

稻麦轮作系统作物水足迹效率及其驱动力研究

吴梦洋¹ 崔思梦¹ 李玥瑶¹ 肖剑峰² 操信春^{1,3} ELBELTAGI Ahmed⁴

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 浙江省水利水电技术咨询中心, 杭州 310020;

3. 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 210098;

4. 曼苏尔大学农业学院, 曼苏尔 35516)

摘要: 水足迹视角下的农业绿色高效用水能为区域粮食安全和环境可持续发展提供重要支撑。本文以稻麦轮作系统为研究对象, 基于水足迹理论构建了稻麦轮作系统作物水足迹计算模型, 并在此基础上量化了1960—2019年涟水灌区稻麦轮作系统水足迹效率指标(广义水系数和作物生产水足迹), 进一步分析了稻麦轮作系统作物水足迹效率的时间演变规律和驱动力, 结果表明: 1960—2019年稻麦轮作系统广义水系数变化范围为0.50~0.76, 多年平均值为0.65, 整体变化趋势不显著; 而作物生产水足迹年均值为58.4 m³/GJ, 年际间呈显著下降趋势; 其中作物生产绿水足迹年均值为35.8 m³/GJ, 占作物生产水足迹的40.6%~80.4%, 而蓝水足迹多年均值为22.6 m³/GJ。广义水系数和作物生产水足迹与气象因素密切相关, 其中降水量对二者的影响最为显著。作物生产水足迹与农业生产资料投入量和区域灌溉水平呈负相关, 农业机械化动力、节水灌溉面积占比是人类活动对作物生产水足迹间接表达作用的主要驱动因子。基于作物水足迹效率及其驱动力研究, 提高降水利用率、改善区域农业机械化和灌溉水平, 是促进水资源高效利用的有效途径。研究结果可为区域农业节水标准制定提供参考。

关键词: 农业用水效率; 稻麦轮作; 蓝绿水; 作物水足迹; 通径分析

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0543-09

OSID:



Crop Water Footprint Efficiency and Its Driving Forces in Rice – Wheat Rotation System

WU Mengyang¹ CUI Simeng¹ LI Yueyao¹ XIAO Jianfeng² CAO Xinchun^{1,3} ELBELTAGI Ahmed⁴

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Zhejiang Water Resources and Hydropower Technology Consulting Center, Hangzhou 310020, China

3. Engineering Research Center for Agricultural Soil – Water Efficient Utilization, Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 210098, China

4. Faculty of Agriculture, Mansoura University, Mansoura 35516, Egypt)

Abstract: Efficient and sustainable water use in agriculture, as viewed through the lens of water footprint analysis, plays a crucial role in enhancing regional food security and environmental sustainability. Focusing on the rice – wheat rotation system, a crop water footprint calculation model was developed based on water footprint theory. The model was applied to assess the efficiency of water use in the rice – wheat rotation system in Lianshui Irrigation District spanning from 1960 to 2019. The analysis revealed the temporal evolution and influencing factors of water use efficiency in this system. Results indicated that the generalized water system number was ranged from 0.50 to 0.76 over the study period with a multi-year average of 0.65, showing no significant overall trend. In contrast, the crop production water footprint exhibited a yearly average of 58.4 m³/GJ, displaying a consistent decline. Specifically, the green water footprint accounted for 40.6%~80.4% of the overall water footprint, while the blue water footprint averaged 22.6 m³/GJ. Meteorological factors, predominantly precipitation, significantly influenced both the broad water system number and crop water footprint. The study highlighted a negative

收稿日期: 2024-03-14 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52309049)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20230969)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(B230201009)

作者简介: 吴梦洋(1993—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水足迹及农业水资源管理研究, E-mail: 20240047@hhu.edu.cn

通信作者: 操信春(1986—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

correlation between crop production water footprint and agricultural inputs, as well as regional irrigation intensity. Factors such as agricultural mechanization and water-saving irrigation practices played a crucial role in shaping water use efficiency. Enhancing rainfall utilization and adopting advanced agricultural technologies were identified as effective strategies to optimize water resource management in agriculture. Findings from this research can offer valuable insights for developing regional agricultural water conservation standards.

Key words: agricultural water use efficiency; rice – wheat rotation; blue-green water; crop water footprint; path analysis

0 引言

人类对水资源需求的 90% 以上来自农业生产部门^[1],水资源短缺已成为制约粮食生产的主要因素之一,农业绿色高效用水是缓解区域水资源与水环境压力的必要途径^[2]。在保证灌溉面积与粮食产量的前提下,降低农业生产用水,实现农业高效用水,促进灌区生态健康与绿色发展,成为保障粮食安全与用水安全所面临的重要挑战^[3-5]。而准确量化与评价区域农业生产用水,是确保实施最严格水资源管理制度,促进灌区实现水资源高效管理与调控的基础。

