

黄河流域农业灰水足迹效率时空格局演变与驱动因素

郭玮¹, 胡西武^{1,2}

(1.青海民族大学 经济与管理学院, 青海 西宁 810007;

2.天津大学—青海民族大学 双碳研究院, 青海 西宁 810007)

摘要: [目的] 探讨农业灰水足迹效率时空格局演变与驱动因素, 为协同推进农业用水节约集约和水污染综合治理、实现黄河流域农业高质量发展提供科学参考。[方法] 以黄河流域9省区为研究对象, 利用灰水足迹模型、泰尔指数和对数平均迪氏指数等研究方法对2000—2021年农业灰水足迹效率进行测算, 并探讨其时空演变格局和驱动因素。[结果] ①2000—2021年黄河流域农业灰水足迹效率呈上升趋势, 年均效率为0.2358元/m³, 内蒙古效率最高为0.4670元/m³, 青海效率最低为0.0263元/m³。②农业灰水足迹效率地区内部差距多年平均贡献率为80.11%, 上游地区差距年均贡献率为75%, 是造成黄河流域农业灰水足迹效率差距较大的主要原因。③黄河流域农业灰水足迹效率总效应为正向效应0.2024元/m³, 耕地资源效应和农业环境效应分别是促进和抑制农业灰水足迹效率的主要因素, 二者贡献值分别为0.4427和-0.4406元/m³。④黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应可分为4种模式, 不同模式地区提升农业灰水足迹效率的方式不同。[结论] 黄河流域9省区应采用因地制宜的发展策略, 优化农业结构, 减少化肥农药的高强度使用, 加强农业水环境治理, 提升农业灰水足迹效率。

关键词: 农业灰水足迹; 灰水足迹效率; 泰尔指数; 驱动因素; 黄河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0437-09

中图分类号: TV213.4, F323.21

文献参数: 郭玮, 胡西武. 黄河流域农业灰水足迹效率时空格局演变与驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 437-445. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.043; Guo Wei, Hu Xiwu. Spatial-temporal pattern evolution and driving factors of agricultural grey water footprint efficiency in Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 437-445.

Spatial-temporal Pattern Evolution and Driving Factors of Agricultural Grey Water Footprint Efficiency in Yellow River Basin

Guo Wei¹, Hu Xiwu^{1,2}

(1.College of Economics and Management, Qinghai Minzu

University, Xining, Qinghai 810007; 2.Institute for Carbon Peaking and Carbon

Neutrality, Tianjin University-Qinghai Minzu University, Xining, Qinghai 810007)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal pattern evolution and driving factors of agricultural grey water footprint efficiency were explored in order to provide a scientific reference for promoting agricultural water conservation and comprehensive water pollution control, and high-quality agricultural development in the Yellow River Basin. [Methods] A grey water footprint model, the Theil index, and the log-average Dietscher index were used to estimate the efficiency of agricultural grey water footprint for nine provinces in the Yellow River basin from 2000 to 2021, and the spatial-temporal evolution pattern and driving factors were discussed. [Results] ① The agricultural grey water footprint efficiency during 2000—2021 in the Yellow River basin showed an overall upward trend over time, with an average annual efficiency of 0.2358 yuan/m³. Inner

收稿日期: 2023-07-10

修回日期: 2023-09-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“聚落景观基因重构、空间剥夺及其对生态移民返乡行为的作用机理研究: 以三江源地区为例”(42061033); 青海省“揭榜挂帅”重大社科项目“现代化新青海建设背景下走好生态保护和民生改善双赢之路研究”(JB2301); 青海省级哲学社会科学重点项目“青海省科学有序推进碳达峰碳中和研究”(22ZD001)

第一作者: 郭玮(1997—), 男(汉族), 山西省怀仁市人, 硕士研究生, 研究方向为青藏高原生态经济与资源开发。Email: 1261072894@qq.com。

通信作者: 胡西武(1973—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 博士, 教授, 主要从事生态经济学与气候变化经济学研究。Email: huxiwu1973@163.com。

Mongolia had the highest efficiency (0.467 0 yuan/m³), and Qinghai had the lowest efficiency (0.026 3 yuan/m³). ② The annual average contribution rate of the regional gap in agricultural grey water footprint efficiency was 80.11%, and the annual contribution rate of the upstream gap was 75%, which was the main reason for the large gap in agricultural grey water footprint efficiency in the Yellow River basin. ③ The total effect of agricultural grey water footprint efficiency was 0.202 4 yuan/m³, and the cultivated land resource effect and agricultural environment effect were the main factors in promoting and inhibiting the agricultural grey water footprint efficiency, with contribution values of 0.442 7 yuan/m³ and -0.440 6 yuan/m³, respectively. ④ The driving effect of agricultural grey water footprint efficiency in the Yellow River basin can be divided into four models. Different models have different ways of improving agricultural grey water footprint efficiency in different regions. [Conclusion] The nine provinces in the Yellow River basin should adopt different development strategies according to local conditions, optimize the agricultural structure, reduce the intensive use of fertilizers and pesticides, strengthen agricultural water management, and improve agricultural grey water footprint efficiency.

