

基于 LMDI 模型的四川盆地作物水足迹时空演变及驱动因素分析

阳 君^{1,2}, 肖作林^{1,2}, 徐伟峰^{1,2}

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331;
2. 重庆师范大学地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331)

摘要:为探究四川盆地农业水足迹演变特征及驱动因素,分析了 2001—2021 年四川盆地主要农作物蓝水、绿水、灰水和白水足迹时空演变特征。利用 LMDI 模型从技术、环境和社会维度识别了作物水足迹变化的驱动因素,并从全局与局部视角探讨了不同驱动因素的差异性。结果表明:2001—2021 年四川盆地作物水足迹呈现先上升后下降的趋势;各市作物水足迹在空间上表现为北高南低的分布特征;从全局看,不同驱动因素对作物水足迹变化的影响程度由大到小依次为经济效应、人口变化效应、技术效应、水足迹强度效应、节水效应、生产效应,经济效应和人口变化效应是最强的促进和抑制因素,贡献值分别为 82.90 亿 m^3 和 -51.55 亿 m^3 ;从局部看,技术效应与人口变化效应在空间上存在错位现象,生产效应、节水效应和水足迹强度效应在空间上表现为双向驱动作用。

关键词:农业水足迹;作物水足迹;LMDI 模型;四川盆地

中图分类号:S273.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)01-0160-10

Analysis of spatiotemporal evolution and driving factors of crop water footprint in the Sichuan Basin based on LMDI model//YANG Jun^{1,2}, XIAO Zuolin^{1,2}, XU Weifeng^{1,2} (1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To explore the evolution characteristics and driving factors of agricultural water footprint in the Sichuan Basin, the spatiotemporal evolution characteristics of blue water, green water, grey water, and white water footprint of major crops in the Sichuan Basin from 2001 to 2021 were analyzed. The LMDI model was used to identify the driving factors of crop water footprint change from the technical, environmental and social dimensions, and the differences of each driving factor were discussed from the global and local perspectives. The results showed that the crop water footprint in Sichuan Basin increased first and then decreased from 2001 to 2021. The spatial distribution characteristics of crop water footprint in each city were high in the north and low in the south. From the global perspective, the impact of different driving factors on changes in crop water footprint varies from large to small as follows: economic effect, population change effect, technological effect, water footprint intensity effect, water-saving effect, and production effect. The economic effect and population change effect were the strongest promoting and inhibiting factors, and the contribution values were $82.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $-51.55 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. From the local perspective, there was a dislocation between the technical effect and the population change effect in space, and the production effect, water saving effect and water footprint intensity effect show a two-way driving effect in space.

Key words: agricultural water footprint; crop water footprint; LMDI model; the Sichuan Basin

水资源作为农业生产的重要物质基础,对保障农村经济稳定发展和区域粮食安全意义重大^[1-2]。四川盆地是我国重要的粮食生产基地之一,农业用

水量占四川省总用水量的 65.5%,但灌溉效率低,季节性和区域性缺水严重,导致农业用水压力大。随着社会经济的发展,各行各业对水资源的竞争加

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300558);重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2023NSCQ-LZX0150);重庆师范大学基金项目(22XLB011)

作者简介:阳君(1997—),男,硕士研究生,主要从事农业水资源研究。E-mail:yang_jaaa@163.com

通信作者:肖作林(1985—),男,教授,博士,主要从事地表生态过程研究。E-mail:xiaoll@cqnu.cn

剧,农业水资源短缺已成为社会经济发展的瓶颈^[3-4]。因此,科学评估作物用水量,探究其驱动因素,对厘清作物用水规律,缓解区域农业用水压力,保障粮食安全具有重要意义。

2002 年,Hoekstra 等^[5]首次提出水足迹的概念以来,水足迹已广泛应用于农业、工业和家庭消费的水资源评估。在农业领域,水足迹不仅涵盖了传统的蓝水(灌溉水)和绿水(降水)指标,还扩展至灰水(污水稀释需求)。目前,已有不少学者对作物水足迹进行了评估,包括对某一地区单一作物水足迹进行量化^[6]、作物间水足迹时空差异比较^[7-8]、在不同空间尺度上研究作物水足迹时空差异特征^[9-10]等。也有学者从灰水足迹视角探究农业面源污染问题,例如:姜旭海等^[11]运用灰水足迹理论分析了陕西省作物的水资源消耗,制定了农业非点源污染的控制策略;王圣云等^[12]将灰水足迹指标纳入农业生态效率指标体系,运用 SBM(slack-based measure)模型和 Tobit 面板模型对 1990—2016 年中国农业生态效率空间演化及驱动因素进行实证分析。多数学者对作物水足迹的评估仅考虑作物生产对水资源量的利用,忽略了作物生长灌溉过程中损失的水资源量以及农业面源污染的耗水量,导致测算的作物水足迹偏低。Ababaei 等^[13]提出了白水足迹的概念,用于评估农作物生长过程中因灌溉导致的水资源损失量。随着白水足迹的引入,Cao 等^[14]建立了一种既考虑水资源运动过程,又反映农业生产过程中环境影响的混合分析框架,用于测算农业用水效率。这不仅丰富了水资源管理和评估的框架,更强调了在农业灌溉领域内提高用水效率和减少水资源损失的重要性。在水足迹驱动因素研究方面,国内外学者主要运用对数平均迪氏指数(logarithmic mean Divisia index, LMDI)模型^[15]、IPAT(impact of population, affluence, and technology)模型^[16]和 STIRPAT(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology)模型^[17],这些模型揭示了作物水足迹差异的复杂性,并指出了地区间的显著差异主要由经济增长、农业技术进步和区域水政策所驱动。例如:Zhao 等^[18]通过 LMDI 模型对中国农业水足迹进行分析,发现经济增长是推动中国农业水足迹增长的主导因素;奚旭等^[19]通过 LMDI 模型探究了 1997—2011 年 3 种因素对中国水足迹变化的影响,结果表明富裕程度和人口变化对水足迹具有促进作用,技术效应具有双向驱动。然而,现有研究在分析驱动因素时往往倾向于将研究区视为单一整体,忽视了不同区域在多维度上可能存在的差异。例如:马凤才等^[20]、韩宇平等^[21]和贾

