陈逸琛,陈惠鑫,何俊卿,等.基于机器学习的脱钩约束下中国省际农业用水效率时空演变及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):7030-7043.
Chen Y C, Chen H X, He J Q, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural water use efficiency in China under decoupling constraints based on machine learning [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):7030-7043.

基于机器学习的脱钩约束下中国省际农业用水效率时空演变及影响因素

陈逸琛[1],陈惠鑫[2],何俊卿[3],倪润祥[4],余文梦[4*] (1.福州大学,福建 福州 350108；2.全国市长研修学院,北京 100029；3.中国人民大学,北京 100101；4.农业农村部农业生态与资源保护总站,北京 100125)

摘要：基于 2007~2022 年我国 31 个省份面板数据,运用超效率(SBM)模型在经济增长与水资源消耗脱钩约束下测算农业用水效率,结合 ArcGIS 莫兰指数分析其时空演变特征,并采用随机森林模型识别关键影响因素及其非线性响应机制.结果表明:(1)我国农业用水效率整体呈波动上升态势,区域效率呈“东高西低,南高北低”分布格局;(2)农业用水效率总体格局呈显著空间自相关,空间集聚特征持续增强;局部格局呈明显的东南和西北分异,热点区向西部和南部扩张,冷点区由华北向东北移动;(3)经济发展水平和水资源禀赋对农业用水效率的影响高于技术投入和种植结构,其中经济发展、技术进步与资本投入的影响呈阶梯式上升,而水资源禀赋的作用则呈现“下降-上升-稳定”特征,且水稻与玉米主产区的用水效率提升潜力高于小麦主产区.基于此,建议高效区推广智慧灌溉,低效区强化节水设施与结构优化;热点区注重经验推广,冷点区加强水资源管控,优化种植结构.

关键词：农业用水；脱钩；超效率 SBM；时空演变；随机森林
中图分类号：X21,F323.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-7030-14

Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural water use efficiency in China under decoupling constraints based on machine learning. CHEN Yi-chen[1], CHEN Hui-xin[2], HE Jun-qing[3], NI Run-xiang[4], YU Wen-meng[4*] (1.Fuzhou University, Fuzhou 350108, China；2.National Academy for Mayors of China, Beijing 100029, China；3.Renmin University of China, Beijing 100101, China；4.Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：7030~7043

Abstract：Using panel data for 31 provinces from 2007 to 2022, this study applied the super-efficiency Slack-Based Measure (SBM) model to measure agricultural water use efficiency under the constraint of decoupling economic growth from water resource consumption. Spatial dynamics were assessed using Moran’s I index in ArcGIS, while the Random Forest model was employed to identify key influencing factors and their nonlinear effects. The results showed that China’s agricultural water use efficiency exhibited a fluctuating yet overall upward trend, with a spatial distribution pattern characterized by “higher in the east and south, lower in the west and north.” The overall pattern was found to demonstrate significant spatial autocorrelation, with spatial agglomeration increasingly strengthened. At the local scale, a clear southeast-northwest differentiation was observed, where hotspots expanded toward the west and south, and cold spots shifted from the north toward the northeast. Economic development level and water resource endowment were identified as having greater impacts on agricultural water use efficiency than technological investment and cropping structure. Specifically, the effects of economic development, technological progress, and capital investment followed a stepwise upward pattern, whereas the influence of water resource endowment displayed a “decline-increase-stabilization” trajectory. Furthermore, provinces dominated by rice and maize cultivation were found to have greater potential for efficiency improvement than those dominated by wheat cultivation. Policy recommendations were proposed, including the promotion of smart irrigation in high-efficiency regions, the enhancement of water-saving infrastructure and optimization of cropping patterns in low-efficiency regions, the sharing of best practices in hotspot areas, and the strengthening of governance and structural adjustment in coldspot regions.

Key words：agricultural water use；decoupling；super-efficiency SBM；spatiotemporal evolution；random forest

农业是我国最大的用水行业,2024 年全国农业用水总量达 3648.4 亿 m^3,占总用水量的 61.6%,其中大部分用于粮食生产[1].然而,农业用水方式仍然较为粗放,水资源利用效率较低,灌溉水有效利用系数偏低,农业面源污染问题依然突出,已成为制约我国农业可持续发展的主要瓶颈之一[2].在“双碳”目标

收稿日期：2025-05-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFD1700505-01);福建省自然科学基金项目(2025J01454)
* 责任作者, 农艺师, yuwenmeng95@163.com

背景下,如何在资源环境约束条件下优化农业用水效率,实现农业经济增长与水资源消耗的脱钩,成为推动农业绿色高质量发展的关键任务.近年来,我国政府相继出台多项政策推动农业节水与高效用水[3].《水污染防治行动计划》提出“以水定产”原则,在确保粮食安全的同时优化农业用水结构、提升水资源利用效率[4].《关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》进一步强调“生态优先、节约集约、绿色低碳”的发展导向[5].在此背景下,从脱钩约束视角系统评估农业经济增长与用水变化间的关系,对于精准制定节水政策和优化水资源配置具有重要意义.

现有研究主要围绕农业用水效率的测度与影响因素展开.总体而言,农业用水效率评价主要有两类路径:一是基于最优与实际用水量比值的直接测度[6],二是基于农业经济增长与水资源消耗关系的脱钩分析[7].在方法上,常用的有评价指标法、全要素生产率分析(TFP)、数据包络分析(DEA)、随机前沿分析(SFA)[8-12].其中,结合超效率(SBM)模型与Malmquist 指数的方法能够在考虑非期望产出的同时,动态刻画农业用水效率的时空演变趋势.实证研究显示,我国农业用水的农作物吸收率仅为 0.53,而发达国家可达到 0.7~0.8,表明我国农业用水效率仍有较大提升空间[13-14].在研究尺度上,现有研究多集中于国家[8]、区域[15]、流域[16]、省域[17]或城市层面[18],涵盖不同空间层级下农业用水效率的特征分析与比较研究,为后续深入研究提供理论与实证基础.

在影响因素方面,已有研究指出农业用水效率受资源禀赋[19-20]、科技水平[21-22]、种植结构[23-24]、水价政策[25-26]以及农户行为[27]等多重因素影响.农业科技进步是推动农业用水效率提升的核心动力[17],种植结构和水价机制改革也能显著改善节水绩效[19-23].在方法上,学者们多采用 Tobit 模型[10]、地理加权回归(GWR)[8]和灰色关联分析法[28]等.近年来,机器学习技术凭借强大的非线性建模能力,在农业水资源管理和用水效率评估等领域得到了广泛应用.例如,支持向量回归(SVR)、随机森林(RF)和深度神经网络(DNN)等方法可用于识别农业用水效率的关键影响因素,并提高效率测算的精度[29-31].为农业节水与用水效率的提升提供更精确的决策支持[32].

尽管已有研究对农业用水效率已有较深入研究,但在评价目标、研究尺度与方法技术上仍存在改进空间.一是在目标取向上,传统研究多以经济产出为核心,缺乏对节水与绿色转型目标的系统评估;另二是在研究尺度上,关于省际尺度的时空演变与差异性揭示相对薄弱,难以支撑跨区域比较与分区施策;三是在技术方法上,影响因素分析多依赖线性设定,难以准确刻画复杂的非线性关系与阈值效应.基于此,本文引入脱钩约束视角,将农业用水与农业经济产出的脱钩关系纳入效率测度框架,采用超效率 SBM 模型和 Malmquist 指数,评估我国省际农业用水效率的时空演变特征,并结合机器学习方法探讨其关键影响因素的非线性响应机制.研究旨在揭示我国农业用水效率的时空演变规律,为农业水资源优化配置、区域差异化管理与农业绿色高质量发展提供科学依据和决策支持.

1　研究方法与数据说明

1.1　研究方法

1.1.1　研究框架　(1)农业生产要素配置对农业用水效率的影响机制　基于柯布—道格拉斯生产函数及相关研究,农业用水效率取决于农业用水、耕地、劳动力、机械动力和化肥等投入的合理组合.用水效率受灌溉方式、管理水平和水资源调控能力影响[33];耕地规模关系到单位面积用水强度;劳动力素质与管理水平决定生产的精细化程度[34];适度机械化可提升效率,过度则可能导致浪费[35];化肥投入应适量,过量会引发土壤污染与水资源浪费[36].因此,优化生产要素配置是提升用水效率和实现水资源可持续利用的基础条件.