Keywords: agricultural grey water footprint; grey water footprint efficiency; Theil index; driving factors; the Yellow River basin

党的“二十大”指出要“加快建设农业强国”,农业的高质量发展对确保粮食安全和促进乡村振兴有重要作用。党的“十八大”以来,习近平总书记多次调研黄河 9 省区并两次主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会,发表了一系列重要讲话和指示,强调黄河流域地区间发展差距明显,水资源短缺与生态脆弱问题突出,农业生产用水粗放与农业面源污染治理问题是制约黄河流域农业高质量发展的关键问题。因此,统筹优化流域农业用水量,强化农业水环境污染治理,是推进黄河流域农业高质量发展和实现人与自然和谐共生的中国式现代化的现实需要。

科学评价农业水质状况是否符合环境质量标准是农业水环境综合治理的首要任务。农业水质评价方法主要有综合指数法^[1]、主成分分析法^[2]、模糊支持向量综合评价模型^[3]、三维水动力水质模型^[4]、投影寻踪函数和云模型等^[5]多种方法。以上方法可以定量评价农业水质状况,但在评价指标的选择和赋权上存在一定主观性,不能真实反映农业生产活动中的面源污染,且未联系水质对水量的影响,而灰水足迹模型则可以解决这一问题。

灰水足迹是指将一定的污染物负荷吸收至现有环境水质标准所需要的水资源量,即吸收人类活动产生的污水所需要的水资源量,该方法结合水资源消耗与水污染综合评价区域农业水质状况,可以较好地反映农业活动对水环境的影响。目前农业灰水足迹研究已取得大量成果,研究区域涵盖全国^[6]、流域^[7]、省域等^[8]多个空间尺度,相关指标评价主要为农业灰水足迹与经济增长脱钩水平测度及驱动因素分析^[9]、农业灰水足迹强度^[10]和效率^[11]分析,研究视角多为狭

义种植业灰水足迹测算^[12],内容较为单一。

黄河流域以占全国 2% 的河川径流量,支撑着全国 12% 人口和 15% 耕地的用水需求,是中国重要的粮食主产区之一,在中国经济社会发展中发挥着重要作用。当前黄河流域存在中上游水土流失严重、中下游水质较差、流域用水供需矛盾突出等问题,提升农业灰水足迹效率对推动黄河流域农业高质量发展和保障国家粮食安全意义重大。但黄河流域农业灰水足迹效率时空格局演变规律和驱动因素尚不明确,这直接影响黄河流域农业生态保护和高质量发展。基于此,本文以黄河流域 9 省区为研究对象,综合种植业和畜禽养殖业灰水足迹模型测算农业灰水足迹效率,进而通过泰尔指数分析农业灰水足迹效率的地区差异,运用对数平均迪氏指数模型探讨农业灰水足迹效率的驱动因素,以期协同推进农业用水节约集约和水污染综合治理、实现黄河流域农业高质量发展提供决策参考。

1 研究区概况

黄河流域横跨中国东中西部(图 1),呈“几”字形流经青海等 9 省区,是中国重要的农产品主产区和畜牧业基地,粮食和肉类产量占全国 1/3 左右。流域多年平均水资源总量 6.47×10^{10} m³,农业用水占用水总量的 66.9%,水质总体劣于全国平均水平^[13]。流域气候差异显著,随地形三级阶梯自西向东由冷变暖,降水量分布不均,大部分地区年降水量在 200~650 mm 之间,中上游南部和下游地区多于 650 mm,南北降雨量之比大于 5,冬干春旱,夏秋多雨,年降水量的最大值与最小值之比约为 1.7~7.5。2021 年黄

河流域 9 省区农业用水量为 $7.79 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 占全国比重为 21.38%, 同期农业总产值为 4.53×10^{12} 元, 占全国的比重为 30.85%。

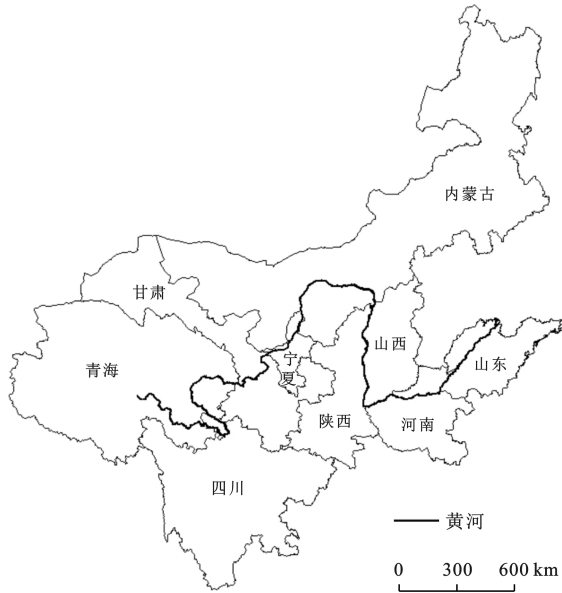


图 1 黄河流域地理位置

Fig.1 Geographical location of Yellow River basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

考虑到数据可获得性, 本文将黄河流域 9 省区作为研究对象, 氮肥施用量、畜禽数量、农业总产值、农产品产量、农业耕地面积和农业劳动力人口数来源于 2001—2022 年各省(自治区)统计年鉴和《中国统计年鉴》。畜禽养殖周期、排泄系数、单位粪便和尿液污染物含量以及污染物流失率数据来源于《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》。其中, 氮肥淋失率取全国平均值 7%^[14], 水资源的自然本底浓度 C_{nat} 为 0^[15], 污染物浓度 C_{max} 根据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》Ⅲ类水质确定总氮和化学需氧量的最大允许排放值^[16]。牛、羊数量取年末存栏量, 猪、禽类数量取年末出栏量^[17], 农业总产值以 2000 年为基期, 采用平减指数法换算成可比价格进行计算。