水足迹作为衡量水资源使用的指标,包括绿水(产生于降水的自然存储水)、蓝水(地表水体和地下水体存储水),可以准确衡量作物生长过程中实际水资源消耗^[6-8]。尤其在农业生产中,作物水足迹评估有助于准确量化作物生长对不同类型水资源的需求和使用效率,进一步识别节水潜力和实施节水措施^[9],从而推动农业理论与实践的可持续发展。近年来,经水足迹网络以及诸多学者的不断完善,水足迹概念、研究对象、计算框架均得到了进一步发展,并对多种粮食作物在不同时间和空间尺度上进行了评估。其中空间尺度涵盖全球、国家、流域、区域、灌区到田间水平^[10-13];而时间尺度则包括年、月、日和整个生育期^[14-17]。同时,部分学者也积极探索和开发适用于不同农作物类型和地区的水足迹评价方法,包括生命周期评价、水动态平衡分析、区域水足迹模型等方法被应用和不断完善,为农作物水足迹定量评估提供了技术支持。MEKONNEN 等^[18]通过统计数据对全球 126 种作物及 200 多种衍生产品的水足迹进行了估算;HOEKSTRA 等^[19]采用高分辨率下 5'×5'弧分网格数据量化了全球小麦水足迹;CASTELLANOS 等^[20]将遥感技术应用到作物水足迹估算中,为水足迹量化提供了新工具;付强等^[21]在模型模拟基础上评估了黑龙江省多种作物蓝绿水足迹及其用水效率;WU 等^[22]通过试验观测与模型构建的方法分析了不同灌溉模式下作物消耗性水足迹(蓝、绿水足迹)用水特性。作物水足迹

评估方法正从依赖经验系数的大尺度估计方法向综合考虑农田水资源耗用物理过程的综合指标演变^[23]。然而,以往研究往往局限于评价单一作物或单一生育期且忽略了蓝绿水资源随作物生长的迁移特征,这与实际作物种植模式和作物耗水的物理过程均有所差异,可能会限制作物全年产量和效率的协同发展。

水稻-小麦两熟种植是江淮地区粮食生产主要种植制度,该区是我国水稻和小麦的主产区,也是我国重要的粮食生产基地和净调出区,对保障我国粮食安全起到至关重要的作用^[24-27]。稻麦轮作系统具有典型的灌溉排水单元,涉及不同水分管理特征,作物生育阶段还覆盖完整的年际气象和广义水资源收支周期。以稻麦轮作系统为研究对象,建立农业生产系统水资源耗用的量化手段、评价方法对新时期农业水资源高效可持续利用具有重要理论、实践意义。本研究基于水足迹理论构建稻麦轮作系统作物水足迹计算模型,通过量化 1960—2019 年涟水灌溉区稻麦轮作系统水足迹效率指标,分析其水资源消耗的历史演变特征以及水足迹效率相关驱动因素,为构建农业生产水资源评价系统提供参考,同时为突显水足迹理论在时间尺度上的灵活性创造条件。

1 研究方法与数据来源

1.1 作物生产水足迹量化方法

应用联合国粮食及农业组织 (FAO) 开发的作物水分生产力模型 (AquaCrop) 计算作物生长期每日蓝、绿水腾发量^[28-29]。为了模拟近 60 年稻麦轮作系统作物蒸发蒸腾量,通过 2015—2019 年灌排单元内作物生长过程中的观测数据(作物产量、叶面积指数、田间水层厚度、土壤体积含水率等)对 AquaCrop 模型进行本地化校准,率定和验证后模型参数如表 1 所示,其中水稻、冬小麦各生育期的时间跨度(表 2)及水分控制标准参照文献[30-31]。

利用本地化校正后的 AquaCrop 模型追踪根区水分流入量和流出量来模拟土壤水分动态平衡,计算式

$$P_t + I_t = ET_t + S_t + D_t + \Delta F_t \tag{1}$$

表 1 AquaCrop 模型参数率定

Tab.1 Parameters calibration of AquaCrop model

项目	模型参数	水稻	冬小麦
冠层	初始冠层覆盖度 (CC ₀)/%	6.7	1.5
	冠层增长率 (CGC)/(% · d ⁻¹)	10.0	4.3
	冠层衰老率 (CDC)/(% · d ⁻¹)	9.6	7.8
	最大冠层覆盖度 (CC _x)/%	97	97
根系	最大有效根深/m	0.4	1.2
蒸腾	蒸腾系数 K _{cTr}	1.2	1.3
产量	标准化水分利用效率 (WP [*])/(g · m ⁻²)	12.0	12.0
	参考收获指数 (HI ₀)/%	46	42
水分胁迫	对冠层生长影响上限 (P _{exp, upper})	0.10	0.30
	对冠层生长影响下限 (P _{exp, lower})	0.40	0.65
	对气孔开度影响上限 (P _{sto, upper})	0.50	0.70
	对加速冠层衰老影响上限 (P _{sen, upper})	0.55	0.75
温度胁迫	作物生长温度基准/℃	8.0	0
	作物生长温度上限/℃	30.0	26.0

式中 P_t ——第 t 天降水量, mm
 I_t ——第 t 天灌溉用水量, mm

表 2 稻麦轮作系统作物生育期划分

Tab.2 Crop growth period division of rice – wheat rotation system

水稻生育期	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	
日期	6 月 10—18 日	6 月 19 日—7 月 28 日	7 月 29 日—8 月 19 日	8 月 20 日—9 月 8 日	9 月 9 日—10 月 1 日	10 月 2—18 日	
冬小麦生育期	出苗期	分蘖期	越冬期	返青期	拔节孕穗期	抽穗开花期	灌浆乳熟期
日期	10 月 25 日—11 月 5 日	11 月 6 日—12 月 9 日	12 月 10 日—次年 2 月 7 日	2 月 8 日—3 月 11 日	3 月 12 日—4 月 10 日	4 月 11 日—5 月 9 日	5 月 10 日—6 月 8 日