浩等^[22]分别对黑龙江省、山西省和沧州市农业水足迹的驱动因素进行了研究,结果表明同一国家内不同地区的农业水足迹受到的驱动因素大不相同。因此,为了更准确地理解和管理水资源需从多维度、多层次进行驱动因素识别。

鉴于此,本文基于水足迹理论,考虑作物生长灌溉过程中损失的水资源量与农业面源污染的耗水量,量化四川盆地 2001—2021 年主要农作物用水量,探究作物用水规律,利用 LMDI 模型从技术、环境和社会维度构建技术效应、生产效应、节水效应、水足迹强度效应、经济效应和人口变化效应来探究水足迹变化的驱动因素,并在全局与局部视角下分析各驱动因素的差异特征,以期四川盆地农业水资源有效利用及农业可持续发展提供理论依据和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

四川盆地位于我国西南部(27°38'N ~32°54'N、102°48'E ~109°16'E),由青藏高原、大巴山、华蓥山和云贵高原环绕而成,大部分位于四川省内,小部分位于重庆市内,考虑尺度效应和数据统计口径等因素,本文选取四川省境内的盆地为研究区(图 1)。研究区属于亚热带季风性气候,年均气温 14.9~18.6℃,年均降水量约 1 200 mm,年日照时数 900~1 300 h,无霜期约 280~350 天^[23]。盆地内紫色土分布广泛,土壤肥沃,水资源丰富,是我国重要的粮食基地。根据 2022 年《四川省水资源公报》,研究区农业用水量超过四川省总用水量的 65.5%,高于全国平均水平。由于气候和地形的原因,使得盆地内



图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic of Study area

水资源时空分布不均,季节性、区域性缺水严重,导致农业用水开发难度大,利用效率低。

1.2 数据来源

选取 2001—2021 年四川盆地 16 个市的水稻、小麦和玉米的产量、播种面积、农业产值和化肥施用量数据进行研究,来源于《四川省统计年鉴》和《四川省统计公报》。气象数据来源于中国气象数据网平台 (<http://data.cma.cn>),包括四川盆地 17 个基本气象站的日降水量、日最高气温、日最低气温、平均风速、相对湿度和日照时数。

2 研究方法

2.1 作物水足迹测度

作物水足迹是指某一作物在整个生长过程中所消耗的水资源,主要由蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹和白水足迹组成。蓝水足迹指作物在生长过程中所消耗的地表水和地下水(灌溉用水);绿水足迹指作物在生长过程中消耗的有效降水量(自然降雨);灰水足迹指在农业生产过程中将投入的化肥和农药等化学用品及其他面源污染物稀释同化到自然环境水质标准浓度所需的水资源;白水足迹指水资源在灌溉运输过程中的损失量。参考操信春等^[24]的研究对作物水足迹进行计算,计算公式为

$$W = W_{bl} + W_{ge} + W_{ga} + W_{wh} \quad (1)$$

其中 $W_{bl} = \beta E_{ib}/Y$ $W_{ge} = \beta E_{ig}/Y$
 $E_{ib} = \max(0, E_{ic} - P_e)$ $E_{ig} = \min(E_{ic}, P_e)$
式中: W 为作物水足迹; W_{bl} 为作物蓝水足迹; W_{ge} 为作物绿水足迹; W_{ga} 为作物灰水足迹; W_{wh} 为作物白水足迹; β 为单位转换系数,将水深单位转换为单位面积水量,本文 β 取 10; Y 为作物单位面积产量; E_{ib} 、 E_{ig} 分别为蓝水和绿水的蒸发量; E_{ic} 为作物蒸散量,利用 Penman-Monteith 公式^[25]计算; P_e 为有效降水量,参考美国农业部土壤保护局的计算方法^[26-27],计算公式为

$$P_e = \begin{cases} P(125 \text{ mm} - 0.2P)/125 & P < 250 \text{ mm} \\ 125 \text{ mm} + 0.1P & P \geq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

式中 P 为月降水量,由作物生长期日降水量累加得到。

W_{ga} 计算参考王楚钰等^[28]对灰水足迹的量化方法,计算公式为

$$W_{ga} = [\alpha A_{ppl}/(\rho_{\max} - \rho_{\text{nat}})]/Y \quad (3)$$

式中: α 为氮肥淋失率,本文取 10%; A_{ppl} 为单位面积化肥施用量; $\rho_{\max}$ 为环境可稀释氮元素的最大质量浓度,根据 GB 3838—2017《地表水环境质量标准基本项目标准限值》,本文取 10 mg/L; ρ_{nat} 为氮元素

自然本地质量浓度,本文取 0。

W_{wh} 计算参考 Cao 等^[14]构建的作物灌溉损失量计算方法,计算公式为

$$W_{wh} = W_{bl}(1 - \lambda)/\lambda \quad (4)$$

式中 λ 为农田灌溉水有效利用系数,从《四川省水资源公报》中获得。

2.2 LMDI 模型

LMDI 模型是经济学中一种评估相关指标潜在驱动因素的方法,具有完全分解、无残差等特点,目前被广泛应用于能源和环境领域。本文遵循 Johan 等^[29-30]的分析框架,从技术维度(技术效应、生产效应和节水效应)、环境维度(水足迹强度效应)、社会维度(经济效应和人口变化效应)对 2001—2022 年研究区主要农作物水足迹变化的驱动因素进行分析。具体分解为

$$W_s = iertjp \quad (5)$$

其中 $i = W_s/T$ $e = T/I_r$ $r = I_r/W_{bl}$

$$t = W_{bl}/G_{ap}$$
 $j = G_{ap}/p$

式中: W_s 为所有作物水足迹总和; i 为生产单位粮食耗水量,表示技术效应,反映农业生产技术; e 为单位灌溉面积产出的粮食产量,表示生产效应,反映农业生产能力; r 为单位水资源可灌溉的面积,表示节水效应,反映节水程度; t 为单位农业产值消耗的水资源,表示水足迹强度效应,反映水资源利用强度; j 为单位农业人口的收入,表示经济效应,反映农村经济发展水平; p 为农业人口,表示人口变化效应,反映农业人口变化情况; T 为作物产量; I_r 为灌溉面积; G_{ap} 为农业产值。