2.2 研究方法

2.2.1 农业灰水足迹效率测算 农业灰水足迹主要包括种植业灰水足迹和畜禽养殖业灰水足迹。其中, 种植业灰水足迹为农业生产过程中残留的化肥和农药, 选取氮肥作为水污染指标, 依据氮肥淋失率确定进入水体的氮含量并计算灰水足迹。畜禽养殖业灰水足迹为猪、牛、羊、家禽粪便排放产生的水污染, 由

于废水中含有多种形式的污染物, 所以选取单位粪便中所占比重较大的化学需氧量(COD)和总氮(TN)为水污染指标, 考虑到水体可以同时稀释这两种污染物, 故本文以 COD 和 TN 为标准分别计算灰水足迹, 选取两者中的较大值衡量畜禽养殖业灰水足迹^[18]。计算公式为:

$$V_{\text{pla}} = \frac{\alpha \cdot A}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (1)$$

$$V_{\text{bre}} = \max[V_{\text{bre}}(\text{COD}), V_{\text{bre}}(\text{TN})] \quad (2)$$

$$V_{\text{bre}}(i) = \frac{L_{\text{bre}}(i)}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (3)$$

$$L_{\text{bre}}(i) = \sum_{h=1}^4 [N_h \cdot D_h \cdot (f_h \cdot p_{\text{hf}} \cdot \beta_{\text{hf}} + u_h \cdot p_{\text{hu}} \cdot \beta_{\text{hu}})] \quad (4)$$

$$V_{\text{agr}} = \max[V_{\text{bre}}(\text{COD}), V_{\text{pla}}(\text{TN}) + V_{\text{bre}}(\text{TN})] \quad (5)$$

式中: V_{pla} 为种植业灰水足迹 (m^3); α 为氮肥淋湿率 (%); A 为氮肥施用量 (kg); C_{max} 为污染物水质标准浓度 (kg/m^3); C_{nat} 为水资源的自然本底浓度 (kg/m^3)。 V_{bre} 为畜禽养殖业灰水足迹 (m^3); $V_{\text{bre}}(\text{COD})$ 为化学需氧量灰水足迹 (m^3); $V_{\text{bre}}(\text{TN})$ 为总氮灰水足迹 (m^3); $L_{\text{bre}}(i)$ 为化学需氧量或总氮的排放量 (kg); N_h 为 4 类畜禽数量; D_h 为畜禽养殖周期 (d); f_h, u_h 分别为畜禽的日排粪量和日排尿量 (kg/d); $p_{\text{hf}}, p_{\text{hu}}$ 分别为单位粪便和尿液的污染物含量 (kg/kg); $\beta_{\text{hf}}, \beta_{\text{hu}}$ 分别为单位粪便和尿液的污染物流失率 (%); V_{agr} 为农业灰水足迹 (m^3)。

农业灰水足迹效率反映区域单位水污染投入所带来的经济效益, 该值越大说明区域农业越发达。计算公式为:

$$g = V_{\text{gdp}} / V_{\text{agr}} \quad (6)$$

式中: g 为农业灰水足迹效率 ($\text{元}/\text{m}^3$); V_{gdp} 为区域农业总产值 (元)。

2.2.2 泰尔指数 泰尔指数可以计算地区间的差距和地区内的差距, 并衡量在总体差距中的贡献率, 能够全面反映区域间的不平衡性。其值越小, 说明地区差距越小, 地区资源配置越均衡。本文将黄河流域分为上游地区(青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古)、中游地区(陕西、山西)和下游地区(河南、山东)^[19]。参考汪克亮等^[20]的研究, 泰尔指数计算公式为:

$$T_o = T_w + T_b \quad (7)$$

$$T_p = \frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^n \frac{e_p}{e_a} \ln \frac{e_p}{e_a} \quad (8)$$

$$T_w = \sum_{p=1}^3 \left(\frac{n_p}{9} \times \frac{e_a}{e} \right) T_p \quad (9)$$

$$T_b = \sum_{p=1}^3 \frac{n_p}{9} \left(\frac{e_p}{e} \right) \ln \left(\frac{e_p}{e} \right) \quad (10)$$

式中： p 为黄河流域上中下游； n_p 为黄河流域上中下游地区的省(自治区)数量； e_a 为上中下游地区农业灰水足迹效率的平均值； e 为黄河流域农业灰水足迹效率的平均值； e_p 为黄河流域上中下游各省区农业灰水效率值； T_o 为黄河流域农业灰水足迹效率总体差距的泰尔指数； T_p 为上中下游各省市农业灰水足迹效率总体地区差距的泰尔指数； T_w 、 T_b 分别表示黄河流域农业灰水足迹效率的地区内差距和地区间差距的泰尔指数。