式中 F_{t-1} ——第 $t-1$ 天田间水量, mm
 $F_{t-1}^{(b)}$ ——第 $t-1$ 天田间水量中蓝水量, mm
 $F_{t-1}^{(g)}$ ——第 $t-1$ 天田间水量中绿水量, mm

根据田间蓝绿水利用与分解构建日步长水分动态平衡方程,可求出稻麦轮作系统每日田间蓝、绿水量,即

$$\begin{cases} ET_t^{(b)} = ET_t \frac{F_{t-1}^{(b)}}{F_{t-1}} \\ ET_t^{(g)} = ET_t \frac{F_{t-1}^{(g)}}{F_{t-1}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $ET_t^{(b)}$ ——第 t 天蓝水量, mm
 $ET_t^{(g)}$ ——第 t 天绿水量, mm

稻麦轮作系统内部以蒸发蒸腾形式消耗而不能被灌域作物再次利用的灌溉水和降水量即作物蓝、绿水足迹,各组成计算方法为

$$B_{WF} = \sum_{t=1}^T ET_t^{(b)} \quad (4)$$

$$G_{WF} = \sum_{t=1}^T ET_t^{(g)} \quad (5)$$

式中 B_{WF} ——作物蓝水足迹, mm
 G_{WF} ——作物绿水足迹, mm

ET_t ——第 t 天蒸腾量, mm
 S_t ——第 t 天地表排水量, mm
 D_t ——第 t 天深层渗漏量, mm
 ΔF_t ——第 $t-1$ 天与第 t 天相比田间水层变化量, mm

作物生长期灌溉与降水分别是蓝水足迹与绿水足迹的来源,根据不同阶段灌溉水与降水资源的流入量来划分蓝绿水资源比例。由于涟水灌区降水资源丰富,种植水稻季节正好处于雨季,因此土壤初始有效水含量和初始水层划归为绿水^[32-33],田间蓝、绿水水量平衡方程计算式为

$$\begin{cases} F_t^{(b)} = F_{t-1}^{(b)} + (P_t + I_t - S_t) \frac{I_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{F_{t-1}^{(b)}}{F_{t-1}} \\ F_t^{(g)} = F_{t-1}^{(g)} + (P_t + I_t - S_t) \frac{I_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{F_{t-1}^{(g)}}{F_{t-1}} \end{cases} \quad (2)$$

T ——核算时段总时间, d

基于水足迹理论和田间水资源耗用机理,作物水足迹 (Crop water footprint, CWF) 表示作物生产过程中实际消耗的淡水资源总量^[34],且有

$$C_{WF} = B_{WF} + G_{WF} \quad (6)$$

式中 C_{WF} ——作物水足迹, mm

1.2 作物生产水足迹效率指标

作物水足迹效率主要分为作物生产水足迹和广义水系数,作物生产水足迹 (Crop production water footprint, CWFp) 用作物水足迹和产量比值来计算,衡量作物对水资源的利用效率,计算式为

$$C_{WFP} = 10 \frac{C_{WF}}{Y} \quad (7)$$

$$B_{WFP} = 10 \frac{B_{WF}}{Y} \quad (8)$$

$$G_{WFP} = 10 \frac{G_{WF}}{Y} \quad (9)$$

式中 C_{WFP} ——作物生产水足迹, m³/hm²
 B_{WFP} ——作物生产蓝水足迹 (BWFP), m³/hm²
 G_{WFP} ——作物生产绿水足迹 (GWFP), m³/hm²
 Y ——作物单产, kg/hm²

由于水稻和小麦在单位质量下所含有能量值不同,为了能在同一框架内反映不同作物在轮作系统中生产能力的差异,采用标准化方法,将轮作系统水稻和小麦折合总产出以总能量表示,即 CWF_P 单位为 m³/J,用以反映水足迹产出能力。通过查询《中国食物成分表》可知,每 100 g 稻米和小麦能量分别为 1 429 kJ 和 1 482 kJ。

广义水系数 (GE) 是衡量广义水资源 (有效降水量 P 与灌溉水量 I 之和) 被作物有效利用程度的指标^[14],GE 着重于评估作物对整体水资源的利用效率,从根本上反映农业生产活动对水资源的综合利用情况。相比于传统的灌溉水利用系数能更全面地评估作物的水分利用效率,表示为作物蒸散量 (ET) 与广义水资源比值,即

$$GE = ET / (P + I)$$

(10)

1.3 演变趋势及其驱动力分析

分别采用 Mann-Kendall (M-K) 检验方法和通径分析来研究作物水足迹效率演变趋势及其驱动力。M-K 检验是由世界气象组织推荐的一种非参数统计检验方法,它不仅可以揭示时间序列的总体趋势,还可以检验突变发生的时间、次数以及变化幅度,因其适用性强、计算方便已经被广泛应用于预测降水、径流、气温和水质等水文气象时间序列资料的长期变化趋势中^[35-36]。其中 Z 值表示标准化统计量,一般用 UB 和 UF 来表示待检验的时间序列。农作物水足迹效率受多种因素的影响,结合相关研究成果和研究区域的实际情况^[26,37-39],分析不同因素对稻麦轮作系统农作物水足迹的影响,从气候和农业生产方面选取 10 个因素,采用通径分析方法分析多个自变量与因变量之间的线性关系,其中自变量分别为相对湿度 (X_1)、风速 (X_2)、气温 (X_3)、日照时数 (X_4)、降水量 (X_5)、农业机械动力 (X_6)、农药使用量 (X_7)、化肥施用量 (X_8)、节水灌溉面积占比 (X_9)、有效灌溉面积占比 (X_{10}),以水分利用效率指标 (广义水系数、作物生产水足迹) 为因变量,利用 R 语言进行通径分析^[31-32]。