(2)农业用水与产出脱钩效应对农业用水效率的影响　农业用水与产出的脱钩效应反映了经济增长与水资源消耗的动态关系[37].在“以水定产”政策背景下,实现农业经济增长的同时降低农业用水消耗,已成为农业水资源可持续利用的重要目标[38].根据脱钩理论,不同类型脱钩等级体现了效率水平的差异[39].将脱钩等级纳入效率评价有助于科学评估农业水资源利用的可持续性,并为农业节水政策提供决策依据.

(3)农业生产外部条件对农业用水效率的影响机理　水资源禀赋、种植结构、技术水平、经济发展水平及固定资产投资等外部条件,均对农业用水

效率具有重要影响.水资源丰富地区虽具备完善灌溉条件,但若依赖传统方式易造成浪费;资源短缺地区更倾向于采用节水技术,提高单位水产出[40].高耗水作物比例高会降低效率,耐旱作物占比高则效率较高[41].高效节水与精准农业技术能减少浪费并提高利用率[42].经济发达和投资充足地区具备更强的水利设施建设与产业优化能力,从而提升效率并增强抗旱能力[43-44].因此,改善农业生产外部条件是提升农业用水效率的关键路径.

基于上述机制分析,为系统揭示脱钩约束下省域农业用水效率的时空演变特征及影响因素,本文以我国七大地理分区(华北、东北、华东、华中、华南、西南、西北)为研究单元[45],分析各分区所涵盖省级行政区的农业用水效率特征.运用 Vehmans 脱钩指数法[4]测算农业用水与产出的脱钩水平,通过超效率 SBM 模型评估 2007~2022 年各省份农业用水效率并分析其时空变化规律;结合 ArcGIS 可视化结果,运用 Global Moran's I 指数评估全局空间相关性与差异格局,再通过热点 G_i*指数识别局部空间集聚特征及其演变;最后利用机器学习的随机森林模型,探讨效率演变的关键影响因素及其非线性作用机制.研究框架如图 1 所示.

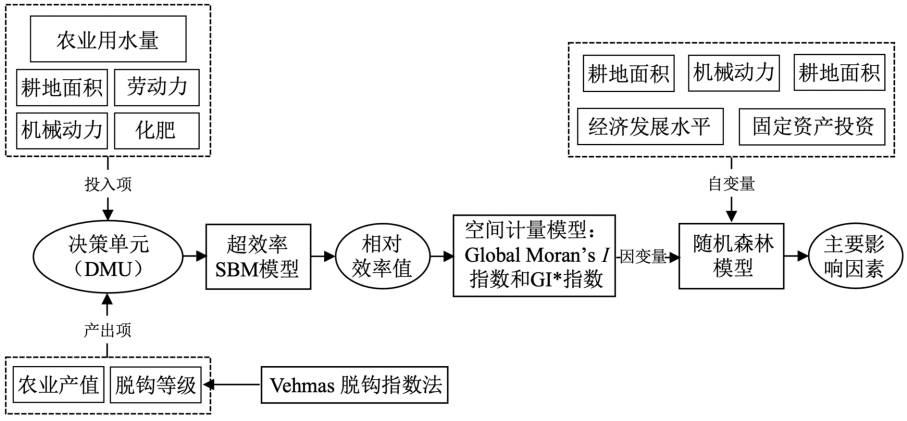


图 1 中国农业用水效率时空演变与影响因素分析框架

Fig.1 Research framework for the spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural water use efficiency in China

1.1.2 农业用水与产出脱钩等级评价方法 为测度农业用水与产出之间的动态关系,本文采用 Vehmas 脱钩指数法,通过计算特定时期内农业用水变动率与农业产出变动率的比值,以判断二者之间的脱钩状态[5].鉴于农业产值能够较好地反映农业经济增长水平,本文选取农业产值作为产出的代理变量,具体计算公式如下:

$$D_t = \frac{\Delta W_t}{\Delta E_t} = \frac{\left(W_t - W_{t-1}\right)/W_{t-1}}{\left(E_t - E_{t-1}\right)/E_{t-1}} \tag{1}$$

式中:D_t 为 t 年的脱钩指数;ΔW_t 和 ΔE_t 分别为农业用水量和农业产出的变动率;W_t 和 W_{t-1} 分别 t 年和 t−1 年的农业用水量,亿 m^3;E_t 和 E_{t-1} 分别 t 年和 t−1 年的农业产值,亿元.

由于相同的脱钩指数值可能对应不同的脱钩状态,为更精准刻画农业用水与产出之间的耦合关系,本文依据水资源高效利用原则,参考理想状态下农业用水与产出关系的变化特征,对脱钩类型进行分类,并赋予相应权重(表 1)[27].按照脱钩程度由高到低,依次划分为 8 种类型,并赋值如下:强脱钩(8),弱脱钩(7),扩张性耦合(6),扩张性负脱钩(5),衰退性脱钩(4),衰退性耦合(3),弱负脱钩(2),强负脱钩(1).该分类体系能够较为全面地反映农业用水与产出之间的动态关系.在后续的效率测度中,本文将各省份的脱钩等级作为期望产出变量之一,并纳入超效率 SBM 模型,以体现农业经济增长与水资源消耗的脱钩约束.

1.1.3 超效率 SBM 模型 在测算农业用水效率时,本文将鉴于农业用水效率属于单要素效率,而在不同生产要素间可能存在替代效应,直接采用全要素效率测算方法可能导致结果偏差[24].相较而言,超效率加权 SBM 模型能够在充分考虑生产要素替代关系的基础上,通过对投入产出要素赋权,降低其他生

产要素对单要素效率测算的干扰,从而提升测算精度[29].基于此,本文选用超效率 SBM 模型对农业用水效率进行测度,模型设定如下:

$$\min\rho=\frac{1+\dfrac{1}{\sum\limits_{i=1}^{m}w_i}\sum\limits_{i=1}^{m}\dfrac{w_i s_i}{x_{tik}}}{1-\dfrac{1}{\sum\limits_{r_1=1}^{q_1}w_{r_1}+\sum\limits_{r_2=1}^{q_2}w_{r_2}}\left(\sum\limits_{r=1}^{q_1}\dfrac{w_{r_1}s_r}{y_{trk}}+\sum\limits_{r=1}^{q_1}\dfrac{w_{r_1}s_c}{b_{tck}}\right)} \tag{2}$$

式中:W_i、Wr_1、Wr_2 分别为投入要素、期望产出和非期望产出的权重;m、q_1、q_2 分别为投入要素、期望产出和非期望产出的种类;x_{tik}、y_{trk}、b_{tck} 分别为第 k 个决策单元在 t 年的第 i、第 r、第 c 类投入要素、期望产出和非期望产出的取值;ρ 为农业用水效率值.S 为松弛变量,用于度量投入或产出偏离最优前沿的程度.

1.1.4　空间计量模型　(1)全局空间自相关 Global Moran's I 指数用于衡量区域内各空间单元的属性值是否存在空间相关性,揭示整体空间分布的聚集或离散趋势[31].其计算公式如下:

$$I=\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{n}W_{ij}\left(X_i-\bar{X}\right)}{S^2\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{3}$$

式中:n 为样本省域个数;X_i 和 X_j 分别为 i、j 省域的观测值;W_{ij} 为空间权重矩阵(相邻 W_{ij}=1,不相邻 W_{ij}=0);S^2 为观测值方差; $\bar{X}$ 为观测值均值.本文运用空间自相关指数来测度我国省际农业用水效率全局空间上的相关程度;在给定的显著水平下,若 Moran's I 值为正,表示效率呈显著的空间集聚;反之,若 Moran's I 值为负,则说明存在空间分异特征.