2.2.3 LMDI 模型 农业用水受经济发展、资源投入和环境因素等多方面的影响,农业灰水足迹效率因不同地区农业生产条件差异而发生变化。理论上,农业经济发展和农业要素投入会带来农业灰水产出规模的提升,但同时可能也伴随农业环境的恶化。因此,参考陈岩等^[21]研究,利用 LMDI 模型将农业灰水足迹效率分解为 5 个驱动因素:农业经济效应为单位农产品产量的农业经济效益,化肥强度效应为单位耕地面积施用的化肥量,灰水产出规模效应为单位农业灰水足迹带来的农产品产量,农业环境效应为人均化肥施用量的倒数,耕地资源效应为人均耕地面积,这 5 种因素反映了农业灰水足迹效率与地区自然资源禀赋、投入要素配置之间的相互关系。效应值越大,说明该效应对农业灰水足迹效率作用效果越明显。计算公式为:

$$g = \frac{V_{\text{gdp}}}{V_{\text{agr}}} = \frac{V_{\text{gdp}}}{P} \times \frac{F}{A} \times \frac{P}{V_{\text{agr}}} \times \frac{L}{F} \times \frac{A}{L} \\ = a \times b \times c \times d \times e \quad (11)$$

$$\Delta G = g_t - g_0 \\ = \Delta G_a + \Delta G_b + \Delta G_c + \Delta G_d + \Delta G_e \quad (12)$$

$$\Delta G_a = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left(\frac{a_t}{a_0} \right) \quad (13)$$

式中： P 为农产品产量(t)； F 为化肥施用量(t)； A 为耕地面积(hm^2)； L 为农业劳动力(人)； a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为农业经济效应、化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应； g_t 为当年的农业灰水足迹效率； g_0 为基期的农业灰水足迹效率； ΔG 为农业灰水足迹效率总效应； ΔG_a 为农业经济效应贡献率,同理可得 ΔG_b 、 ΔG_c 、 ΔG_d 、 ΔG_e 分别为化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应的贡献率。当效应值为正值时,说明该效应为正向效应,促进农业灰水足迹效率的增加,反之则为负向效应。某一效应与总效应的比值则为该效应的贡献率,若贡献率的绝对值为 50% 及以上,则该效应为农业灰水足迹效率的主要驱动因素。

3 结果与分析

3.1 农业灰水足迹效率时空演变分析

由图 2 可知,黄河流域农业灰水足迹效率整体呈上升趋势,由 2000 年的 0.130 8 元/ m^3 上升至 2021 年的 0.333 2 元/ m^3 ,22 a 间平均效率为 0.235 8 元/ m^3 ,农业发展水平整体向好。空间上看,内蒙古自治区农业灰水足迹效率平均值为 0.467 0 元/ m^3 ,多年来为黄河流域 9 省区最高值。青海省农业灰水足迹效率值介于 0.010 0~0.040 0 元/ m^3 之间,为 9 省区中农业效率最低值,一方面是由于青海省特殊的地理位置和生态环境,另一方面也反映了农业发展较为落后。宁夏和山西地区农业灰水足迹效率为先上升后下降,说明农业水资源利用与水环境保护问题突出,地区农业状况恶化。其他 7 省区农业灰水足迹效率均呈波动上升趋势,反映了农业发展水平逐年改善。

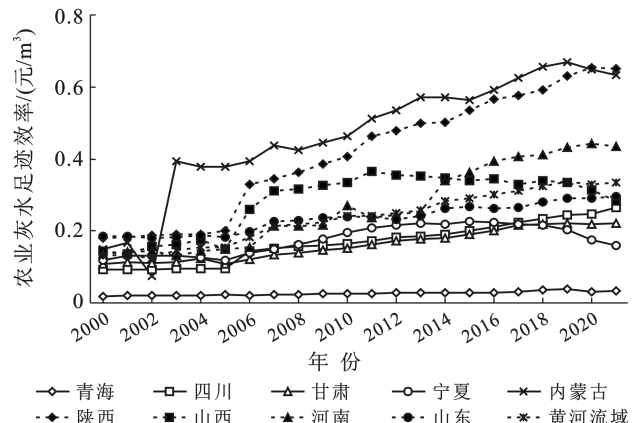


图 2 2000—2021 年黄河流域农业灰水足迹效率
Fig.2 Agricultural grey water footprint efficiency in Yellow River basin from 2000 to 2021

3.2 农业灰水足迹效率地区差异分析

根据公式(6)计算得出,农业灰水足迹效率平均值得中游地区最高(0.347 3 元/ m^3),下游地区次之(0.250 8 元/ m^3),上游地区最低(0.199 6 元/ m^3),中下游地区农业水平整体高于上游地区,农业灰水足迹效率地区差异较为明显。因此,本文利用泰尔指数分解法揭示地区差异产生的原因(表 1)。黄河流域农业灰水足迹效率 2000 年总体差距为 0.091,2021 年上升至 0.186,表明总体差距在扩大。22 a 间仅 2002 年地区之间差距贡献率占比超过 50%,地区之间差距多年平均贡献率仅为 19.89% 且呈下降趋势,地区内部差距多年平均贡献率为 80.11%,说明黄河流域农业灰水足迹效率地区差异主要是由地区内部差距引起的。地区内部差距中,上游地区泰尔指数远高于中下游地区,主要原因为上游地区农业灰水足迹效率

极不均衡,内蒙古和青海两个极值拉大了上游地区内部差异。但近年来上游地区内部差距逐渐减小,中游地区内部差距呈上升趋势,下游地区基本保持稳定,

今后应多关注黄河流域的协同治理和均衡发展。综上所述,减少地区内部差异,特别是上游地区内部差距是提高黄河流域农业灰水足迹效率的关键因素。

表 1 2000—2021 年黄河流域农业灰水足迹效率地区差异

Table 1 Regional differences of agricultural grey water footprint efficiency in Yellow River basin from 2000 to 2021