1.4 研究区域及数据来源

涟水灌溉区地处江苏省北部、淮河下游、淮安东北部,东经 118°59′~119°46′,北纬 33°39′~34°07′,由淮涟、涟东、涟西 3 个灌溉片区组成。作物播种面积约 1.25 × 10⁶ hm²。全年总日照时数为 2 418 h,多年平均气温为 14℃ 左右,年均降水量 1 014.6 mm。选取水稻、小麦构成的稻麦轮作系统为研究对象,2000—2019 年为水足迹效率驱动力分析年份。日照时数、降水量、温度、相对湿度和风速等气象资料来源于涟水县水利科学试验站气象站点数据。灌溉

区年作物产量、播种面积、灌溉效率均来自于灌区管理部门统计数据;作物生育期资料主要来自农业观测站观测资料,作物生育期在不同年份采用同一数值。由全国、淮安市和涟水县以及涟水县水利科学试验站统计年鉴数据整理得到研究区 2000—2019 年耕地面积、作物播种面积、有效灌溉面积、节水灌溉面积、农业机械动力、农药使用量及农业化肥施用量,同时部分年份缺失的数据通过时间序列插补延长的方法获得。

2 结果与分析

2.1 稻麦轮作系统作物水足迹效率及其演变特征

广义水系数用于对蓝、绿水资源有效利用度测度,作物水足迹用于对蓝、绿水资源生产能力评价,两者结合可以综合说明农业生产系统中的作物-水分关系,弥补了当前水资源评价系统中评价对象单一的不足,这也是科学进行区域水资源管理的前提。涟水灌区 1960—2019 年稻麦轮作系统广义水系数变化趋势及其 M-K 检验如图 1 所示。

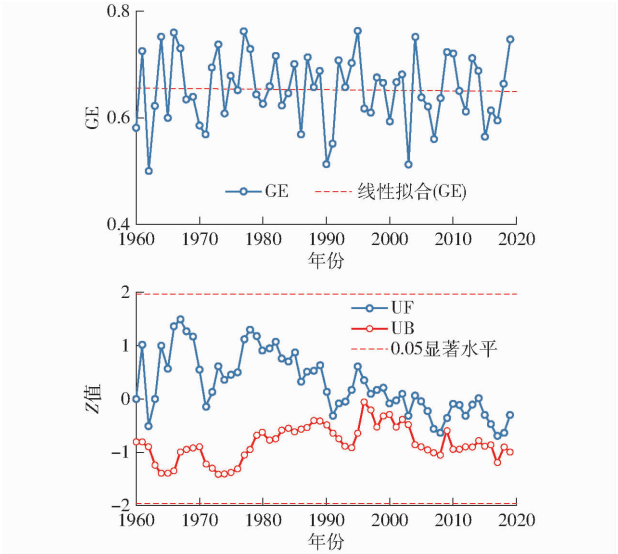


图 1 1960—2019 年稻麦轮作系统广义水系数及 M-K 检验

Fig.1 Generalized water coefficient and M-K test of rice-wheat rotation system from 1960 to 2019

1960—2019 年稻麦轮作系统广义水系数变化范围为 0.5~0.76,多年平均值为 0.65。变化过程呈缓慢波动下降趋势,且 1960—2019 年变化趋势不显著。其中广义水系数最大值和最小值对应的年份为 1966 年和 1962 年。UF 值变化范围为 -0.70~1.48,未达到显著水平。这表明随着时间的推移,作物单位产量广义水资源效率逐渐降低。然而,这一下降趋势并不明显,表明其他影响因素可能对水资源效率产生了影响。技术进步和灌溉管理提升促进了水资源效率的提高,但可能被其他限制因子所抵

消。广义水系数在 1966 年达到最高值,而在 1962 年达到最低值,这可能是由于极端气候条件或农业政策调整所引起。

基于产出能力的同一化处理,1960—2019 年稻麦轮作系统作物生产水足迹变化过程呈波动下降趋势(图 2,上图中虚线为线性拟合线),由 1960 年的 $62.6\text{ m}^3/\text{GJ}$ 下降到 2019 年的 $48.5\text{ m}^3/\text{GJ}$,且线性下降趋势为 $0.2904\text{ m}^3/(\text{GJ}\cdot\text{a})$,其最小值和最大值分别为 2014 年的 $43.1\text{ m}^3/\text{GJ}$ 和 1967 年的 $78.4\text{ m}^3/\text{GJ}$,年均值为 $58.4\text{ m}^3/\text{GJ}$ 。

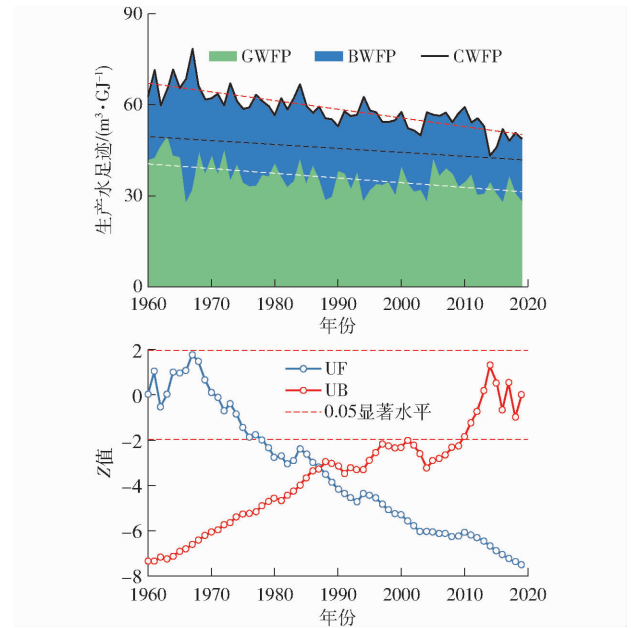


图 2 1960—2019 年稻麦轮作系统作物生产水足迹及 M-K 检验

Fig. 2 Water footprint and M-K test of crop production in rice-wheat rotation system from 1960 to 2019