根据加法分解原则对水足迹进行分解:

$$\Delta W_s = W_{s,t} - W_{s,0} = \sum_k \Delta W_k \quad (6)$$

其中 $\Delta W_k = [(W_{s,t} - W_{s,0})/(\ln W_{s,t} - \ln W_{s,0})] \ln(k_t/k_0)$

式中: ΔW_s 为目标年相对于基准年内所有作物水足迹总和的变化量;下标 t 和 0 分别表示目标年和基准年; k 分别取 i 、 e 、 r 、 t 、 j 、 p 时 ΔW_k 为各类效应对水足迹变化的实际贡献值。

根据乘法分解原则对水足迹进行分解:

$$D = W_{s,t}/W_{s,0} = \prod_k D_k \quad (7)$$

其中 $D_k = \exp(Q\Delta W_k)$

$Q = \ln D/\Delta W_s = (\ln W_{s,t} - \ln W_{s,0})/(W_{s,t} - W_{s,0})$
式中: D 为驱动因素对作物水足迹变化的总贡献率; k 分别取 i 、 e 、 r 、 t 、 j 、 p 时 D_k 为各类效应对水足迹变化的贡献率。 $D > 1$ 表示驱动因素对作物水足迹具有促进作用,值越大促进作用越强; $D < 1$ 表示驱动因素对作物水足迹具有抑制作用,值越小抑制作用越强。

3 结果与分析

3.1 四川盆地作物水足迹动态演变特征

3.1.1 时间演变特征

图 2 为 2001—2021 年四川盆地分类作物水足迹年际变化。由图 2 可见,2001—2021 年四川盆地蓝水足迹和白水足迹波动剧烈,但总体上未呈现明显的增减趋势;相比之下,绿水足迹较为稳定,而灰水足迹经历了一个显著的先上升后下降的过程。四川

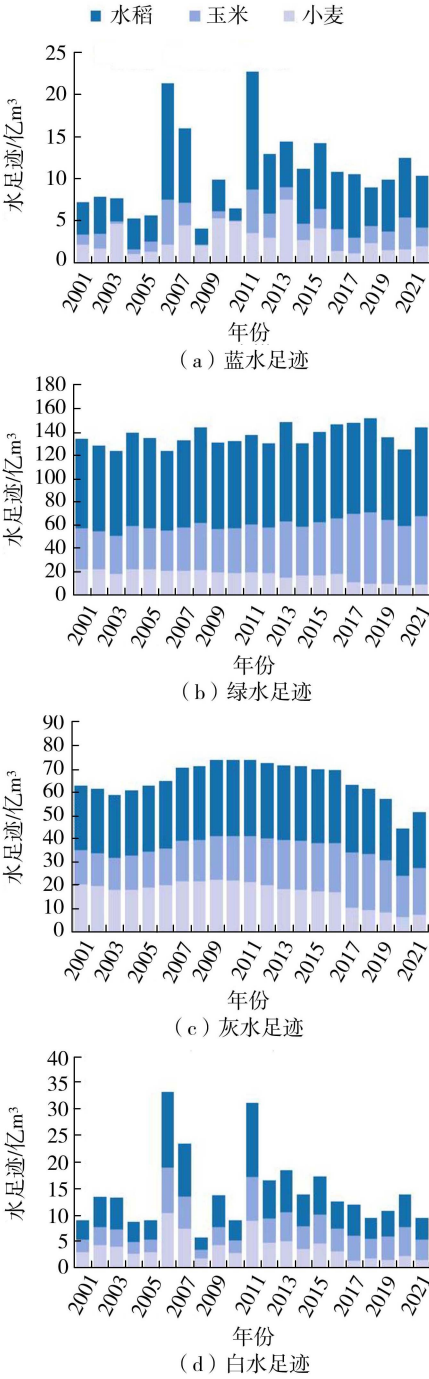


图 2 2001—2021 年四川盆地分类作物水足迹年际变化
Fig. 2 Interannual variation of classified crop water footprint in the Sichuan Basin from 2001 to 2021

盆地蓝水足迹峰值出现在 2011 年,达到 22.77 亿 m³,其中水稻占 61.92%、小麦占 15.26%、玉米则占 22.82%。与此相反,2008 年蓝水足迹降至最低,仅为 4.03 亿 m³,不到最大值的 20%。这种变化主要受区域降水量影响,降雨丰富的年份作物依赖绿水足迹更多,而在干旱年份则更多依赖蓝水足迹。四川盆地绿水足迹在 2018 年达到 152.05 亿 m³ 的最大值,水稻、小麦和玉米分别占 53.32%、6.06% 和 40.61%。2006 年的绿水足迹最低,只有最大值的 81.53%。四川盆地灰水足迹在 2010 年达到峰值,为 73.33 亿 m³,其中水稻的灰水足迹最高,占比 44.39%。到 2021 年,灰水足迹相比 2010 年下降了 30.53%,反映出随着环保意识的增强和农业实践的转型,灰水足迹逐渐减少。四川盆地白水足迹的变化趋势与蓝水足迹相似,随着农田灌溉基础设施的不断完善以及灌溉效率逐渐提升,白水足迹在 2011 年后呈现出缓慢降低的趋势。

3.1.2 空间分布格局

表 1 为四川盆地各市水足迹。由表 1 可见,四川盆地作物水足迹呈现出北高南低的分布特征,绿水足迹和灰水足迹在总水足迹中占比超过 80%,而蓝水足迹和白水足迹占比较少。南充市作物水足迹最高,达到 22.22 亿 m³,其中绿水足迹占 55.24%,灰水足迹占 29.82%,蓝水和白水足迹共占 14.94%。这反映了南充市农业生产的集中度和水资源的密集使用,特别是其作为四川盆地粮食产量领先的地区,拥有丰富的水资源。相比之下,乐山市的作物水足迹最低,仅有 8.81 亿 m³,大约是南充市的 40%。绿水足迹最大的是达州市,达到 12.93 亿 m³,该市以水稻和玉米种植为主,水稻和