年份	总体差距	地区之间差距		地区内部差距		上游地区 贡献率/%	中游地区 贡献率/%	下游地区 贡献率/%
		数值	贡献率/%	数值	贡献率/%			
2000	0.091	0.032	34.71	0.060	65.29	59.87	1.78	3.64
2001	0.091	0.024	26.42	0.067	73.58	67.57	3.17	2.84
2002	0.105	0.055	51.96	0.051	48.04	45.23	1.12	1.70
2003	0.177	0.002	1.17	0.174	98.83	96.78	0.45	1.60
2004	0.161	0.004	2.28	0.158	97.72	96.38	0.17	1.17
2005	0.170	0.004	2.18	0.166	97.82	95.57	1.53	0.71
2006	0.165	0.034	20.51	0.131	79.49	77.24	1.33	0.93
2007	0.161	0.034	20.95	0.127	79.05	78.70	0.28	0.07
2008	0.153	0.036	23.39	0.117	76.61	75.97	0.55	0.09
2009	0.154	0.036	23.34	0.118	76.66	75.73	0.77	0.16
2010	0.151	0.034	22.83	0.116	77.17	75.90	1.01	0.26
2011	0.166	0.042	25.07	0.125	74.93	73.49	1.43	0.00
2012	0.164	0.037	22.57	0.127	77.43	75.06	2.32	0.05
2013	0.170	0.034	20.16	0.136	79.84	76.90	2.91	0.03
2014	0.162	0.030	18.69	0.132	81.31	76.81	3.34	1.16
2015	0.160	0.032	19.95	0.128	80.05	73.32	5.04	1.70
2016	0.166	0.032	19.13	0.134	80.87	72.19	5.84	2.85
2017	0.166	0.026	15.91	0.140	84.09	73.95	7.12	3.02
2018	0.167	0.026	15.54	0.141	84.46	75.04	6.85	2.57
2019	0.171	0.028	16.43	0.143	83.57	72.17	8.75	2.65
2020	0.187	0.033	17.87	0.154	82.13	68.43	10.87	2.83
2021	0.186	0.031	16.41	0.156	83.59	67.69	13.46	2.44
均值	0.157	0.029	19.89	0.127	80.11	75.00	3.64	1.48

3.3 农业灰水足迹效率驱动因素分析

考虑到以 1 a 为周期进行研究相关效应不能及时发挥作用^[22],本文以 3 a 为周期分析黄河流域农业灰水足迹效率的驱动因素,更能反映相关因素的作用效果。由表 2 可知,黄河流域农业灰水足迹效率总效应为正值,说明 22 a 间黄河流域灰水足迹效率是增加的。分解来看,农业经济效应、灰水产出规模效应和耕地资源效应促进灰水足迹效率的增加,化肥强度效应和农业环境效应抑制灰水足迹效率的增加。其中耕地资源效应和农业环境效应对黄河流域农业灰水足迹效率影响较大,二者贡献值分别为 0.442 7 和 -0.440 6 元/m³,说明人均耕地资源量越多、人均化肥施用量越少,对提升农业灰水足迹效率作用越明显。化肥强度效应最初为正向效应,2012 年后变为负向效应,表明黄河流域化肥施用强度在减小,一定程度上也反映了黄河流域化肥施用效率的提升。农业经济效应 22 a 来始终为正值,可见黄河流域农业发展水平整体较好,促进农业灰水足迹效率的提升。灰水产出规模效应变化较大,反映了黄河流域灰水足

迹产出不稳定。根据黄河流域上中下游划分情况,总体来看,农业环境效应为影响各区域农业灰水足迹效率增加的最大因素,且为负向效应,其他各效应均为正向效应。但不同区域促进农业灰水足迹效率提升的主要驱动效应不同:上游地区主要受耕地资源效应和农业经济效应影响,中游地区主要受灰水产出规模效应和化肥强度效应影响,下游地区主要受耕地资源效应影响。

从各省份具体情况来看,可将黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应根据主要驱动因素分为 3 种驱动效应类型,具体划分为 4 种模式(表 3)。模式 I 为灰水产出规模效应和农业环境效应双驱动模型,代表省份为陕西,该模式下农业环境效应是负值,主要依靠灰水足迹生产水平促进农业灰水效率的提升。模式 II 为农业经济效应、农业环境效应和耕地资源效应三驱动模型,代表省份有青海、四川、甘肃、内蒙古和山东 5 个省份,该模式下农业经济发展水平和人均耕地资源量对促进农业灰水足迹效率有积极的影响,尽管农业环境效应负向作用明显,但正向作用效果更为显

著。模式Ⅲ为灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应三驱动模型,代表省份为山西和河南,该模式对地区耕地资源和农产品产量要求较高,需要对耕地资源高效合理利用。模式Ⅳ为除灰水产出规模

外的四驱动模型,代表省份为宁夏,该模式对地区化肥施用和耕地利用要求极高,地区农业经济发展水平一般,农业灰水足迹效率受地区农业资源的投入影响较大。

表 2 2000—2021 年黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应贡献值
Table 2 Contribution value of driving effect of agricultural grey water footprint efficiency in Yellow River basin from 2000 to 2021