同时,稻麦轮作系统单位能量水足迹的 M-K 检验值为 -7.48 ,这说明研究时段内其下降趋势达到显著水平($P < 0.05$)。具体地,轮作系统作物生产水足迹在 1960—1961 年和 1964—1970 年呈正向增长趋势,在 1971—2019 年呈负向下降趋势;UF 和 UB 曲线在 1987 年存在交点,表明 1987 年是轮作系统作物生产水足迹发生突变的关键时期。同时 1978 后 UF 统计量值均小于 -1.96 ,是其下降趋势呈现显著水平的起始点。稻麦轮作系统生产蓝、绿水足迹均呈下降趋势,这表明稻麦轮作系统用水效率整体提升。这是由于涟水灌区农业政策调整,灌区供水条件和管理模式有了极大改善,提高了水分利用效率所引起的。作物生产绿水足迹年均值为 $35.8\text{ m}^3/\text{GJ}$,占作物生产水足迹的 $40.6\% \sim 80.4\%$,且逐年增长趋势明显,降水对于作物生长的重要性不可忽视,最小值和最大值分别为 2016 年的 $27.9\text{ m}^3/\text{GJ}$ 和 1963 年的 $49.6\text{ m}^3/\text{GJ}$;蓝水足迹变

化范围为 $8.5 \sim 46.6\text{ m}^3/\text{GJ}$,最小值和最大值分别出现在 2014 年和 1967 年,蓝水足迹随时间推移表现出更显著的下降趋势。

2.2 作物水足迹效率潜在影响因素时间演变规律

基于农业生产-水资源关系的核算方法,水资源有效利用程度及其产出能力是衡量田间水分利用效率的主要途径,通过以往研究和生产实践表明^[12,33],这是由作物生长过程中水资源消耗量和单位面积产量共同决定的,气象因素和社会生产要素是主要的影响因子。本研究中采用的分析年份为 2000—2019 年,气象因素随时间演变规律不明显,因此本部分主要分析社会生产要素随时间的演变规律。2000—2019 年各社会生产因素变化过程如图 3 (图中虚线为线性拟合线)所示。

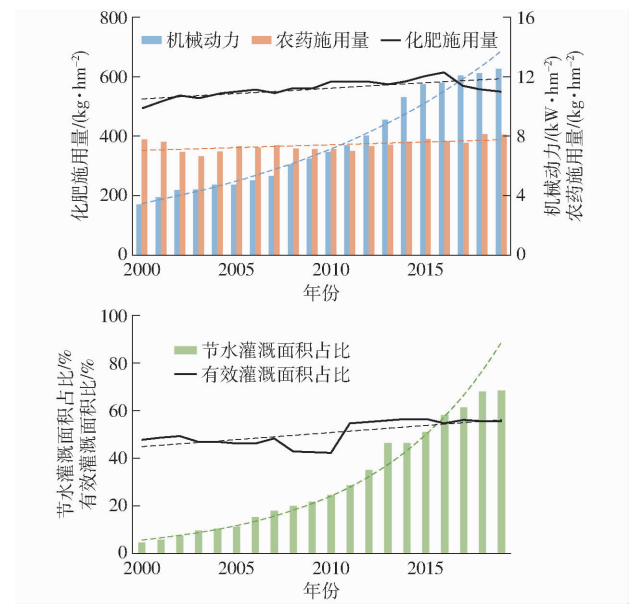


图 3 2000—2019 年社会生产要素演变过程

Fig. 3 Evolution of factors of social production from 2000 to 2019

过去 20 年研究区域内各农业生产资料投入量均呈增长趋势,其中农业机械化动力消耗量由 2000 年的 $3.40\text{ kW}/\text{hm}^2$ 增加到 2019 年的 $12.52\text{ kW}/\text{hm}^2$,增长了近 4 倍,农业机械化有助于减轻劳动强度,提高了该地区的农业生产效率及单位面积产量。农药使用量的变化过程相对稳定,多年平均值为 $7.39\text{ kg}/\text{hm}^2$,其增长趋势也相对平缓,并且随着近年来人们对面源污染问题的重视程度增加,涟水灌区加强了水环境的治理并且严格管控化肥施用量,化肥施用量近几年开始逐渐降低,由 2017 年的 $569.09\text{ kg}/\text{hm}^2$ 减少到 2019 年的 $549.20\text{ kg}/\text{hm}^2$,但总体仍呈增长趋势。此外,有效灌溉面积占比和节水灌溉面积占比是反映区域灌溉水平的重要参数,由图 3 可知,2000—2019 年研究区域农业生产灌溉