表 1　农业用水与产值的脱钩关系

Table 1　Decoupling relationship between agricultural water use and agricultural output

关系类型	D_t	ΔW_t	ΔE_t	含义	等级
强脱钩	<0	<0	>0	用水量减少,产值增加	8
弱脱钩	[0,0.8)	>0	>0	用水量和产值都增加,水量增加慢于产值增加	7
扩张性耦合	[0.8,1.2]	>0	>0	用水量和产值都增加,并速度保持基本一致	6
扩张性负脱钩	>1.2	>0	>0	用水量和产值都增加,水量增加快于产值增加	5
衰退性脱钩	>1.2	<0	<0	用水量和产值都减少,水量减少快于产值减少	4
衰退性耦合	[0.8,1.2]	<0	<0	用水量和产值都减少,并速度保持基本一致	3
弱负脱钩	[0,0.8)	<0	<0	用水量和产值都减少,水量减少慢于产值减少	2
强负脱钩	<0	>0	<0	用水量增加,产值减少	1

(2)局部空间关联(热点分析 G_i^*指数)G_i^*指数可识别局部空间的热点(高值聚集区)和冷点(低值聚集区),揭示空间关联的局部特征[31].其计算公式如下:

$$G_i^*=\sum_{j=1}^{n}W_{ij}X_j/\sum_{j=1}^{n}X_j \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为空间权重矩阵(相邻 $\boldsymbol{W}_{ij}$=1,不相邻 $\boldsymbol{W}_{ij}$=0).若 G_i^*指数为正显著,表明省域 i 周边区域农业用水效率较高,属于热点区;反之,则说明周边农业用水效率较低,属于冷点区.

本文综合运用 Global Moran's I 指数和 G_i^*指数分析我国省际农业用水效率的空间分布特征.旨在先通过 Global Moran's I 指数对效率在全域空间的关联性和分异格局,进而运用 G_i^*指数识别局部热点与冷点区域,揭示农业用水效率的空间演变规律.

1.1.5　随机森林模型　为进一步探究农业用水效率的关键驱动因素,本文采用随机森林模型进行回归分析.随机森林模型由 Breiman(2001)提出,是一种基于决策树的集成学习算法,具有较强的可解释性、鲁棒性,并能有效规避变量共线性及模型过拟合问题,同时能够对变量的重要性进行量化评估,具备较强的预测能力[29].其计算公式如下:

$$\mathrm{im}_i=\frac{1}{nt}\sum\nolimits_{v\in S_{xi}}\mathrm{Gain}\left(X_i,v\right) \tag{5}$$

式中:im_i 为 X_i 对模型的重要性贡献,本文采用 IncMSE(精度平均减少值)和 IncNodePurity(节点不纯度平均减少值)两种方法进行衡量.前者通过计算移除某一变量后模型预测误差增加的幅度来反映该变量的重要性;后者则基于变量在分裂节点上所带来的基尼不纯度减少量来评估其贡献.二者值越大,说明变量在模型中的重要性越高.S_{xi} 为 nt 棵回归

树中被由变量 X_i 分裂的节点集合;Gain(X_i,v)为 X_i 在分裂节点 v 的基尼信息增益,用于识别最大信息增益的预测变量[33].本文利用 R 语言平台对随机森林进行回归,参数如下:ntree=1000,mtry=3,其他参数采用默认值.

1.2 数据来源和变量说明

本文数据来源于《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》和《中国水利年鉴》,涵盖 2007~2022 年中国 31 个省(市、自治区,不含港澳台地区)相关数据,共 496 个样本,数据基本情况见表 2.在投入和产出指标选取上,综合考虑数据可获得性及既有研究关于农业水资源利用效率的评价体系[8,10,14],设定投入项包括:x_1 农业用水量、x_2 劳动力、x_3 种植面积、x_4 机械动力和 x_5 化肥;产出项包括:y_1 农业产值和 y_2 农业用水与产出的脱钩等级(表 2).

在解释变量选取方面,本文以省(市、自治区,不含港澳台地区)为样本,以脱钩约束下的农业用水效率为因变量,并结合相关研究结论[8,10,14-15,17],从五个维度构建自变量体系:水资源禀赋(以单位土地水资源量和年均降雨量表征)、技术和资产投入(以节水灌溉率、农业固定投资表征)、种植结构(以小麦、水稻、玉米的种植比重表征)、经济发展水平(以城镇化率、人均 GDP 表征)、气候条件(以气候区表征).具体如表 2 所示.

表 2 省域农业水资源利用效率的投入产出要素、影响因素与描述性统计

Table 2 Input–output elements, influencing factors, and descriptive statistics of provincial agricultural water use efficiency

类别	变量	变量解释	均值	标准差
产出项	农业产值	省域年农业总产值	924.92	710.01
	脱钩等级	省域农业用水与农业产值脱钩等级	6.92	1.59
投入项	农业用水量	省域年农业用水量(亿 m^3)	121.42	104.09
	劳动力	省域年农林牧渔业单位就业人数(万人)	10.34	16.85
	种植面积	省域年农作物种植面积(千 hm^2)	5241.79	3723.99
	机械动力	省域年农业机械总动力(kW·h)	3115.57	2867.95
	化肥	省域年化肥使用量(万 t)	183.55	146.33
影响因素	地均水资源量(WATER)	省域年土地单位面积水资源量(万 m^3/hm^2)	43.23	36.80
	年降雨量(RAI)	省域年降雨量(mm)	939.05	509.76
	节水灌溉率(IRR)	省域年节水灌溉面积占耕地面积的比重	0.28	0.22
	水稻比重(RICE)	省域年水稻种植面积占农作物种植面积比重	0.18	0.17
	小麦比重(WHEAT)	省域年小麦种植面积占农作物种植面积比重	0.13	0.11
	玉米比重(CORN)	省域年玉米种植面积占农作物种植面积比重	0.20	0.18
	固定资产投资(INV)	省域年单位耕地农业固定投资额(万/千 hm^2)	203.03	201.54
	人均 GDP(PGDP)	省域年人均地区生产总值(万元)	4.48	2.45
	城镇化率(URB)	省域城镇人口占总人口的比重(%)	53.95	13.99
	气候(TEM)	高原气候区=1,中温带=2,暖温带=3,亚热带=4,热带=5	3.19	1.00

2 结果分析

2.1 中国省际农业用水效率测算结果

为更准确刻画农业用水效率的阶段性演变特征,本文将研究期划分为四个阶段:2007~2010 年、2011~2014 年、2015~2018 年与 2019~2022 年.该划分主要依据国家在农业水资源管理领域的重要政策节点与技术变革阶段:2007~2010 年为政策起步期,节水基础设施逐步推进;2011 年国务院发布《最严格水资源管理制度》,标志农业水资源治理体系进入制度化阶段;2015 年农业水价综合改革全面启动;2019 年国家发展改革委等部门印发《国家节水行动方案》,推动智慧灌溉和精细化管理深入实施.基于 SBM 模型测算结果(图 2),2007~2022 年全国农业用水效率呈现稳步提升的趋势.整体来看,全国农业用水效率的平均值从 2007 年的 0.74 上升至 2022 年的 1.01,增幅达 36.5%.从阶段性变化来看,全国农业用水效率由 2007~2010 年的 0.74 提升至 2011~2014 年的 0.87,随后进一步增长至 2015~2018 年的 0.90,并在 2019~2022 年达到 1.01,整体呈现出持续优化、逐步提升的态势.

从区域演变趋势来看,我国农业用水效率在不

同地区呈现出显著的差异化特征.华北地区提升最为显著,由2007年的0.71大幅增长至2022年的1.21,增幅高达 70.4%,尤其是在 2015~2018 年阶段突破1.00,随后持续上升,展现出良好的优化态势.华东地区整体维持在较高水平,从 1.02 提升至 1.22,增幅为19.6%,四个阶段的效率值均高于全国平均水平,表现出稳定的增长趋势.华南地区由 0.82 上升至 1.01,增幅为 23.2%,整体呈现上升态势,但在 2019~2022年阶段略有波动,增长速度相较前期有所放缓.西南地区从0.73提升至0.94,增幅达28.8%,在2011~2018年期间保持较快增长,但在 2019~2022 年阶段有所回落,表明该区域农业用水效率的提升存在阶段性波动.值得关注的是,西北地区增幅最大,由 0.43 增长至0.84,增幅高达95.3%,特别是在2019~2022年阶段增速加快,逐步缩小了与全国平均水平的差距.相比之下,东北地区幅度最小,仅由 0.56 增长至 0.66,增幅17.9%,且在 2015~2022 年阶段几乎处于停滞状态,整体水平始终低于全国平均,增长趋势相对缓慢.总体来看,全国农业用水效率虽呈现持续上升趋势,但区域间的增长幅度和发展水平存在显著差异.华北和华东地区农业用水效率提升较快,并已达到较高水平,而西北地区增幅较大,但整体水平仍处于全国中下游水平.东北地区提升最为滞缓,长期低于全国均值,显示出区域间农业水资源利用效率存在明显的不均衡性.