10^{-2} 元/ m^3

地区	年份	农业经济效应	化肥强度效应	灰水产出规模效应	农业环境效应	耕地资源效应	总效应
黄河流域	2000—2003	1.90	1.24	-0.20	-1.43	0.19	1.70
	2003—2006	0.42	0.73	3.17	-2.41	1.68	3.59
	2006—2009	1.26	2.09	2.79	-4.72	2.63	4.05
	2009—2012	0.97	0.74	1.58	-4.72	3.98	2.56
	2012—2015	1.52	-1.39	2.61	-4.20	5.59	4.14
	2015—2018	2.67	-1.91	0.71	-2.27	4.17	3.38
	2018—2021	2.38	-1.70	-1.55	-24.32	26.02	0.83
	2000—2021	11.13	-0.21	9.11	-44.06	44.27	20.24
上游地区	2000—2003	4.62	1.45	-0.52	-1.04	-0.41	4.09
	2003—2006	1.22	1.00	3.25	-3.14	2.14	4.47
	2006—2009	0.53	2.81	1.87	-3.70	0.89	2.41
	2009—2012	1.00	-1.26	2.54	-2.72	3.99	3.54
	2012—2015	1.08	-2.16	0.51	-4.10	6.26	1.60
	2015—2018	1.30	-2.02	2.66	-0.71	2.73	3.96
	2018—2021	1.33	-1.53	-1.03	-3.00	4.53	0.30
	2000—2021	12.28	1.19	8.09	-15.95	14.76	20.37
中游地区	2000—2003	0.13	2.27	1.32	-0.68	-1.59	1.46
	2003—2006	0.14	-8.39	12.06	7.13	1.26	12.20
	2006—2009	2.76	18.76	3.40	-20.99	2.23	6.16
	2009—2012	-1.46	8.87	7.90	-11.37	2.49	6.44
	2012—2015	2.70	-1.15	-0.68	-1.11	2.26	2.02
	2015—2018	5.66	-2.21	-3.00	-0.98	3.18	2.66
	2018—2021	1.02	-2.92	-3.45	-6.19	9.11	-2.43
	2000—2021	7.55	12.15	20.95	-23.75	11.60	28.50
下游地区	2000—2003	-0.37	0.18	-0.09	-1.91	1.73	-0.47
	2003—2006	-0.12	2.41	2.06	-3.46	1.05	1.94
	2006—2009	1.58	-1.03	3.69	-3.24	4.27	5.26
	2009—2012	1.30	1.32	-0.10	-5.56	4.24	1.20
	2012—2015	1.79	0.57	5.07	-5.30	4.73	6.85
	2015—2018	3.31	-1.88	-0.70	-4.99	6.87	2.61
	2018—2021	3.68	0.23	-1.92	-0.68	0.45	1.75
	2000—2021	9.24	3.20	9.91	-26.81	23.61	19.15

表 3 2000—2021 年黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应类型

Table 3 Driving effect types of agricultural grey water footprint efficiency in Yellow River basin from 2000 to 2021

类型	模式	省区	农业经济效应/%	化肥强度效应/%	灰水产出规模效应/%	农业环境效应/%	耕地资源效应/%
双驱动效应	模式 I	陕西	30.10	37.54	69.90	-71.87	34.33
		青海	108.41	-38.49	-8.41	-81.41	119.90
		四川	58.83	-20.72	41.17	-52.88	73.60
三驱动效应	模式 II	甘肃	59.99	-22.92	40.01	-56.88	79.80
		内蒙古	64.66	49.91	35.34	-99.93	50.02
		山东	89.78	-22.68	10.22	-135.82	158.51
		山西	11.10	46.09	88.90	-103.83	57.73
		河南	29.55	26.47	70.45	-130.25	103.77
四驱动效应	模式 IV	宁夏	51.50	181.57	48.50	-380.53	198.96

4 讨论

解决黄河流域 9 省区农业发展不平衡不充分问题是黄河流域生态保护和高质量发展的重要内容。根据本文研究结果,黄河流域农业灰水足迹效率整体逐年增加,可能的原因是黄河流域贯彻“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针,推进农业水资源高效利用与生态环境治理,加之国家和地方出台一系列政策促进农业绿色发展,推动黄河源头至入海口的全域科学治理取得了一定成效。

黄河流域大部分处于干旱半干旱地区,农业受到水资源的严格约束,同时流域水环境承载力低、生态脆弱区分布广,因而存在上游青藏高原及西北荒漠区水源涵养功能不足、中游黄土高原水沙关系不协调、下游河势游荡和“二级悬河”等问题,特别是上游地区耕地占比高、盐碱地开发利用不足和农业用水效率低下问题突出,导致黄河流域农业灰水足迹效率整体差距和区域内差距较大。因此,黄河上游应发展节水农业,促进种植业和畜牧业协调发展,中游地区做好水土保持,下游地区优化农业产业结构,提升流域农业全过程水资源高效利用能力。

农业经济效应、灰水产出规模效应和耕地资源效应是 9 省区共有的正向效应,反映农业经济的高质量发展和耕地资源的高效利用能够促进农产品产量和灰水足迹效率的提升。化肥强度效应是青海、四川、甘肃、山东四省份的负向效应,化肥施用量大或未能高效利用对农业水环境污染严重。农业环境效应为黄河流域 9 省区共有的负向效应,9 省区应从实际出发,推广环境友好型农业生产技术,减少化肥农药的高强度使用,推动农业水环境治理。

黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应共有 4 种模式,各省应根据不同的驱动模式采取相应的措施。陕西属于灰水产出规模效应和农业环境效应双驱动模型,应调整农业结构,优化农业布局;青海、四川、甘肃、内蒙古和山东 5 个省区为农业经济效应、农业环境效应和耕地资源效应三驱动模型,应严格农业用水总量控制,扩大低耗水、高耐旱作物种植比例,提高化肥、农药等投入品利用效率,建立健全禽畜粪污等农业废弃物综合利用和无害化处理体系;山西和河南省为灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应三驱动模型,应加强农田退水循环利用,加大农业节水技术和产品的研发;宁夏地区为除灰水产出规模外的四驱动模型,应引导适水种植、量水生产,减少单位面积化肥施用量,加强农业节水技术推广,建立农业用水精准补贴和节水奖励机制。