水平得到明显改善,有效灌溉面积占比和节水灌溉面积占比均呈现显著增长趋势,特别是节水灌溉面积占比由 2000 年的 4.6% 上升到 2019 年的 68.4%,在 2011—2012 年 年增长率超过 10%。说明研究区域稻麦轮作系统作物生产水足迹的降低主要是在增加农业生产资料投入量和改善区域灌溉水平的情况下实现的。

2.3 作物水足迹效率驱动因素分析

农业水足迹效率受多种因素的影响,结合相关研究成果和研究区域的实际情况,从气候和农业生产方面选取 10 个因素,以水分利用效率指标(广义水系数、作物生产水足迹)为因变量,进一步划分各气象因素和社会生产因素对稻麦轮作系统作物水分利用效率的直接和间接影响,表 3 为稻麦轮作系统广义水系数的驱动力分析。

表 3 稻麦轮作系统广义水系数驱动力分析
Tab.3 Driving force analysis of generalized water coefficient in rice – wheat rotation system

因子	直接通 径系数	间接通径系数					通径 系数
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
X_1	-0.266		0.018	-0.008	0.055	-0.079	-0.280
X_2	-0.027	0.175		0.011	-0.027	-0.202	-0.070
X_3	0.081	0.027	-0.004		-0.031	-0.053	0.020
X_4	-0.093	0.157	-0.008	0.027		0.238	0.321
X_5	-0.880	-0.024	-0.006	0.005	0.025		-0.880

表 3 为轮作系统周期内各气象因子对 GE 的直接、间接和总影响,直接通径系数绝对值从大到小依次为降水量(X_5)、相对湿度(X_1)、日照时数(X_4)、气温(X_3)、风速(X_2),气温对 GE 产生正向作用,其他气象参数则呈现负向影响。特别地,相对湿度、风速、降水量对 GE 的直接和间接影响一致,而气温和日照时数对 GE 的直接和间接影响相反。相对湿度和降水量对 GE 的影响主要表现为直接作用,而风

速和日照时数主要是通过降水量对 GE 起间接作用。各气象因素对广义水系数的直接和间接作用明显,其中降水量的总体影响最为显著,主要是通过直接作用实现,而相对湿度、风速、气温和日照时数主要通过降水量起间接作用。由此可见,降水量是影响作物水分有效利用程度的关键因素,虽然涟水灌区水量较为丰沛,年降水量超过 1 000 mm^[12],但仍然存在季节性供水矛盾突出,汛期旱涝急转频发等严峻问题,因此选取合适的种植季节,合理分配降水资源以提升水资源效率是解决问题的关键。

表 4 为轮作系统周期内各影响因子对作物生产水足迹的直接、间接和总影响,直接通径系数绝对值从大到小依次为农业机械化动力(X_6)、节水灌溉面积占比(X_9)、相对湿度(X_1)、风速(X_2)、农药使用量(X_7)、日照时数(X_4)、化肥施用量(X_8)、有效灌溉面积占比(X_{10})、气温(X_3)、降水量(X_5),其中相对湿度、气温、降水量和农业机械化动力对作物生产水足迹起负向作用,而其他影响因子的影响均表现为正向。农业机械化动力和节水灌溉面积占比的直接通径系数分别为 -1.309 和 0.751,两者对作物生产水足迹的影响最为显著。其中农业机械化动力的直接通径系数为负值,说明农业机械化程度的提高改善了作物田间管理水平,更精准地进行灌溉工作,保证作物的水分需求,作物单产有所提升,进而降低了作物生产所需的蓝、绿水足迹。由表 4 可知,农业机械化动力、农药施用量和节水灌溉面积占比对作物生产水足迹的影响主要表现为直接作用,而相对湿度、风速、日照时数除了对作物生产水足迹有直接影响,还通过农业机械化动力和节水灌溉面积占比对作物生产水足迹起间接作用。就总影响而言,相对湿度是影响最为显著的气象参数,且各社会生产因素均表现负向作用,其中农业机械化动力和节水灌溉面积占比是各影响因子间接表达作用的主要

表 4 稻麦轮作系统作物生产水足迹驱动力分析
Tab.4 Driving force analysis of crop water footprint in rice-wheat rotation system

因子	直接 通径系数	间接通径系数										通径 系数
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
X_1	-0.408		-0.233	0.007	-0.171	-0.002	-0.550	0.178	-0.008	0.315	0.112	-0.760
X_2	0.353	0.269		-0.010	0.084	-0.006	0.589	-0.140	-0.025	-0.323	-0.092	0.700
X_3	-0.069	0.041	0.049		0.096	-0.001	-0.223	0.112	-0.005	0.180	0.000	0.180
X_4	0.290	0.241	0.102	-0.023		0.006	0.602	-0.051	-0.049	-0.308	-0.081	0.730
X_5	-0.024	-0.037	0.081	-0.004	-0.078		0.236	-0.019	-0.029	-0.135	-0.011	-0.020
X_6	-1.309	-0.171	-0.159	-0.012	-0.133	0.004		0.172	0.108	0.744	0.116	-0.640
X_7	0.319	-0.229	-0.155	-0.024	-0.046	0.001	-0.707		-0.005	0.428	0.078	-0.340
X_8	0.169	0.020	-0.053	0.002	-0.084	0.004	-0.838	-0.010		0.443	0.066	-0.280
X_9	0.751	-0.171	-0.152	-0.016	-0.119	0.004	-1.296	0.182	0.100		0.118	-0.600
X_{10}	0.153	-0.298	-0.212	0.000	-0.154	0.002	-0.995	0.162	0.073	0.578		-0.690