表 1 各市作物水足迹 单位:亿 m ³					
Table 1 Crop water footprint of cities unit:10 ⁸ m ³					
城市	蓝水足迹	绿水足迹	灰水足迹	白水足迹	总水足迹
巴中市	0.75	7.69	3.87	0.99	13.30
成都市	0.83	11.17	5.54	1.11	18.64
达州市	0.90	12.93	6.01	1.17	21.01
德阳市	0.69	7.98	5.49	0.89	15.05
广安市	0.69	7.72	3.16	0.91	12.49
广元市	0.91	6.30	3.21	1.19	11.61
乐山市	0.16	5.85	2.59	0.21	8.81
泸州市	0.56	9.14	3.03	0.75	13.49
眉山市	0.30	7.52	4.02	0.40	12.25
绵阳市	1.02	10.18	6.06	1.33	18.60
南充市	1.44	12.27	6.63	1.88	22.22
内江市	0.54	6.91	3.38	0.72	11.55
遂宁市	0.80	6.19	4.05	1.05	12.09
宜宾市	0.67	10.13	2.98	0.90	14.68
资阳市	0.70	9.54	2.38	0.95	13.56
自贡市	0.36	5.46	2.55	0.48	8.85

玉米为雨热同期的高耗水作物,是造成绿水足迹高的主要原因。自贡市的绿水足迹仅有 5.46 亿 m³, 却占该市总水足迹的 61.71%,说明该市农业生产规模较小,对灌溉需求较低。蓝水足迹最大的是南充市,为 1.44 亿 m³,作为四川盆地重要的粮食生产区,农业灌溉设施的建设至关重要,需要合理利用蓝水足迹,提高灌溉效率。蓝水足迹最小的是乐山市,该市在地形因素影响下,粮食生产难度大,蓝水足迹较少。灰水足迹最大的也是南充市,为 6.63 亿 m³,表明该市在农业生产中使用了大量的化肥,造成了严重的农业非点源污染。灰水足迹最小的是资阳市,仅为 2.38 亿 m³,表明资阳市在农业污染控制上的成果显著。白水足迹最大的是南充市,为 1.88 亿 m³,强调了农业灌溉设施的重要性和提高灌溉效率的必要性。白水足迹最小的是乐山市,为 0.21 亿 m³,这主要是由于该地区较小的种植面积和较低的灌溉需求所导致。

3.2 四川盆地作物水足迹变化的驱动因素

3.2.1 全局分析

表 2 为 2001—2021 年四川盆地作物水足迹变化各驱动因素分解量。由表 2 可见,技术效应、生产效应、节水效应和人口变化效应是影响水足迹变化的抑制因素,而水足迹强度效应和经济效应是促进因素,其中经济效应和人口变化效应分别为作用效果最强的促进因素和抑制因素。2001—2021 年,四

川盆地的作物水足迹呈现出先上升后下降的趋势,主要由两种驱动因素引起,经济效应随着社会经济的发展逐渐增强,在增长的经济压力下,为了保障粮食生产,需要更多的水资源投入,从而在初期推动了水足迹的增加;而人口变化效应则呈现出先增加后减少的趋势,由于城市化的加速,农村人口减少,导致农业用水需求相对降低,从而在后期对作物水足迹产生了抑制作用。研究时段内,技术效应整体表现为抑制作用,多年累积效应为-28.70 亿 m³,年均贡献值为-1.43 亿 m³;随着农业基础设施的不断改善和灌溉技术的持续进步,作物的用水效率得到了逐步提高,单位作物的耗水量减少,这在一定程度上节约了农业水资源。生产效应整体表现为抑制作用,但在逐年变化中存在双向驱动的现象。节水效应整体表现为抑制作用,累积效应为-2.69 亿 m³,年均贡献值为-0.13 亿 m³。而水足迹强度效应整体表现为促进作用,但在逐年变化中也存在双向驱动现象,累积效应为 4.02 亿 m³;其促进作用峰值出现在 2006 年,累积促进效应达到 314.10 亿 m³,由于 2006 年单位农业产值耗水量为 0.08m³/元,属于研究期间最大的单位农业产值耗水量,因此对农业水足迹产生了显著增加的影响;然而在单位农业产值耗水量最小的 2008 年,抑制作用最强,达到 -332.18 亿 m³。经济效应整体表现为促进作用,累积效应为 82.90 亿 m³;其中,2003 年、2006 年和

表 2 2001—2021 年四川盆地作物水足迹变化各驱动因素分解量 单位:亿 m³

Table 2 Decomposition of factors affecting change in crop water footprint in the Sichuan Basin from 2001 to 2021 unit:10⁸ m³

年份	总效应	技术效应	生产效应	节水效应	水足迹强度效应	经济效应	人口变化效应
2001	0	0	0	0	0	0	0
2002	-1.96	-19.90	16.91	-56.15	39.11	18.84	-0.78
2003	-7.43	-0.10	-7.49	3.47	4.07	-5.24	-2.14
2004	10.80	3.55	7.25	83.86	-91.24	9.40	-2.01
2005	-2.30	-7.14	5.52	-9.79	4.06	7.20	-2.15
2006	30.83	46.82	-15.01	-299.39	314.10	-16.36	0.66
2007	0.11	-10.72	9.88	78.67	-88.29	10.30	0.27
2008	-17.79	-24.94	6.67	325.39	-332.18	6.77	0.49
2009	3.10	-2.55	4.26	-196.41	192.14	6.40	-0.74
2010	-6.85	-9.09	-0.23	96.14	-95.94	4.53	-2.26
2011	43.45	42.11	-2.84	-297.22	300.02	3.90	-2.52
2012	-32.64	-30.81	3.75	144.58	-146.76	-2.47	-0.91
2013	20.60	28.48	-12.41	-22.34	33.83	-3.09	-3.87
2014	-26.53	-24.04	-7.03	69.98	-63.05	-0.89	-1.51
2015	14.95	10.60	-0.80	-48.62	49.41	8.54	-4.16
2016	-1.57	-2.89	-5.44	79.47	-74.04	8.13	-6.80
2017	-6.18	-0.53	-10.53	11.95	-1.64	1.00	-6.43
2018	-1.97	-8.71	3.86	50.38	-54.50	13.55	-6.56
2019	-18.05	-19.60	0.38	-24.40	24.11	5.66	-4.21
2020	-17.34	-15.36	-3.99	-149.61	153.52	3.60	-5.50
2021	18.83	16.13	5.38	157.36	-162.74	3.14	-0.44