从农业灰水足迹值和农业灰水足迹效率值变化趋势来看,灰水足迹较大省份多为农业较发达地区,较小省份多为经济规模小的地区,与孙才志等^[23]研究结果一致。内蒙古、陕西、河南、山东值较高,青海、甘肃、宁夏地区值较低,这与邓远建等^[24]研究结果相符,但由于对农业灰水足迹研究选取的污染源不同,邓远建等^[24]测算了鱼类、壳类、贝类的水产养殖业灰水足迹,省域农业灰水足迹值偏大,因而制约了灰水足迹效率测算结果的对比性。当然本文还存在以下不足:①根据《第二次全国污染源普查公报》结果,农业源水污染排放主要为化学需氧量和总氮,加之黄河流域整体水产养殖业相对不发达,因而未考虑水产养殖业灰水足迹中的总磷排放;②由于对数平均迪氏指数模型恒等式分解所限,农业灰水足迹效率驱动因素未能全面包括。这些是未来改进和深入研究的地方。

5 结论

(1) 2000—2021 年黄河流域农业灰水足迹效率整体呈波动上升趋势,年均效率为 0.235 8 元/m³。内蒙古和青海的农业灰水足迹效率为 9 省区中的最大值和最小值,灰水足迹效率多年平均值分别为 0.467 0 和 0.026 3 元/m³。

(2) 黄河流域农业灰水足迹效率总体差距在扩大,地区内部差距高于地区间差距,是造成黄河流域灰水足迹效率总体差距的主要原因。上游地区年均贡献率为 75%,远高于中下游地区,这是内部差距形成的重要来源。

(3) 黄河流域农业灰水足迹效率总效应为正值,农业经济效应、灰水产出规模效应和耕地资源效应促进灰水足迹效率的增加,化肥强度效应和农业环境效应抑制灰水足迹效率的增加。耕地资源效应和农业环境效应是影响农业灰水足迹效率的关键因素。

(4) 黄河流域农业灰水足迹效率驱动效应可分为 3 种驱动效应类型,共计 4 种模式,农业环境效应是抑制农业灰水效率的共同效应。不同类型模式下,农业灰水足迹效率的驱动因素不同,促进农业灰水足迹效率提升的方式需要因地制宜,科学规划。

参考文献 (References)

- [1] 付凯,高红杰,李发东,等.典型农业区河流水质评价及影响因素分析[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):583-597.
Fu Kai, Gao Hongjie, Li Fadong et al. River water quality evaluation and analysis of influencing factors in typical agricultural areas [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(3):583-597.

- [2] 董雯,王瑞琛,李怀恩,等.渭河西咸段水质时空变异特征分析[J].水力发电学报,2020,39(11):80-89.
Dong Wen, Wang Ruichen, Li Huaen, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of water pollutants in Xixian New Area in Weihe River basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020,39(11):80-89.
- [3] 张慧妍,段瑜,王小艺,等.数据驱动的模糊支持向量农业水质评价模型[J].水土保持通报,2019,39(1):142-146,153.
Zhang Huiyan, Duan Yu, Wang Xiaoyi, et al. Data-driven fuzzy support vector model for agriculture water quality evaluation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):142-146,153.
- [4] 黄瑞,韩龙喜,张防修.强降雨过程中入库面源污染对库区水质的影响[J].长江科学院院报,2018,35(5):12-16.
Huang Rui, Han Longxi, Zhang Fangxiu. Effects of non-point source pollutants on water quality of reservoir during heavy rainfall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018,35(5):12-16.
- [5] 于嘉骥,张慧妍,王小艺,等.基于改进的投影寻踪—云模型的农业灌溉水质综合评价[J].水资源保护,2017,33(6):142-146.
Yu Jiayi, Zhang Huiyan, Wang Xiaoyi, et al. Comprehensive evaluation of agricultural irrigation water quality based on modified projection pursuit-cloud model [J]. Water Resources Protection, 2017,33(6):142-146.
- [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 Shengyun, Lin Yujuan. 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] 张鑫,李磊,甄志磊,等.时空与效率视角下汾河流域农业灰水足迹分析[J].中国环境科学,2019,39(4):1502-1510.
Zhang Xin, Li Lei, Zhen Zhilei, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Fenhe River basin based on the perspective of space-time and efficiency [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1502-1510.
- [8] 贺志文,向平安.湖南省灰水足迹变化特征及其驱动因子分析[J].中国农村水利水电,2018(10):19-26.
He Zhiwen, Xiang Pingan. An analysis of the variations and driving factors of grey water footprint in Hunan Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10):19-26.
- [9] 孙诗阶,许朗,陈杰.农业灰水足迹与农业经济增长的脱钩关系研究:基于长江经济带 11 省市的实证分析[J].节水灌溉,2022(6):17-23.
Sun Shijie, Xu Lang, Chen Jie. A study on the decoupling relationship between agricultural grey water footprint and agricultural economic growth: Based on the empirical analysis of 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. Water Saving Irrigation, 2022(6):17-23.
- [10] 洪传春,刘某承,张雅静,等.时空视角下京津冀农业灰水足迹强度与效率分析[J].河北农业大学学报,2021,44(2):128-135.
Hong Chuanchun, Liu Moucheng, Zhang Yajing, et al. Analysis on the intensity and efficiency of agricultural grey water footprint in Beijing-Tianjin-Hebei region under the perspective of spatial-temporal pattern [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021,44(2):128-135.
- [11] 陈岩,童国平,王蕾.基于 DEA-BCC 模型的农业灰水足迹效率研究[J].人民黄河,2020,42(12):61-65,81.
Chen Yan, Tong Guoping, Wang Lei. Study on agricultural grey water footprint efficiency of Huaihe River Basin based on DEA-BCC model [J]. Yellow River, 2020,42(12):61-65,81.
- [12] 傅春,陈毓迪,刘业忠,等.江西省农田灰水足迹时空分析[J].农业环境科学学报,2022,41(7):1501-1508.
Fu Chun, Chen Yudi, Liu Yezhong, et al. Temporal and spatial analysis of grey water footprint in Jiangxi Province farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(7):1501-1508.
- [13] 中共中央国务院.黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N].人民日报,2021-10-09(1).
The CPC Central Committee and the State Council. Outline of the plan for ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin [N]. People's Daily, 2021-10-09(1).
- [14] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000(1):1-6.
Zhu Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000(1):1-6.
- [15] 刘俊国,曾昭,赵乾斌,等.水足迹评价手册[M].北京:科学出版社,2012.
Liu Junguo, Zeng Zhao, Zhao Qianbin, et al. Water Footprint Evaluation Manual [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] 郑德凤,郝帅,孙才志.基于 DEA-ESDA 的农业生态效率评价及时空分异研究[J].地理科学,2018,38(3):419-427.
Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi. Evaluation of agricultural ecological efficiency and its spatial-temporal differentiation based on DEA-ESDA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(3):419-427.
- [17] 李飞,董锁成.西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路

