(3):9-15. ZHANG J, BAI H L, YONG H. Analysis on water saving potential of cotton in arid area based on the crop irrigation quota[J]. *Cotton Sciences*, 2022, 44(3):9-15.
- [9] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401-415.
- [10] 卓拉,谢栋,吴普特,等.中国生猪生产水足迹空间变异与评价[J].中国农业资源与区划,2022,43(4):96-107. ZHUO L, XIE D, WU P T, et al. Analysis and evaluation of spatial variation in water footprints for pig production in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(4):96-107.
- [11] NARANJO-MERINO C A, ORTIZ-RODRIGUEZ O O, VILLAMIZAR-G R A. Assessing green and blue water footprints in the supply chain of cocoa production: a case study in the northeast of Colombia [J]. *Sustainability*, 2018, 10(1):38.
- [12] BARBOSA E A A, MATSURA E E, SANTOS L N S D, et al. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in southeast Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153:448-456.
- [13] 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. WANG Q, HUANG K. Simulation of agricultural water footprint and analysis of influencing factors in Beijing based on system dynamics[J]. *Systems Engineering*, 2021, 39(3):13-24.
- [14] 范星,陈彬.三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素[J].生态学报,2022,42(15):6368-6380. FAN X, CHEN B. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15):6368-6380.
- [15] 卓拉,尚科辉,杨西,等.基于能值分析的黄河流域粮食生产系统蓝绿水资源利用评价[J].农业工程学报,2022,38(1):132-140. ZHUO L, SHANG K H, YANG X, et al. Evaluation of blue and green water resources utilization in grain production system in the Yellow River basin based on emergy analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1):132-140.
- [16] 张丽丽,邓晓雅,龙爱华,等.基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析:以新疆和田地区为例[J].干旱区研究,2022,39(2):436-447. ZHANG L L, DENG X Y, LONG A H, et al. Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: a case in the Hotan Prefecture of Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2):436-447.
- [17] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, 等.水足迹评价手册[M].刘俊国,等译.北京:科学出版社,2012. HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual[M]. LIU J G, et al. Translate. Beijing: Science Press, 2012.
- [18] ALLEN R G, PRUITT W O, WRIGHT J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2):1-22.
- [19] 高超,李学文,孙艳伟,等.淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J].作物学报,2019,45(2):297-309. GAO C, LI X W, SUN Y W, et al. Spatiotemporal characteristics of water requirement and agricultural drought during summer maize season in Huaihe River basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2):297-309.
- [20] 王晓东,马晓群,许莹,等.淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J].资源科学,2013,35(3):665-672. WANG X D, MA X Q, XU Y, et al. Temporal analysis of the crop water surplus deficit index for the whole growth period in the Huaihe basin[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3):665-672.
- [21] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992:20-21.
- [22] 孙才志,刘王玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321. SUN C Z, LIU Y Y, CHEN L X, et al. The spatial-temporal

- disparities of water footprint intensity based on Gini coefficient and Theil index in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [23] 姜秋香, 李鑫莹, 王子龙, 等. 黑龙江省农业水足迹时空分布及用水效率分析[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(11): 87-96. JIANG Q X, LI X Y, WANG Z L, et al. Spatio-temporal distribution of agriculture water footprint and analysis of water use efficiency in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020, 51(11): 87-96.
- [24] ANSELIN L, SYABRI I, KHO Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis[J]. *Geographical Analysis*, 2006, 38(1): 5-22.
- [25] 付俊怡, 李鸿雁. 黄河流域农业用水效率及影响因素时空异质性研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(11): 77-89. FU J Y, LI H Y. Study on the spatio-temporal heterogeneity of agriculture water use efficiency and influencing factors in the Yellow River basin[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(11): 77-89.
- [26] 徐依婷, 穆月英, 张哲晰. 中国粮食生产用水效率的影响因素及空间溢出效应[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(4): 76-89. XU Y T, MU Y Y, ZHANG Z X. The influencing factors and spatial spillover effects of water use efficiency of grain production in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2022(4): 76-89.
- [27] 刘渝, 宋阳. 基于超效率SBM的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 102-107. LIU Y, SONG Y. Evaluation and influencing factor analysis of agricultural water resource efficiency in China based on super-efficiency SBM model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(1): 102-107.
- [28] 田贵良, 吴茜. 居民畜产品消费增长对农业用水量的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 109-115. TIAN G L, WU Q. Impact of livestock consumption growth on regional water consumption[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(5): 109-115.
- [29] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 85-90. CHEN H B. Provincial agriculture water use efficiency evaluation and spatial spillover effect in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 85-90.
- [30] 叶文辉, 郭唐兵. 我国农田水利运营效率的实证研究: 基于2003—2010年省际面板数据的DEA-TOBIT两阶段法[J]. 山西财经大学学报, 2014, 36(2): 63-71. YE W H, GUO T B. The empirical research of China's operational efficiency of irrigation and water conservancy: based on 2003—2010 inter-provincial panel data with two-stage method of DEA-TOBIT[J]. *Journal of Shanxi University of Finance and Economics*, 2014, 36(2): 63-71.
- [31] 朱欢. 气候因素对农业用水效率影响的空间异质性分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. ZHU H. Spatial heterogeneity of the influence of climatic factors on agricultural water use efficiency[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [32] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 934-944. ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 934-944.
- [33] 党伟, 焦利民. 淮河上游水质污染特征及其综合评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 358-363. DANG W, JIAO L M. Water pollution characteristics and their comprehensive assessment in the upper reaches of the Huai River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 358-363.
- [34] 李静, 孙有珍. 资源与环境双重约束下的粮食生产用水效率研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 67-75. LI J, SUN Y Z. Study on efficiency of agriculture water utilization under dual constraints of resource and environment[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 67-75.
- [35] 王学渊, 赵连阔. 中国农业用水效率及影响因素: 基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J]. 农业经济问题, 2008, 29(3): 10-18. WANG X Y, ZHAO L G. Agricultural water efficiency and the causal factors: a stochastic frontier analysis based on Chinese provincial panel data: 1997—2006[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2008, 29(3): 10-18.
- [36] 马慧君, 杨肖丽, 高甜. 我国中部地区水资源利用效率评价及归因分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2662-2672. MA H J, YANG X L, GAO T. Evaluation and attribution of water resource utilization efficiency in the central China[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(5): 2662-2672.