2012 年表现为抑制作用,其余年份均表现为促进作用。人口变化效应整体表现为抑制作用,累积效应为-51.55 亿 m³;其中,2006 年、2007 年和 2008 年的人口变化效应表现为促进作用,其余年份均表现为抑制作用。这主要由于计划生育政策的实施和城市化进程的加速,大量农村人口流入城市从事非农工作,导致农村人口逐年减少。农村人口结构的改变是农业水足迹变化的主要原因。

表 3 为 2001—2021 年四川盆地作物水足迹变化各驱动因素的贡献率,可以看出多重效应的相对变化叠加结果呈现一定的波动性。由表 3 可见,研究时段内贡献率大致可分为两个阶段,第一阶段为 2001—2015 年,总效应的贡献率为 0.8~1.2,说明各驱动因素的叠加对总效应起到了双向驱动作用;第二阶段为 2016—2021 年,总效应的贡献率小于 1,表示各驱动因素的叠加抑制了总效应。2011 年的总效应贡献率最大,为 1.1964,贡献值达到峰值(43.45 亿 m³);但 2012 年总效应贡献率降为最低,为 0.8767,只有生产效应和节水效应起到了促进作用,而技术效应、水足迹强度效应、经济效应和人口变化效应都起到了抑制作用。在 2016 年以后,为贯彻 2016 年中央一号文件精神,四川盆地各市大力发展节水农业,随着农业生产技术的提升,土地生产力不断提高,节水能力加强,农业用水效率从 2016 年的 0.54 提升到 2021 年的 0.56,因此技术效应对农业水足迹起到了抑制作用;农业人口的持续减少,也

是导致农业水足迹减少的主要因素;只有经济效应对农业水足迹起到了促进作用,多年累积效应贡献率达到 1.4494。

3.2.2 局部差异分析

表 4 为四川盆地各市作物水足迹变化各驱动因素分解量。由表 4 可见,四川盆地各市的技术效应均为负值,对总效应的增长起到了抑制作用,表明 2001—2021 年四川盆地农业生产技术不断提高,对减少作物用水效果明显。然而,技术效应的抑制作用也存在显著的空间差异。巴中市技术效应的抑制作用最强,贡献值达到-5.57 亿 m³,成都市技术效应的抑制作用最小,贡献值仅为-0.21 亿 m³。成都市位于水资源丰富的都江堰灌区,农业生产技术较为先进,因此通过突破技术瓶颈带来的水资源利用效率提升较为有限;与成都市相比,农业生产技术较为落后的巴中市,通过提高农业生产技术减少农业用水的潜力较大。与技术效应不同,生产效应、节水效应和水足迹强度效应均表现为双向驱动作用,均呈现较强的空间差异特征。经济效应是四川盆地作物水足迹增长的主要促进因素。其中巴中市的贡献值最大,超过 10 亿 m³,成都市贡献值最小。与技术效应相似,人口变化效应也是抑制水足迹增长的重要因素。达州市人口变化效应的抑制作用最强,达到-5.86 亿 m³,自贡市人口变化效应的抑制作用相对较低,仅有-1.54 亿 m³。说明农业人口的减少将导致农业用水的下降。

表 3 2001—2021 年四川盆地作物水足迹变化各驱动因素贡献率

Table 3 Contribution rates of factors affecting changes in crop water footprint in the Sichuan Basin from 2001 to 2021							
年份	总效应	技术效应	生产效应	节水效应	水足迹强度效应	经济效应	人口变化效应
2001	1	1	1	1	1	1	1
2002	0.9908	0.9103	1.0831	0.7671	1.2029	1.0930	0.9963
2003	0.9648	0.9995	0.9645	1.0169	1.0199	0.9750	0.9897
2004	1.0531	1.0171	1.0353	1.4945	0.6459	1.0461	0.9904
2005	0.9892	0.9671	1.0262	0.9551	1.0193	1.0344	0.9899
2006	1.1455	1.2291	0.9360	0.2673	3.9914	0.9304	1.0029
2007	1.0005	0.9568	1.0415	1.3827	0.6951	1.0434	1.0011
2008	0.9267	0.8988	1.0290	4.0219	0.2415	1.0294	1.0021
2009	1.0138	0.9888	1.0190	0.4203	2.3351	1.0287	0.9967
2010	0.9700	0.9604	0.9990	1.5340	0.6525	1.0204	0.9900
2011	1.1964	1.1898	0.9884	0.2933	3.4487	1.0162	0.9897
2012	0.8767	0.8832	1.0152	1.7912	0.5534	0.9901	0.9963
2013	1.0888	1.1248	0.9501	0.9119	1.1499	0.9873	0.9842
2014	0.8950	0.9044	0.9711	1.3399	0.7683	0.9963	0.9937
2015	1.0661	1.0464	0.9966	0.8120	1.2356	1.0372	0.9824
2016	0.9935	0.9881	0.9776	1.3919	0.7348	1.0344	0.9721
2017	0.9742	0.9978	0.9564	1.0518	0.9931	1.0042	0.9732
2018	0.9916	0.9632	1.0168	1.2421	0.7910	1.0601	0.9722
2019	0.9220	0.9156	1.0017	0.8960	1.1146	1.0258	0.9813
2020	0.9187	0.9277	0.9807	0.4812	2.1181	1.0178	0.9735
2021	1.0961	1.0817	1.0266	2.1524	0.4526	1.0154	0.9979

表 4 四川盆地各市作物水足迹变化各驱动因素分解量

单位:亿 m³

Table 4 Decomposition of factors affecting changes in crop water footprint of cities in the Sichuan Basin

unit:10⁸ m³

城市	总效应	技术效应	生产效应	节水效应	水足迹强度效应	经济效应	人口变化效应
巴中市	2.96	-5.57	4.68	3.37	-7.90	10.71	-2.33
成都市	-7.61	-0.21	-4.31	0.82	3.42	-1.68	-5.64
达州市	2.40	-0.72	-3.10	69.33	-66.21	8.96	-5.86
德阳市	1.51	-1.31	2.10	-8.72	6.54	6.62	-3.73
广安市	-0.16	-1.75	-0.82	2.87	-2.02	3.11	-1.56
广元市	3.15	-4.62	5.94	-2.91	-2.98	9.48	-1.76
乐山市	0.27	-1.18	-2.04	-15.50	17.49	3.48	-2.07
泸州市	1.23	-0.87	-4.30	8.90	-4.74	5.73	-3.49
眉山市	-2.14	-0.96	-1.79	-16.65	19.48	1.94	-4.16
绵阳市	2.34	-3.17	3.55	-0.92	-2.77	9.79	-4.14
南充市	1.71	-3.28	2.51	6.37	-8.88	8.40	-3.41
内江市	0.06	-1.62	-2.59	-1.95	4.50	3.76	-2.03
遂宁市	0.04	-3.15	0.50	4.98	-5.52	5.79	-2.56
宜宾市	0.70	-1.64	-7.98	6.00	1.94	5.63	-3.26
资阳市	-4.44	-3.83	1.20	-4.34	3.12	4.86	-5.44
自贡市	0.06	-0.96	-4.49	-1.30	6.83	1.51	-1.54