- 径研究[J].资源科学,2011,33(11):2204-2211.
- Li Fei, Dong Suocheng. Pollution from livestock and poultry and its resource strategy in West China [J]. Resources Science, 2011,33(11):2204-2211.
- [18] 韩琴,孙才志,邹玮.1998-2012年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J].资源科学,2016,38(6):1179-1191.
- Han Qin, Sun Caizhi, Zou Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1988 to 2012 [J]. Resources Science, 2016,38(6):1179-1191.
- [19] 宋金昭,胡湘湘,王晓平,等.黄河流域新型城镇化、产业结构升级与绿色经济效率的时空耦合研究[J].软科学,2022,36(10):101-108.
- Song Jinzhao, Hu Xiangxiang, Wang Xiaoping, et al. Research on the time-space coupling of new urbanization, industrial structure upgrading and green economic efficiency in the Yellow River [J]. Soft Science, 2022, 36(10):101-108.
- [20] 汪克亮,刘悦,史利娟,等.长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素:基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J].资源科学,2017,39(8):1522-1534.
- Wang Keliang, Liu Yue, Shi Lijuan, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit model [J]. Resources Science, 2017,39(8):1522-1534.
- [21] 陈岩,童国平,王蕾.淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式[J].水资源保护,2020,36(6):60-66,85.
- Chen Yan, Tong Guoping, Wang Lei. Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River basin [J]. Water Resources Protection, 2020,36(6):60-66,85.
- [22] 孙付华,杨一帆,沈菊琴,等.基于水足迹-LMDI模型的江苏省水资源利用与经济发展的脱钩关系研究[J].江苏社会科学,2020(6):233-240.
- Sun Fuhua, Yang Yifan, Shen Juqin, et al. Study on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in Jiangsu province based on water footprint-LMDI model [J]. Jiangsu Social Sciences, 2020(6):233-240.
- [23] 孙才志,阎晓东.基于MRIO的中国省区和产业灰水足迹测算及转移分析[J].地理科学进展,2020,39(2):207-218.
- Sun Caizhi, Yan Xiaodong. Measurement and transfer analysis of grey water footprint of Chinese provinces and industries based on a multi-regional input-output model [J]. Progress in Geography, 2020,39(2):207-218.
- [24] 邓远建,超博.灰水足迹视角下我国省域农业生态效率及其影响因素[J].中国农业科学,2022,55(24):4879-4894.
- Deng Yuanjian, Chao Bo. Provincial agricultural ecological efficiency and its influencing factors in China from the perspective of grey water footprint [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022,55(24):4879-4894.
- ~~~~~
- (上接第436页)
- [30] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013,33(5):889-897.
- [31] 吴传钧.论地理学的研究核心:人地关系地域系统[J].经济地理,1991,11(3):1-6.
- Wu Chuanjun. The core of study of geography: Man-land relationship areal system [J]. Economic Geography, 1991,11(3):1-6.
- [32] 邹利林,刘彦随,王永生.中国土地利用冲突研究进展[J].地理科学进展,2020,39(2):298-309.
- Zou Lilin, Liu Yansui, Wang Yongsheng. Research progress and prospect of land-use conflicts in China [J]. Progress in Geography, 2020,39(2):298-309.
- [33] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].自然资源学报,2019,34(8):1748-1758.
- Zhang Wenqiang, Sun Congjian, Li Xingong. Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi Province based on remote sensing image [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(8):1748-1758.
- [34] 杨永健.基于遥感生态指数的生态质量变化分析:以福建为例[D].陕西 西安:长安大学,2019.
- Yang Yongjian. Ecological quality assessment based on remote sensing ecological index: A case study of Fujian Province [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2019.