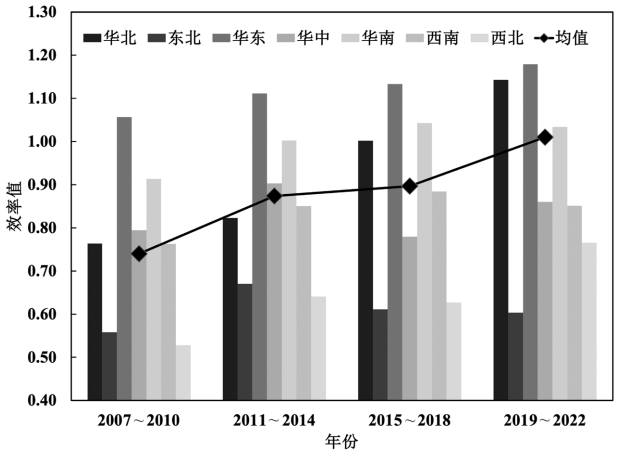


图 2　2007~2022 年中国农业用水效率各区域时空演变规律

Fig.2　Spatial and temporal evolution of agricultural water use efficiency in China from 2007 to 2022

2.2　农业用水效率时间序列演化特征

2007~2022 年,我国各省(市、自治区,不含港澳台地区)在脱钩约束下的农业用水效率变化呈现出显著的阶段性特征(图 3 和表 3).总体来看,全国农业用水效率的增长速率经历了“快速提升−加速增长−明显放缓−回升分化”的波动演变过程,可划分为2007~2010 年的初步提升期、2011~2014 年的快速提升期、2015~2018 年的增速放缓期及 2019~2022年的回升分化期.四阶段全国平均变动值分别为0.06, 0.05, 0.01 和 0.12,变动率依次为 0.16, 0.1, 0.01和 0.19.其中,2007~2014 年农业用水效率提升最为显著,而 2015~2018 年增速明显放缓,甚至部分地区出现负增长.进入 2019 年后,农业用水效率有所回升,但地区间差异仍较为显著,部分省份面临农业用水效率下降的挑战.

农业用水效率的波动可能受到多方面因素的影响,主要存在以下两种情景:情景一,农业用水的不合理投入或外生因素冲击(如极端气候事件、政策调整),导致部分地区农业用水效率下降;情景二,各省域农业用水效率普遍提高,高效省域间的相对效率竞争加剧,导致评价体系内农业用水效率的“内卷化”现象,即相对效率增幅趋缓甚至下降.因此,在分析农业用水效率的变化特征时,不仅要关注总体趋势,还需结合区域性特征,深入探讨不同省份的具体表现及影响因素.

分阶段来看,2007~2010 年初步提升期,全国农业用水效率总体呈现正向增长,青海(0.46)、海南(0.30)、山西(0.22)等华北、西北及华南省份增幅显著;然而,东北部分省份出现下降,如辽宁(−0.15)、黑龙江(−0.02).2011~2014 年快速提升期,多数省份效率继续提高,西藏(0.54)、湖北(0.38)、四川(0.36)等华中、西南和西北地区表现突出,但安徽(−0.49)、广西(−0.39)等地降幅较大,表明区域间增长势头呈现明显分化.2015~2018 年增速放缓期,全国整体增长显著减弱,华东部分省份仍保持正增长(如上海 0.36、山东 0.21),但相当一部分省份转为负增长(如湖南−0.54、河北−0.37).2019~2022 年回升分化期,全国平均变动值和变动率分别回升至 0.12 和 0.19,甘肃(0.45)、云南(0.34)、湖北(0.35)等地回升显著,但四川(0.01)、广西(0.02)等地增幅有限甚至停滞,反映该时期效率提升出现区域性分化特征.

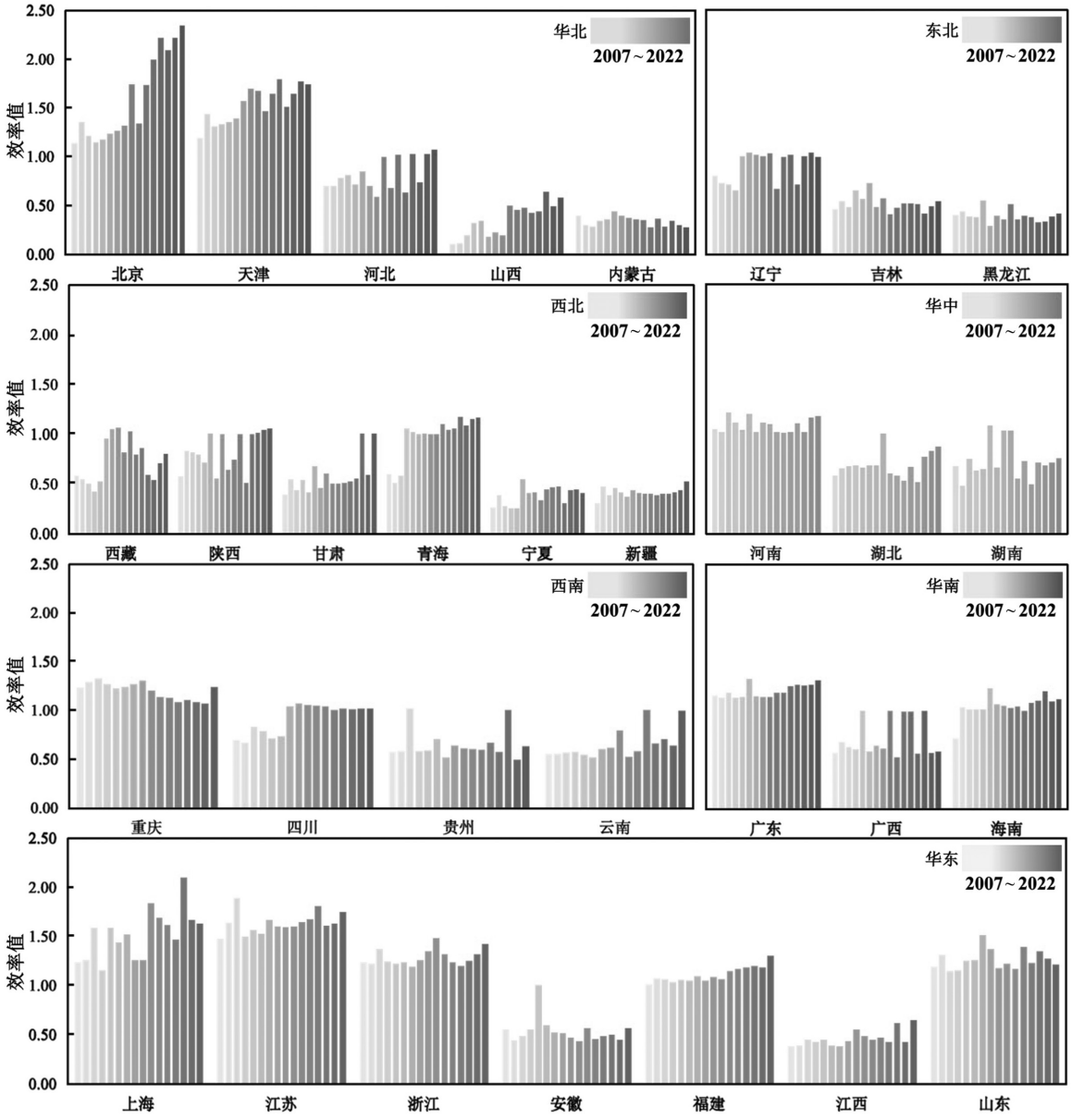


图 3 2007~2022 年省域农业水资源利用效率值

Fig.3 Provincial agricultural water use efficiency value from 2007 to 2022

表 3 2007~2022 年省域农业用水效率变动情况

Table 3 Changes in provincial agricultural water use efficiency from 2007 to 2022

地区	省份	2007~2010 年		2011~2014 年		2015~2018 年		2019~2022 年	
		变动值	变动率	变动值	变动率	变动值	变动率	变动值	变动率
华北	北京	0.01	0.01	0.14	0.12	0.25	0.15	0.13	0.06
	天津	0.14	0.12	0.34	0.25	0.12	0.07	0.23	0.15
	河北	0.11	0.16	−0.13	−0.18	−0.37	−0.36	0.05	0.05
	山西	0.22	0.92	−0.15	−0.42	−0.08	−0.16	0.14	0.32
	内蒙古	−0.05	−0.13	0.02	0.05	0.00	0.01	−0.01	−0.04
东北	辽宁	−0.15	−0.19	0.00	0.00	−0.01	−0.01	0.28	0.40
	吉林	0.20	0.42	0.01	0.01	0.11	0.26	0.03	0.07
	黑龙江	−0.02	−0.05	−0.19	−0.34	−0.13	−0.26	0.09	0.29
华东	上海	−0.09	−0.07	−0.33	−0.21	0.36	0.28	0.16	0.11
	江苏	0.02	0.02	0.04	0.03	0.08	0.05	0.02	0.03