图 3 为四川盆地作物水足迹驱动因素贡献率的空间分布。由图 3 可见,技术效应和人口变化效应平均值均小于 1,是影响作物水足迹的主要抑制因素。地形复杂的北部山区,如巴中市,技术效应的抑

制作用最强,贡献率为 0.6277,而在四川盆地南缘及成都平原地区的抑制作用较弱。说明在地形复杂的山地地区通过提高农业生产技术来降低作物水足迹的效果比在平原地区好。人口变化效应与技术效

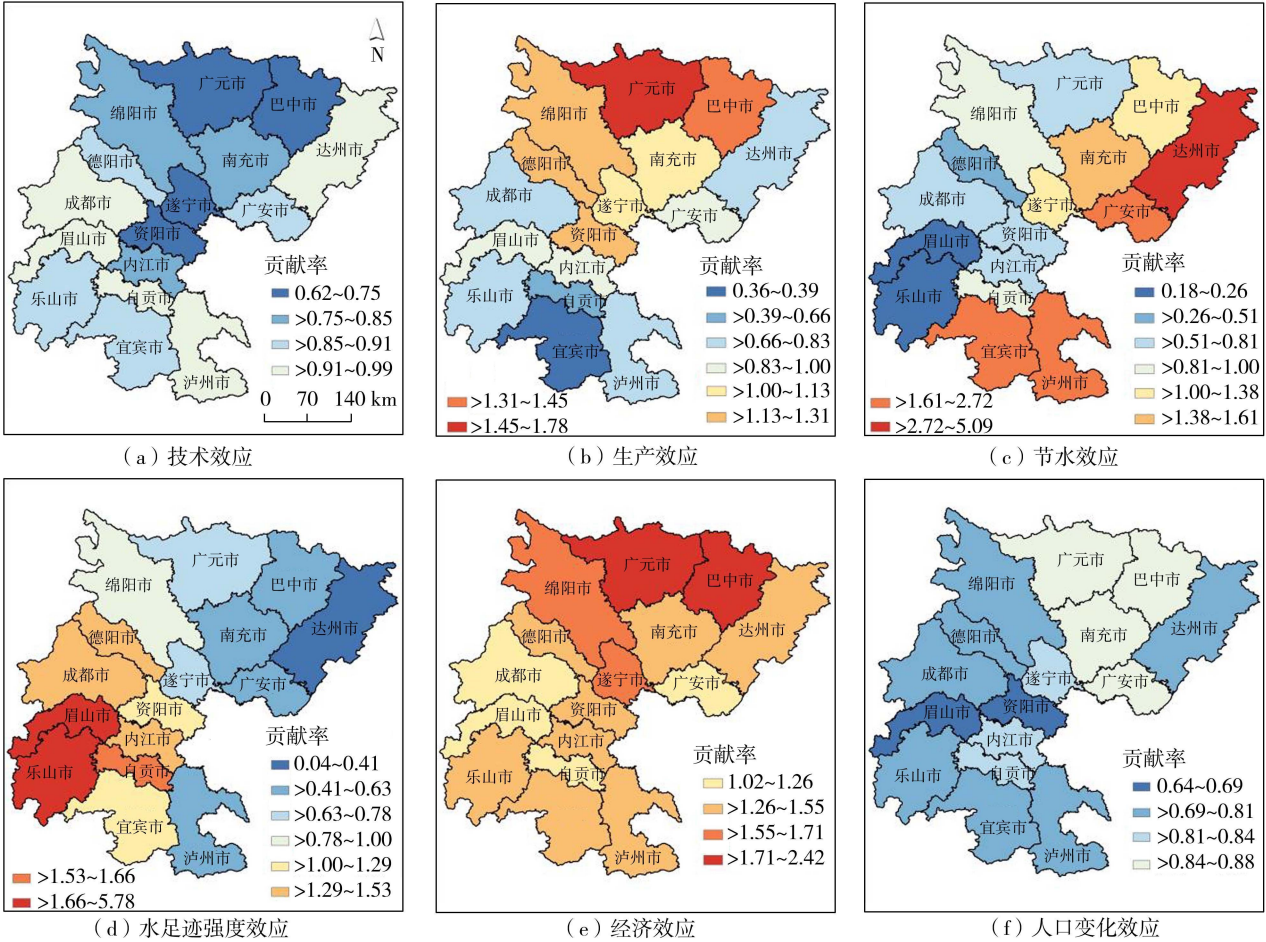


图 3 四川盆地作物水足迹驱动因素贡献率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of contribution rates of driving factors for crop water footprint in the Sichuan Basin

应在空间上的差异特征相反,表现为南部的抑制作用强于北部。这一现象可以归因于南部经济发达地区如资阳市、眉山市和成都市的农业人口逐年减少,这不仅减少了对水资源的需求,也减少了农业活动的规模。而在经济相对落后的北部低山区,农业人口变化幅度相对较低,作物种植面积较稳定,因此人口变化对作物水足迹的影响程度较低。生产效应、节水效应和水足迹强度效应具有较强的双向驱动作用。其中,生产效应在四川盆地北部表现为促进作用,而在南部地区多表现为抑制作用。广元市生产效应的促进作用最强,贡献率达到 1.7818;抑制作用最强的是宜宾市,贡献率为 0.3678。节水效应在四川盆地北部和南部地区表现为促进作用,而在以成都市为中心的中部地区表现为抑制作用。对于水足迹强度效应而言,整体呈现出四川盆地北部为抑制作用,南部为促进作用。眉山市和乐山市促进作用较强,抑制作用最强的是达州市,贡献率仅有 0.0404。经济效应对各市作物水足迹的驱动作用均表现为促进作用,在四川盆地北部地区驱动作用较强,南部地区驱动作用较弱。