媒介。由此可见,促进农业机械化发展以及改善区域灌溉水平,尤其节水灌溉技术的推广是提高作物水分生产效率的重要途径,而这也是我国高标准农田建设中“通过土地整治、节水灌溉、‘适机化’改造以及推广绿色农业技术,形成规模化农田、机械化耕作、顺畅化排灌,以提高农业生产效率、降低环境污染”的本质要求。

3 讨论

稻麦轮作系统是我国重要的农作物生产系统之一^[40],针对该系统的作物水足迹效率进行研究能够为农业水资源管理与作物生产的可持续性提供科学依据。本研究通过对稻麦轮作系统中水稻和小麦的生长周期水足迹进行量化并分析其效率,进一步探讨了影响水足迹效率的关键驱动因素。

稻麦轮作系统广义水系数变化范围为 0.50 ~ 0.76,多年平均值为 0.65。其变化趋势缓慢下降,但变化不显著。灌溉和农业实践的改进可能提高了灌溉水的使用效率,但气候变化带来的降水量增加和蒸发量变化对广义水资源效率产生反作用^[41]。此外,土地利用变化,如城市化导致的农田面积减少,以及政策变动,也可能对稻麦轮作系统广义水系数的波动产生影响^[34]。广义水系数最大值和最小值分别出现在 1966 年和 1962 年,这主要是极端气候条件和农业政策的调整所导致。并且,尽管有些年份表现出明显的波动,但长期来看系统的水资源利用效率变化并不大。

涟水灌区稻麦轮作系统作物生产水足迹长期呈下降趋势,作物生产水足迹由 1960 年的 62.6 m³/GJ 下降到 2019 年的 48.5 m³/GJ,年均值为 58.4 m³/GJ,其中蓝水足迹下降趋势显著,而绿水足迹占比逐年攀升。这表明了涟水灌区在过去几十年的农业生产活动中,水资源利用效率得到了明显提升。结合驱动因素分析可知,降水对于作物生长的重要性不可忽视,合理利用降水资源,根据当地气候特点优化种植结构是该地区提高水足迹效率的重要因素。并且随着涟水地区经济的发展,农民收入增加,用于农业生产的投入也随之加大,节水灌溉技术得到了有效推广、合理增加了农业生产资料的投入量、区域灌溉水平得到了极大改善^[25,30],在此基础上,蓝水资源的

效率有了较大程度提升,为该地区实现水资源的可持续利用提供了必要保障。另一方面,气象因素对作物生产水足迹具有显著影响,相对湿度和降水量与广义水系数呈负相关,说明在较低的相对湿度和降水环境下,作物蒸腾蒸发速率降低,对水资源的需求量减少,而降水的增加增加了总水资源投入量,从而降低了作物广义水系数。涟水灌区地处江淮一带,气候湿润,水稻种植季节与雨季重合,高温热害频发。因此,提升作物对不利气象条件的适应性,如开发抗旱耐淹作物品种、优化种植时序以适应可能的气象变化,是提升水足迹效率的重要途径之一^[27]。

综上所述,为了提高稻麦轮作系统的水足迹效率,必须采取综合措施,包括推广节水灌溉技术、优化作物种植结构、改进土壤管理和农田保水能力,以及提高农业技术水平。同时,应对气候变化带来的挑战做出适应性策略,通过这些策略的实施,可以有效提升作物的水足迹效率,从而促进涟水灌区乃至江淮地区的水资源保护、粮食安全和农业可持续发展。

4 结论

(1)1960—2019 年涟水灌区稻麦轮作系统广义水系数变化范围为 0.50 ~ 0.76,多年平均值为 0.65,变化过程呈缓慢波动下降趋势但变化趋势不显著。

(2)作物生产水足迹整体呈下降趋势,其变化范围为 43.1 ~ 78.4 m³/GJ,年均值为 58.4 m³/GJ;作物生产绿水足迹年均值为 35.8 m³/GJ,而蓝水足迹多年均值为 22.6 m³/GJ。长期来看,绿水为稻麦轮作系统作物生产的主要水资源类型,绿水足迹在作物生产水足迹中占比逐年增加;蓝水足迹下降趋势显著,是作物生产水足迹降低的主要原因。

(3)广义水系数与相对湿度、降水量和风速呈负相关,与气温和日照时数呈正相关。除了受气象因素影响外,农业生产资料投入量、区域灌溉水平是作物生产水足迹的主要驱动因子,同时二者也是涟水灌区水足迹效率提高的关键因素。提高降水利用率、开发抗旱耐淹作物品种以及优化作物种植结构,是涟水灌区提高水资源利用效率的有效方法。

参 考 文 献

[1] UN WWDR. Water and climate change[M]. UNESCO, 2020.

[2] 康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金, 2016, 30(3): 208 - 212.