续表 3

地区	省份	2007~2010 年		2011~2014 年		2015~2018 年		2019~2022 年	
		变动值	变动率	变动值	变动率	变动值	变动率	变动值	变动率
华东	浙江	0.01	0.01	0.04	0.03	−0.11	−0.08	0.23	0.19
	安徽	0.00	0.00	−0.49	−0.48	−0.01	−0.03	0.09	0.18
	福建	0.02	0.02	0.00	0.00	0.08	0.08	0.12	0.10
	江西	0.04	0.12	−0.02	−0.04	−0.08	−0.15	0.22	0.52
	山东	−0.03	−0.03	0.12	0.10	0.21	0.18	−0.01	−0.01
华中	河南	0.06	0.06	0.07	0.07	−0.08	−0.08	0.08	0.07
	湖北	0.10	0.17	0.34	0.52	0.07	0.11	0.35	0.68
	湖南	−0.04	−0.07	0.38	0.59	−0.54	−0.52	0.04	0.06
华南	广东	−0.02	−0.02	0.00	0.00	0.11	0.09	0.04	0.03
	广西	0.04	0.06	−0.39	−0.38	−0.01	−0.01	0.02	0.04
	海南	0.30	0.41	0.04	0.04	0.06	0.06	0.01	0.01
西南	重庆	0.04	0.03	0.08	0.06	−0.12	−0.10	0.13	0.12
	四川	0.09	0.12	0.36	0.50	−0.05	−0.05	0.01	0.01
	贵州	0.00	0.01	0.05	0.09	0.06	0.10	0.06	0.11
	云南	0.02	0.04	0.08	0.14	0.21	0.26	0.34	0.50
西北	西藏	−0.05	−0.26	0.54	1.02	0.05	0.06	0.21	0.36
	陕西	0.22	0.38	0.28	0.39	−0.13	−0.20	0.06	0.06
	甘肃	0.15	0.37	0.19	0.45	0.02	0.04	0.45	0.80
	青海	0.46	0.76	−0.02	−0.02	0.06	0.06	−0.01	−0.01
	宁夏	−0.01	−0.03	0.16	0.64	0.13	0.39	0.10	0.33
	新疆	0.15	0.48	0.00	−0.01	0.00	0.00	0.12	0.30
全国	平均	0.06	0.16	0.05	0.1	0.01	0.01	0.12	0.19

2.3　农业用水效率空间格局演变特征

2.3.1　总体空间格局演变特征　为了深入分析 2007~2022 年我国省域农业用水效率的整体格局演变特征,本文借助 ArcGIS 10.8 对中国省际农业用水效率的空间特征进行了空间自相关分析,并采用全局 Moran's *I* 指数刻画其空间相关性(图 4).结果表明,2007~2022 年间,Moran's *I* 指数始终为正值,表明农业用水效率在空间上存在显著正相关性,即高效率区域与低效率区域分别呈现聚集态势.此外,*z* 值均大于 2.6,*P* 值小于 0.01,进一步验证了空间相关性的统计显著性.从时间演变来看,2007~2011 年间,Moran's *I* 指数由 0.326 稳步升至 0.442,空间集聚效应显著增强,表明高效率与低效率省份的聚集态势逐渐加剧.2012~2014 年,Moran's *I* 指数虽有所波动,但整体维持在 0.290~0.308 之间,表明空间相关性较强且相对稳定;2015 年指数反弹至 0.373,短期内恢复了较高的空间相关性.2016~2018 年再次保持稳步上升(0.312→0.361),反映出该阶段农业用水效率在空间上的同质性增强.2019 年下降至 0.279,但 2020~2021 年迅速回升至 0.380,表明集聚效应在短期波动后恢复并达到阶段性高值.除上述三个持续增强阶段外,其余年份呈“增强−减弱”交替变化特征,表明空间格局受多种因素影响而呈非线性变化.总体而言,2007~2022 年 Moran's *I* 指数整体呈“阶段性增强−波动回落”特征;前期空间自相关性不断强化,而后期则有所减弱,呈现出由集聚增强逐步向趋于相对均衡演化的动态过程,区域差异整体呈收敛态势.

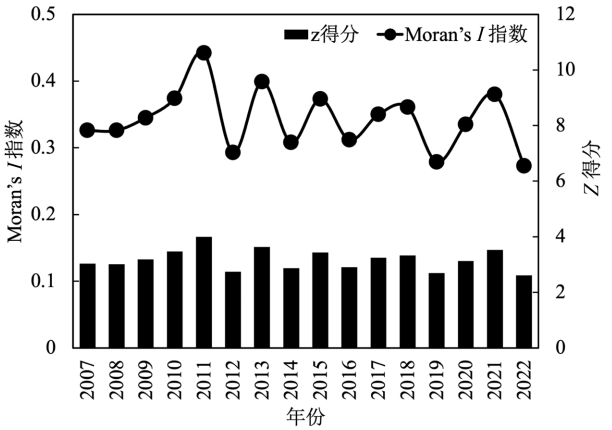


图 4　Global Moran's *I* 指数变化曲线图

Fig.4　Temporal variation of the Global Moran's *I* index

2.3.2　局部空间格局演变特征　在农业用水效率

空间分异总体特征的基础上,本文进一步对其局部空间格局演变特征进行探究.利用 ArcGIS 10.8 软件的空间统计工具计算出 2007~2022 年农业用水效率的省际空间 G_i*指数,并采用自然断点法将 G_i*值由高到低分为:热点区、次热点区、次冷点区和冷点区.2007~2022 年中国农业用水效率的空间局部集聚演变如图 5 所示.

整体来看,中国农业用水效率在空间分布上呈现显著的区域差异,高效率(低效率)区域在空间上表现出明显的集聚特征,形成“高-高”或“低-低”的空间格局.热点区呈现出一定程度的空间极化现象,并随着时间推移表现出动态演化特征.具体表现为:

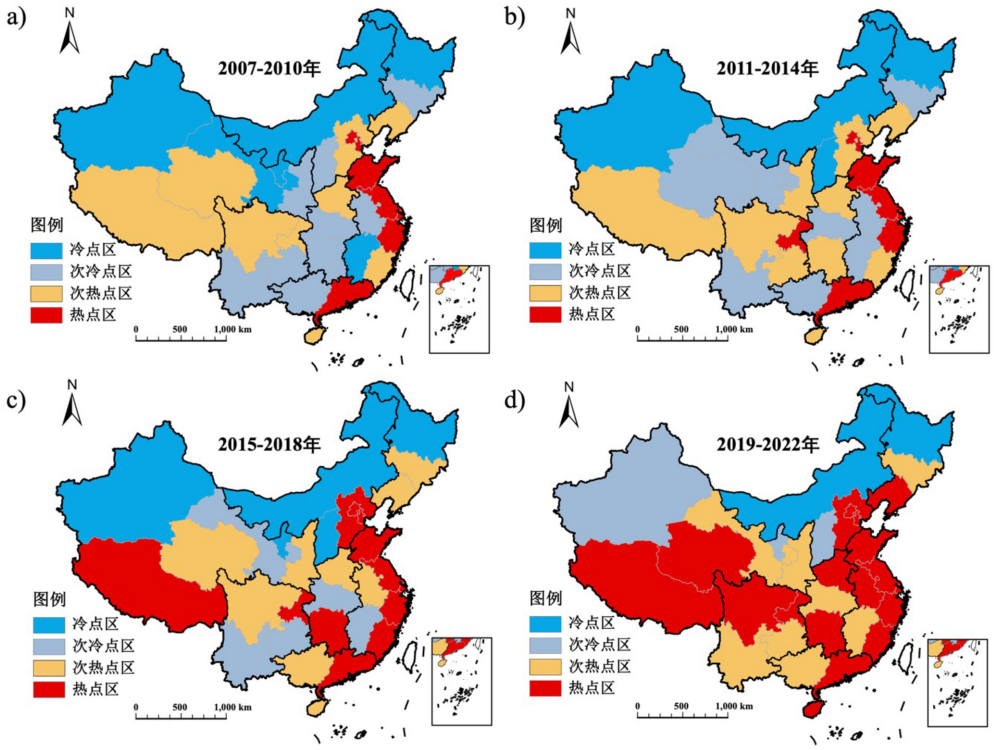


图 5 2007~2022 年省域农业用水效率空间格局

Fig.5 Spatial pattern of provincial agricultural water use efficiency in China from 2007 to 2022

审图号 GS(2024)0650 号

(1)2007~2010 年,农业用水效率热点区域呈现“东部聚集”的空间格局.高值区域主要集中在华东沿海(江苏、浙江、山东等),构成核心集聚区.北京、天津及河北部分地区也表现较高效率,形成次级热点区域.冷点区域则主要分布在西北干旱区和西南高原区(新疆、甘肃、宁夏、青海等),农业用水效率较低,形成明显的低值集聚区,提升潜力较大.