3.3 节水建议

综合来看,2001—2021 年四川盆地整体作物水足迹变化不大,但在空间上差异显著,仍然有部分地区作物水足迹较大。为了减少作物水足迹,提升作物用水效率,提出以下建议:

- a. 对于绿水足迹较大的地区,需要充分利用有效降水量,适当调整作物种植结构,减少高耗水作物。对于绿水足迹最大的达州市,可以考虑在农田周围修建大型蓄水库或蓄水池,收集更多的降雨,提高绿水足迹的利用率。对于蓝水足迹和白水足迹较大的南充市,关键在于提升灌溉效率,减少灌溉过程中的水资源浪费,应增加对农业水利设施的投资,改善灌溉基础设施,如修建和优化引水渠道,确保充分地利用河流和其他水体资源,保障作物充分灌溉。对于灰水足迹较大的南充市、绵阳市和达州市,应在保障粮食产量的前提下减少化肥使用,提高施肥效率。这不仅可以减少环境污染,也促进了农业的可持续发展,使农业生产更加环保和高效。
- b. 通过 LMDI 模型分解可以看出,经济效应、人口变化效应和技术效应是影响作物水足迹最强的因素。在经济效应方面,四川盆地北部较为显著,特别是在巴中市和广元市,农业收入水平的提高直接推动了农业水资源的大量消耗,因此这些区域应该重视优化作物种植结构,减少高耗水作物种植,转向更多耗水较少的经济作物种植。在人口变化效应方面,农业人口的减少在四川盆地南部,如资阳市和眉

山市,带来了正面的节水效果,但也伴随农村劳动力短缺和耕地撂荒问题。对此,建议政府和相关部门采取措施减缓城乡差异,制定政策引导适度的农业人口流动,确保农业生产的连续性和稳定性。在技术效应方面,四川盆地各地区通过持续改善农业基础设施和引进现代灌溉技术,显著提高了作物用水效率。

4 结 论

- a. 2001—2021 年,四川盆地作物水足迹呈现波动性,先升后降。蓝水和白水足迹波动显著,与年降水量及灌溉技术直接关联。相较之下,绿水和灰水足迹先增后减,反映出气候变化和农业生产方式的调整。四川盆地作物水足迹空间分布呈北高南低态势。北部的南充市、德阳市和绵阳市水足迹较高,南部的乐山市、自贡市和内江市水足迹较低。
- b. 从全局来看,四川盆地作物水足迹的变化主要受到 6 种驱动因素的影响。技术效应、生产效应、节水效应和人口变化效应表现为抑制作用,这与农业生产技术的进步、生产力的提升和更高效的水资源管理有关;而水足迹强度效应和经济效应则表现为促进因素,反映了随经济发展和农业投入增加导致的农业用水的增加。
- c. 从局部来看,各驱动因素存在显著的空间差异特征。技术效应在盆地北部显著,尤其是巴中市,通过提升农业技术有效抑制了作物水足迹增长;而在盆地南部和成都平原,技术进步对作物水足迹的影响较小。人口变化效应在盆地南部更为显著,快速城市化导致农业劳动力减少,进而抑制了作物水足迹增长。经济效应在盆地北部较强,推动了作物水足迹增长,而在盆地南部效应减弱。此外,生产效应、节水效应和水足迹强度效应均显示出明显的双向驱动作用,表明地区间差异对水资源管理政策的制定至关重要。

参考文献:

[1] 曹永强,杨雪婷,周姝含. 河北省夏玉米水足迹时空演变特征及影响因子分析[J]. 长江科学院院报,2023,40(2): 67-74. (CAO Yongqiang, YANG Xueting, ZHOU Shuhan. Spatial and temporal evolution and influencing factors of water footprint of summer maize in Hebei Province [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(2): 67-74. (in Chinese))

[2] 田贵良,盛雨,卢曦. 水权交易市场运行对试点地区水资源利用效率影响研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(6): 146-155. (TIAN Guiliang, SHENG Yu, LU Xi. On the influence of water rights trading market operation on water resource use efficiency in pilot areas

- [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(6):146-155. (in Chinese))
- [3] HAMIDI A, RAMAVANDI B, SORIAL G A. Sponge city: an emerging concept in sustainable water resource management; a scientometric analysis [J]. Resources, Environment and Sustainability, 2021, 5: 100028.
- [4] SHU Rui, CAO Xinchun, WU Mengyang. Clarifying regional water scarcity in agriculture based on the theory of blue, green and grey water footprints [J]. Water Resources Management, 2021, 35(3): 1101-1118.
- [5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [J]. Water Science & Technology, 2002, 49(11): 203-209.
- [6] 吴灏, 王杰, 黄英, 等. 昆明地区玉米需水量及灌溉用水量研究 [J]. 节水灌溉, 2015(2): 50-53. (WU Hao, WANG Jie, HUANG Ying, et al. Study on crop water requirement and irrigation requirement of rice in Kunming [J]. Water Saving Irrigation, 2015(2): 50-53. (in Chinese))
- [7] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究 [J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 22-27. (WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 22-27. (in Chinese))
- [8] 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 Qiuxiang, LI Xinying, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution of agricultural water footprint and analysis of water use efficiency in Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2020, 51(11): 87-96. (in Chinese))
- [9] 姜秋香, 吴云星, 王子龙, 等. 黑龙江省水足迹时空分布规律及空间均衡分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 122-131. (JANG Qiuxiang, WU Yunxing, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution and spatial equilibrium analysis of water footprint in Heilongjiang Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 122-131. (in Chinese))
- [10] ZENG Z, LIU J, KOENEMAN P H, et al. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2771-2781.
- [11] 姜旭海, 韩玲, 李帆. 陕西省主要作物灰水足迹时空变化特征研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 210-215. (JIANG Xuhai, HAN Ling, LI Fan. Study on temporal and spatial changes of grey water footprints of main crops in Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 210-215. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] ABABAEI B, ETEDALI H R. Water footprint assessment of main cereals in Iran [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 401-411.
- [14] CAO Xinchun, ZENG Wen, WU Mengyang, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation [J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 106027.
- [15] ZENG Wen, CAO Xinchun, HUANG Xuan, 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.
- [16] 姚懿真, 杨贵羽, 汪林, 等. 基于 IPAT 模型的河北省灰水足迹分析及预测 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 36-42. (YAO Yizhen, YANG Guiyu, WANG Lin, et al. IPAT model-based prediction and analysis on grey water footprint of Hebei Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 36-42. (in Chinese))
- [17] 宋晓薇. 环境规制下金融资源空间配置对区域技术创新的作用机制研究 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2017.
- [18] ZHAO Chunfu, CHEN Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [19] 奚旭, 孙才志, 赵良仕. 基于 IPAT-LMDI 的中国水足迹变化驱动力分析 [J]. 水利经济, 2014, 32(5): 1-5. (XI Xu, SUN Caizhi, ZHAO Liangshi. Driving forces for change of water footprint in China based on IPAT-LMDI model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(5): 1-5. (in Chinese))
- [20] 马凤才, 刘倩男. 黑龙江省“粮食作物水足迹强度”空间关联格局及影响因素研究 [J]. 生态经济, 2021, 37(12): 121-127. (MA Fengcai, LIU Qiannan. Spatial correlation pattern and influencing factors of “water footprint intensity of grain crops” in Heilongjiang Province [J]. Ecological Economy, 2021, 37(12): 121-127. (in Chinese))
- [21] 韩宇平, 马伏彬, 贾冬冬, 等. 基于 BP-DEMATEL 的山西省冬小麦水足迹影响因素识别 [J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 9-15. (HAN Yuping, MA Fuli, JIA Dongdong, et al. Identification of influencing factors on water footprint of winter wheat in Shanxi Province based on BP-DEMATEL [J]. Water Resources Protection, 2024,