KANG Shaozhong, HUO Zailin, LI Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016, 30(3): 208 - 212. (in Chinese)

- [3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2021[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- [4] 姜庆飞, 张营. 我国农业节水灌溉现状及发展对策浅析[J]. 海河水利, 2022(5): 1-4.
- [5] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- [6] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19: 4877-4891.
- [7] 刘涛, 崔永正, 李继霞. 基于水污染视角的中国农业生态用水效率及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 301-307.
- LIU Tao, CUI Yongzheng, LI Jixia. Ecological use efficiency of agricultural water and its influencing factors in China based on the perspective of water pollution[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 301-307. (in Chinese)
- [8] 吴强, 刘汗. 我国新型城镇化进程中水问题及对策[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 104-109.
- WU Qiang, LIU Han. Water problems and countermeasures during the process of new urbanization in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 104-109. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [10] JING Q, VAN KEULEN H, HENGSDIJK H. Modeling biomass, nitrogen and water dynamics in rice-wheat rotations[J]. Agricultural Systems, 2010, 103(7): 433-443.
- [11] JIN Z, ZHAGN L, LIU H, et al. Energy assessment of different rice-wheat rotation systems[J]. Food and Energy Security, 2021, 10(2): 394-405.
- [12] 何昊, 李丹丹, 吴泽, 等. 长江中下游地区排水对稻麦轮作系统 N_2O 排放以及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(4): 652-658.
- HE Hao, LI Dandan, WU Ze, et al. Effects of drainage on N_2O emission and yield of rice-wheat rotation system in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(4): 652-658. (in Chinese)
- [13] GRAFTON R, WILLIAMS J, PERRY C, et al. The paradox of irrigation efficiency[J]. Science, 2018, 361(6404): 748-750.
- [14] 操信春, 任杰, 吴梦洋, 等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1-8.
- CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese)
- [15] ALAYA M M, HOEKSTRA A Y. The water needed for Italians to eat pasta and pizza[J]. Agricultural Systems, 2010, 103: 351-360.
- [16] PFISTER S, BAYER P, KOEHLER A, et al. Projected water consumption in future global agriculture: scenarios and related impacts[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409: 4206-4216.
- [17] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade[C]// Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft, 2003.
- [18] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(21): 12860-12868.
- [19] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, MEKONNEN M M, 等. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等译. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] CASTELLANOS M T, CARTAGENA M C, REQUEJO M I, et al. Agronomic concepts in water footprint assessment: a case of study in a fertirrigated melon crop under semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 170: 81-90.
- [21] 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 184-192.
- FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184-192. (in Chinese)
- [22] WU M, LI Y, XIAO J, et al. Blue, green, and grey water footprints assessment for paddy irrigation-drainage system[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: 114116.
- [23] 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 Bianbian, ZHUO La, YANG Xi, 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. (in Chinese)
- [24] 佟佳骏, 孙世坤, 马佳乐, 等. 区域粮食虚拟水流动经济社会影响效应分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 345-356.
- TONG Jiajun, SUN Shikun, MA Jiale, et al. Analysis of socio-economic driving effect of regional grain virtual water flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 345-356. (in Chinese)
- [25] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2006, 60: 186-203.
- [26] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2007, 64: 109-118.
- [27] CHEN M, LINKER R, WU C, et al. Multi-objective optimization of rice irrigation modes using ACOP-Rice model and historical meteorological data[J]. Agricultural Water Management, 2022, 272: 107823.

[28] 陈脩, 黄彬香, 潘志华, 等. 西南地区单季稻高温热害时空变化特征及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 27–38.
CHEN Xiao, HUANG Binxiang, PAN Zhihua, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of high temperature damage of single-cropping rice in Southwest China[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(1): 27–38. (in Chinese)

[29] CAO X, ZENG W, WU M, et al. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127371.

[30] 郭萍, 赵敏, 张妍, 等. 基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 346–357.
GUO Ping, ZHAO Min, ZHAGN Yan, et al. Optimization and evaluation of multi-objective planting structure in Hetao Irrigation District based on water footprint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 346–357. (in Chinese)

[31] 吴梦洋, 操信春, 任杰. 灌排模式对稻田作物水足迹的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 256–262.
WU Mengyang, CAO Xinchun, REN Jie. Effects of irrigation and drainage modes on crop water footprint in rice production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 256–262. (in Chinese)

[32] 裔传祥, 周宏伟, 黄维, 等. 江苏水稻关键生育期低温冷害的气候特征分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(增刊 1): 166–170.
YI Chuanxiang, ZHOU Hongwei, HUANG Wei, et al. Analysis on climatic characteristics of the cold damage in key rice development in Jiangsu Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(Supp. 1): 166–170. (in Chinese)

[33] CAO X C, WANG Y B, WU P, et al. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 529: 10–20.

[34] 李玥瑶, 吴梦洋, 操信春, 等. 稻田水资源利用效用的灌排模式响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 213–219, 227.
LI Yueyao, WU Mengyang, CAO Xinchun, et al. Experimental study on effect of irrigation mode on generalized water resources utility in paddy rice field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 213–219, 227. (in Chinese)

[35] 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: 1577–1600.

[36] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The temporal and spatial variability of water footprint of grain: a case study of an irrigation district in China from 1960 to 2008[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10: 1246–1251.

[37] NANA E, CORBARI C, BOCCHIOLA D. A model for crop yield and water footprint assessment: study of maize in the Po valley[J]. Agricultural Systems, 2014, 127: 139–149.

[38] CAO X C, WANG Y B, WU P, et al. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 529: 10–20.

[39] ZENG W, CAO X, HUANG X, et al. Water resource use and driving forces analysis for crop production in China coupling irrigation and water footprint paradigms[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(24): 36133–36146.

[40] KARANDISH F, ŠIMUNEK J. A comparison of the HYDRUS (2D/3D) and SALTMED models to investigate the influence of various water-saving irrigation strategies on the maize water footprint[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 809–820.

[41] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Grey water footprint reduction in irrigated crop production: effect of nitrogen application rate, nitrogen form, tillage practice and irrigation strategy[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(6): 3245–3259.