(2)2011~2014 年,农业用水效率热点区域逐渐向华中地区延伸.高值区域在原有华东沿海地区基础上拓展至华中地区(安徽、湖北)延伸.同时,华北平原(河南、河北)以及西南部分地区效率有所提高,形成新的次热点区.冷点区域仍主要集中在华北和西北地区,范围进一步向青海、甘肃等地扩展,低值集聚特征进一步增强,表明这些地区农业用水效率仍处于较低水平,水资源利用亟待优化.

(3)2015~2018 年,农业用水效率热点区域呈现“东中西递增”的层级格局,呈现出由东向西依次递减的层级特征.华东长三角地区、华北京津冀地区、华中的长江中游地区、和黄淮海平原和西南川渝地区农业用水效率逐步提升,并形成稳定的高值区.冷点区域依旧集中在华北地区,并向内蒙古西部扩展,农业用水效率低值集聚现象更加显著,反映出该地区水资源利用效率提升仍面临较大挑战.

(4)2019~2022 年,农业用水效率热点区域演变为“多核集聚”格局.华东长三角地区(江苏、浙江、上海)、华北京津冀、南方沿海地区(广东、福建)及西北形成稳定的高值区,西南部分省份(西藏、青海、四川)因节水技术推广以及特色农牧业发展而表现

突出.长江中游地区(湖北、湖南、江西)形成了次热点区域.与此同时,冷点区域范围进一步托大,西北地区仍为最低效率区,东北地区出现新冷点集聚区.该阶段空间格局呈现出较明显的“热点-次热点-次冷点-冷点”多层级、多中心化特征,反映出区域间农业用水效率差异进一步加剧.

综合来看,中国农业用水效率的空间格局经历了由东部集聚向中部扩展,再到层级递增,最终形成多中心集聚的演化过程.这一过程不仅体现了农业用水效率的区域差异性和动态性,也为后续分析效率变化的影响因素提供了重要依据.

2.4　省域农业用水效率影响因素分析

2.4.1　随机森林模型的适用性评价　以省域农业用水效率作为因变量,相关影响因素作为自变量,分别构建多元线性回归模型和随机森林模型.通过比较两种模型在测试集中的精度可知,拟合优度(R^2)方面,随机森林模型(R^2=0.96)明显高于多元线性回归模型(R^2=0.15),同时预测误差(RMSE)方面,随机森林模型(0.47)低于多元线性回归模型(2.35).由此可见,随机森林模型在刻画省域农业用水效率的关键影响因素及其演变趋势方面具有更高的适用性和稳定性,能够更准确地识别各因素对农业用水效率的影响机制.

2.4.2　关键影响因素识别与分析　为揭示省域农业用水效率存在明显时空差异的关键影响因素,本文通过随机森林模型对农业用水效率的影响因素进行分析,为增加随机森林模型的可解释性,先对影响因素特征重要性排序,再结合偏依赖关系图进行可视化表达刻画因素对模型输出的边际效应,结果如图 6 和图 7 所示.

重要性排序结果表明(图 5),基于 IncMSE 和 IncNodePurity 两种方法对影响因素进行排序,发现两种方法的排序较接近.综合来看,节水灌溉率、城镇化率和省份降雨量对农业用水效率的影响最为显著,表明节水灌溉措施的推广、城市化进程的发展以及降水条件的变化在很大程度上决定了各省农业用水效率的提升.其次,小麦比重、玉米比重、地均水资源量及稻谷比重表现出较高的重要性,说明不同作物种植结构对农业用水效率具有较大的影响,尤其是水稻种植比例较高的地区,由于其灌溉需求较大,农业用水效率相对较低.人均 GDP 和固定投资在一定程度上影响农业生产活动的水资源利用情况,而温度带作为自然环境因素,对农业用水效率的影响相对较小.总体来看,经济发展水平、农业生产结构、水资源条件以及节水技术推广是驱动我国省际农业用水效率变化的核心因素.

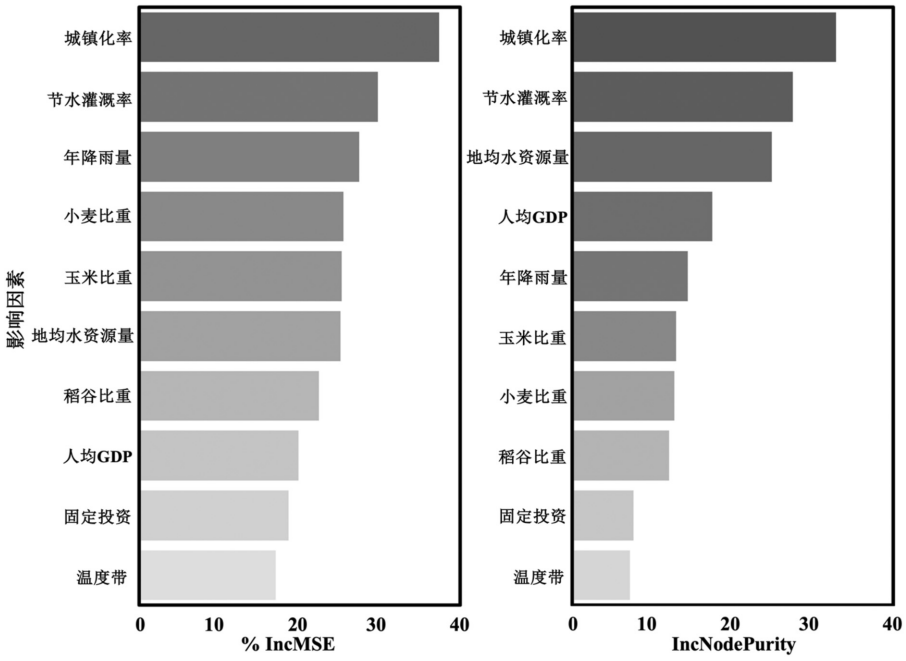


图 6　2007~2022 年省域农业用水效率影响因素重要性排序

Fig.6　Ranking of factors influencing provincial agricultural water use efficiency from 2007 to 2022