40(2):9-15. (in Chinese))

[22] 贾浩,李硕,宋英杰,等. 沧州市农业水足迹变化特征与驱动因素分析[J]. 中国农业大学学报,2018,23(6):1-14. (JIA Hao, LI Shuo, SONG Yingjie, et al. Variation characteristics and driving factors of agriculture water footprint in Cangzhou City [J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(6):1-14. (in Chinese))

[23] 李艾雯,冉敏,宋靛颖,等. 四川盆地耕地表层土壤有机碳含量空间分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(5):1102-1112. (LI Aiwen,RAN Min, SONG Liangying, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of cropland top soil organic carbon content in the Sichuan Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(5):1102-1112. (in Chinese))

[24] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(5):1-8. (in Chinese))

[25] ALLEN R G, SMITH M, PEREIRA L S. An update for the calculation of reference evapotranspiration [J]. ICID Bulletin,1994,43(2):35-92.

[26] 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.

[27] 黄丽,王武林. 中亚五国粮食生产水足迹及水消耗量预测[J]. 经济地理,2021,41(4):118-126. (HUANG Li, WANG Wulin. Water footprint and water consumption prediction of food crop production in Five Central Asian Countries[J]. Economic Geography, 2021, 41(4):118-126. (in Chinese))

[28] 王楚珏,李昂,李璐骥. 基于灰水足迹不好产出的黄河流域农业用水效率评价[J]. 中国农学通报,2022,38(31):105-112. (WANG Chujue, LI Ang, LI Luji. Evaluation of agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin based on undesirable output of grey water footprint[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022,38(31):105-112. (in Chinese))

[29] JOHAN A, DELPHINE F, KOEN S. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals[J]. Energy Policy,2002,30(9):727-736.

[30] ANG B W. LMDI decomposition approach: a guide for implementation[J]. Energy Policy,2015,86:233-238. (收稿日期:2024-05-20 编辑:王芳)

(上接第98页)

[18] 李研,刘艳芳,王程程. 基于 AHP-熵权 TOPSIS 法的湖北省县域资源环境承载力评价和空间差异分析[J]. 资源与产业,2017,19(4):41-51. (LI Yan, LIU Yanfang, WANG Chengcheng. County resource and environmental carrying capacity and spatial difference of Hubei Province based on AHP entropy and TOPSIS [J]. Resources & Industries,2017,19(4):41-51. (in Chinese))

[19] 杨保安,张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海:东华大学出版社,2008.

[20] 胡久清. 系统工程[M]. 北京:中国统计出版社,1999.

[21] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (ZHANG Xiaofeng, SHI Yongjie, LIU Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[22] 舒欢,刘文娜. 基于组合赋权-TOPSIS 模型的水利工程建设方案优选决策方法[J]. 工程管理学报,2013,27(4):83-86. (SHU Huan, LIU Wenna. Hydraulic engineering construction program optimal choice based on empowerment combination TOPSIS model[J]. Journal of Engineering Management, 2013, 27(4):83-86. (in Chinese))

[23] BERRITTELLA M, LA FRANCA L, ZITO P. An analytic hierarchy process for ranking operating costs of low cost and full service airlines [J]. Journal of Air Transport Management,2009,15(5):249-255.

[24] 魏后凯. 建设长江经济带及重庆应对策略[J]. 改革,2014(6):13-15. (WEI Houkai. Construction of the Yangtze River Economic Belt and Chongqing's response strategies[J]. Reform,2014(6):13-15. (in Chinese))

[25] YAO Longqin, XU Jingru, ZHANG Lina, et al. Temporal-spatial decomposition computing of regional water intensity for Yangtze River Economic Zone in China based on LMDI model [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems,2019,21:119-128.

[26] 王振,周海旺,王晓娟. 长江经济带发展报告(2019—2020)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2021.

[27] 王中敏,张令茹. 长江经济带建设中水资源利用问题与保护对策研究[J]. 中国水利,2018(11):1-3. (WANG Zhongmin, ZHANG Lingru. Research on problems and protection countermeasures of utilization of water resources in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Water Resources,2018(11):1-3. (in Chinese))

[28] 由一迪. 长江经济带发展政策评价[J]. 中国市场,2019(34):8-15. (YOU Yidi. Evaluation of development policies in the Yangtze River economic belt [J]. China Market,2019(34):8-15. (in Chinese)) (收稿日期:2024-07-19 编辑:王芳)