%IncMSE 为精度平均减少值,IncNodePurity 为节点不纯度平均减少值,二者值越大说明变量越重要

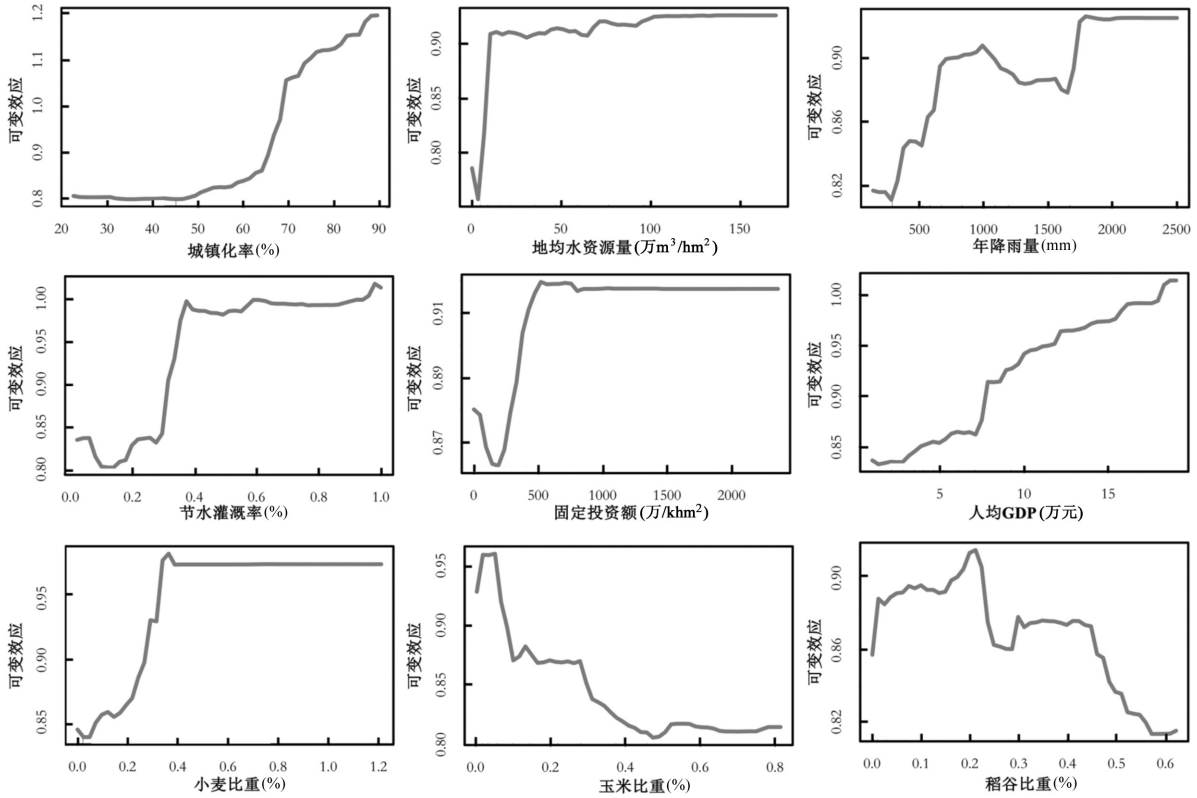


图 7 2007~2022 年各因素对农业用水效率的影响强度

Fig.7 Effects of different factors on agricultural water use efficiency from 2007 to 2022

从经济发展水平看,城镇化率对农业用水效率的影响较大,呈“S”型增长,具体表现为 50%~65%区间缓慢增长,65%~70%区间快速增长,70%以上增速减缓.原因在于,城镇化初期,农村人口向城市转移,但农业仍以传统小农经营为主,农业用水方式粗放,节水技术普及度较低,用水效率提升有限;当城镇化率达到 65%~70%时,水资源从农业向二、三产业流动,农业劳动力进一步减少,推动规模化、机械化农业发展,高效节水技术广泛应用,农业用水效率显著提高;70%以上阶段,农业现代化基本完成,节水技术边际效应递减,同时工业和城市用水需求上升,农业用水竞争压力加大,效率增速放缓.人均 GDP 对农业用水效率的影响则呈阶梯式增长,在 7 万元左右增长最快,随后趋缓.在 7 万元以下,农业仍以传统模式为主,水资源利用粗放,节水技术技术应用有限,效率提升缓慢.达到 7 万元后,经济发展带动农业基础设施建设和科技投入增加,膜下滴灌、精准灌溉、智慧水管理等节水技术广泛应用,农业用水效率大幅提升.超过该水平后,农业现代化程度已较高,技术改造的边际效应递减,且工业化、城市化加速使农业用水优先级下降,进一步抑制了农业用水效率提升.

从水资源禀赋看,降雨量对农业用水效率的影响呈“先升-后降-再升”趋势,250~1000mm 区间效率显著提升,因农业主要依赖灌溉,水资源供给有限,促使农户采用滴管、喷灌等节水技术与精细化管理;11000~1700mm 区间效率略降,可能因降水充沛减少灌溉需求,同时导致地表径流增加、水资源管理松散,节水措施投入下降.当年降雨量超过 1700mm 时,农业用水效率呈现回升并趋于稳定的态势.这一现象不仅源于降水充沛、灌溉需求下降,还与高降水区主要分布在华东与华南地区有关.上述区域经济社会发展水平较高,节水设施较为完善,农业现代化程度显著,并具备较健全的排水与水资源管理体系,从而共同促进了农业用水效率的稳定提升.地均水资源量对农业用水效率的影响呈“先快-后稳”特征,8~15 万 m³/hm²区间效率提升最显著;超过 15 万 m³/hm²后,水资源充裕且灌溉技术完善,效率维持高位但增幅趋缓;低于 8 万 m³/hm²时,农业高度依赖有限水源且灌溉方式粗放,效率偏低.

从技术和资产投入看,节水灌溉率和固定资产投资对农业用水效率的影响均呈现“先降-后升-趋稳”趋势.主要受规模效应的影响.初期因节水灌溉

技术和固定资产投资投入不足,农业灌溉方式仍以传统方式为主,水资源利用率较低.新增投资多用于基础设施建设,短期内难以显著提升用水效率,甚至因灌溉覆盖面扩大而导致总用水量上升,表现出效率下降的趋势;中期投入达到一定规模后,滴灌、喷灌、智能灌溉系统等高效节水技术逐步推广,农田水利设施逐步完善,农业水资源管理水平显著提升,从而推动用水效率快速提高;后期农业现代化水平已基本完成,节水技术和基础设施建设趋于完善,边际效应递减,进一步增加投入对用水效率的提升作用逐渐减弱,使农业用水效率趋于稳定.

从种植结构看,玉米比重和水稻比重的增加会导致农业用水效率下降,其中玉米比重的影响更为显著,而小麦比重增加则推动用水效率阶梯式上升.这与区域水热条件和作物需水量差异有关.玉米和水稻均为高耗水作物,水稻种植区主要分布在水资源丰富的南方地区,由于水源充足,农业生产对节水技术的需求相对较低,因此提高用水效率的动力弱于水资源相对稀缺的小麦种植区.同时,水稻的需水量远高于小麦,且多采用传统漫灌方式,导致用水效率较低.而玉米虽相对耐旱,但单位产出较低,在高密度种植条件下仍需较大水资源投入,因此其比重增加对用水效率的影响较为显著.相比之下,小麦作为耐旱作物,多采用滴灌、喷灌等高效节水方式,整体用水效率较高.从效率提升的角度来看,水稻比重较大的省域具备最大的提升潜力,通过优化灌溉方式、推广节水技术,有望实现农业用水效率的显著改善.

3　政策建议

基于以上研究结果,本文提出以下政策启示:

其一,应针对省域农业用水效率的时空差异特征,应制定分区域、分类型的农业用水管理政策.在华北、华东等农业产出效率高但用水压力大的地区,应优化种植结构,推广高效灌溉模式;在东北、华中等粮食主产区,应兼顾产量保障与节水目标,强化耕地轮作与水肥一体化;在西北、西南等水资源相对短缺地区,应严格控制高耗水作物种植比例,并优先发展耐旱节水型农业;在华南等降水相对充沛地区,应提高雨水资源利用效率,减少不必要的灌溉浪费.

其二,完善差异化农业水价形成机制,构建灵活高效的水权交易制度和水权转换体系.在华北、西北等水资源紧缺区域,应提高农业用水价格信号敏感性,强化水权流转与高效利用;在西南、华南等水资源相对丰富但管理不足的地区,应通过价格机制与制度创新,减少水资源浪费,鼓励节水型种植结构调整;在东北、华中等粮食主产区,则应建立以保障粮食安全为前提的水权交易和调配机制,平衡产量需求与水资源保护.

其三,应加快农业节水技术的研发与推广,并结合各分区实际情况选择适宜技术路径.在西北、华北等干旱半干旱地区,应重点推广滴灌、喷灌等精准灌溉技术;在东北、华中等大田作物集中区,应推进大规模水肥一体化、农田蓄水及高效排水设施建设;在西南、华南等降水丰富但地形复杂地区,应强化雨水集蓄、梯田改造及小型水利设施升级改造.政府、科研机构与企业应建立跨区域合作机制,加强节水经验交流与技术共享,缩小分区间农业用水效率差距,实现农业绿色转型与高质量发展.

4　结论

4.1　从时序变化来看,2007~2022 年我国省域农业用水效率整体呈阶段性波动上升态势,呈现“初步提升-快速提升-增速放缓-缓步回升”四个阶段.2007~2010 年效率由 0.74 增至 0.80,政策起步期以节水基础设施建设为主;2011~2014 年在《最严格水资源管理制度》推动下效率显著升至 0.87;2015~2018 年虽启动农业水价综合改革,但增速放缓至 0.90,部分地区出现负增长;2019~2022 年在《国家节水行动方案》推动下升至 1.01.整体效率水平较 2007 年提高 36.5%,但省际差异依然显著.

4.2　在空间演变方面,我国农业用水效率总体呈“东高西低,南高北低”分布格局,具有显著的空间自相关性,空间聚集程度呈现“先增-再减-后增”的阶段性变化特征.东部地区的农业用水效率显著高于中部和西部地区,部分西部省份的效率已超过中部省份.此外,局部热点区域主要集中在华东和西南地区,并呈现向西北和华北地区逐步转移和扩展趋势.冷点区域则主要分布在西北和华北北部地区,并逐渐向东北移动.这表明西南和华北北部地区在未来具备较大的效率提升潜力,通过实施精准化节水和效率提升措施,有望改善全国农业用水格局.

4.3　在影响因素方面,经济发展水平和水资源禀赋

是农业用水效率的核心因素,其重要性显著高于技术水平和种植结构.经济水平、技术水平和资本投入对农业用水效率的作用呈现“下降-上升-稳定”的阶段性响应关系,而水资源禀赋对效率的影响表现为阶梯式上升.种植结构方面,水稻和玉米主产区的农业用水效率提升潜力高于小麦主产区,揭示出不同作物需水特征在效率形成机制中的重要作用.

参考文献:

[1] 何秀荣.国家粮食安全治理体系和治理能力现代化 [J]. 中国农村经济, 2020,(6):12-15.
He X R. National food security governance system and modernization of governance capacity [J]. Chinese Rural Economy, 2020,(6):12-15.

[2] 包晓斌.我国水生态环境治理的困境与对策 [J]. 中国国土资源经济, 2023,36(4):23-29.
Bao X B. Dilemmas and countermeasures of water ecological environment governance in China [J]. Natural Resources Economics of China, 2023,36(4):23-29.

[3] 赵 英,王海霞,王 毅,等.黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究 [J]. 中国工程科学, 2023,25(4):158-168.
Zhao Y, Wang H X, Wang Y, et al. Study on efficient utilization and optimal allocation of agricultural water resources in the Yellow River Basin [J]. Engineering Sciences, 2023,25(4):158-168.

[4] 卢佳友,周宁馨,周志方,等.“水十条”对工业水污染强度的影响及其机制 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(2):90-99.
Lu J Y, Zhou N X, Zhou Z F, et al. The impact and mechanism of the “Water Ten Plan” on industrial water pollution intensity [J]. China Population, Resources and Environment, 2021,31(2):90-99.

[5] 王喜峰,沈大军,李 玮.水资源利用与经济增长脱钩机制、模型及应用研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019,29(11):139-147.
Wang X F, Shen D J, Li W. Decoupling mechanism, modeling, and applications between water resource use and economic growth [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(11):139-147.

[6] 刘维哲,唐 溧,王西琴,等.农业灌溉用水经济价值及其影响因素——基于剩余价值法和陕西关中地区农户调研数据 [J]. 自然资源学报, 2019,34(3):553-562.
Liu W Z, Tang L, Wang X Q, et al. Economic value and influencing factors of agricultural irrigation water: based on residual value method and farmer survey data from the Guanzhong area, Shaanxi Province [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(3):553-562.

[7] Hu J L, Wang S C, Fang Y Y, et al. Total-factor water efficiency of regions in China [J]. Resources Policy, 2007,31(4):217-230.

[8] 邓 椿,蒋晓辉.黄河流域农业水资源绿色效率动态演化及驱动机理 [J]. 经济问题, 2023,(9):122-128.
Deng C, Jiang X H. Dynamic evolution and driving mechanism of agricultural water resource green efficiency in the Yellow River Basin [J]. On Economic Problems, 2023,(9):122-128.

[9] Feng T W, Yu C, Xiong L. How can agricultural water use efficiency be promoted in China? A spatial-temporal analysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,145:411-418.

[10] 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. Spatiotemporal heterogeneity of agricultural water use efficiency and its influencing factors in the Yellow River Basin [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(11):77-89.

[11] 张成凤,粟晓玲,蔡焕杰.基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究 [J]. 自然资源学报, 2017,32(6):1053-1063.
Zhang C F, Su X L, Cai H J. Harmony evaluation of water resource allocation system in Yuyang District based on interval AHP [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(6):1053-1063.

[12] 周正祥,查嫣媛,孙久文.长江经济带物流产业效率测度及时空演化研究 [J]. 中国软科学, 2024,(12):75-86.
Zhou Z X, Cha Y Y, Sun J W. Measurement and spatiotemporal evolution of logistics industry efficiency in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Soft Science, 2024,(12):75-86.

[13] 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.

[14] 常 明,陈思博,马冰然,等.粮食水资源利用效率及影响因素分析:基于中国省际面板数据的实证研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2):145-151.
Chang M, Chen S B, Ma B R, et al. Grain water resource use efficiency and influencing factors: an empirical study based on China’s provincial panel data [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020,36(2):145-151.

[15] 黄昌硕,耿雷华,陈晓燕.农业用水效率影响因素及机理分析 [J]. 长江科学院院报, 2018,35(1):82-85.
Huang C S, Geng L H, Chen X Y. Analysis of influencing factors and mechanisms of agricultural water use efficiency [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2018,35(1):82-85.

[16] Fei T, Yu Z, Sai H L, et al. Spatial-temporal dynamics of cropland ecosystem water-use efficiency and the responses to agricultural water management in the Shiyang River Basin, northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2020,237:106176.

[17] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等.农业用水效率与技术进步:基于中国农业面板数据的实证研究 [J]. 资源科学, 2014,36(9):1765-1772.
Tong J P, Ma J F, Wang H M, et al. Agricultural water use efficiency and technological progress: an empirical study based on China’s agricultural panel data [J]. Resources Science, 2014,36(9):1765-1772.

[18] Stefano F, Silvia V, Rosario N, et al. Water-energy-food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy [J]. Environmental Science and Policy, 2020,104:1-12.

[19] Xin C C, Wen Z, Meng Y W, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation [J]. Agricultural Water Management, 2020,231:106027.

[20] Ya Q L, Wei S. Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agroecosystem management [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,253:119940.

[21] 王克强,邓光耀,刘红梅.基于多区域 CGE 模型的中国农业用水效率和水资源税政策模拟研究 [J]. 财经研究, 2015,41(3):40-52.
Wang K Q, Deng G Y, Liu H M. Simulation study of China’s agricultural water use efficiency and water resource tax policy based on a multi-regional CGE model [J]. Journal of Finance and Economics, 2015,41(3):40-52.

[22] Shah W, Hao G, Yasmeen R, et al. Role of China’s agricultural water policy reforms and production technology heterogeneity on agriculture water usage efficiency and total factor productivity change [J]. Agricultural Water Management, 2023,287:108429.

[23] 卢玮楠,刘霁瑶,赵敏娟.黄河流域农业用水效率的动态演进与收敛性 [J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2022,22(4):123-134.
Lu W N, Liu J Y, Zhao M J. Dynamic evolution and convergence of agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest A&F University (Social Sciences Edition), 2022,22(4): 123-134.

[24] 盛 洋,徐海量.中国农业用水回弹效应及影响机制研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2025,39(2):150-160.
Sheng Y, Xu H L. Study on rebound effect and influencing mechanism of agricultural water use in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025,39(2):150-160.

[25] 佟金萍,马剑锋,王 圣,等.长江流域农业用水效率研究:基于超效率

DEA 和 Tobit 模型 [J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(4):603−608.
Tong J P, Ma J F, Wang S, et al. Research on agricultural water use efficiency in the Yangtze River Basin: based on super−efficiency DEA and Tobit model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(4):603−608.

[26] 方大利,王　静,刘晶晶,等.多模型结合下农业用水效率及影响因素时空分异特征研究 [J]. 节水灌溉, 2024,(4):105−113.
Fang D L, Wang J, Liu J J, et al. Spatial–temporal differentiation of agricultural water use efficiency and influencing factors combining multiple models [J]. Water Saving Irrigation, 2024,(4):105−113.

[27] Mu L, Fang L, Wang H, et al. Exploring Northwest China's agricultural water−saving strategy: analysis of water use efficiency based on an SE−DEA model conducted in Xi'an, Shaanxi Province [J]. Water Science & Technology, 2016,74(5):1106−1115.

[28] 魏建飞,赵颢迪,李　强,等.河南省县域农业生态效率格局演进及影响机制 [J]. 经济地理, 2025,45(1):184−192.
Wei J F, Zhao H D, Li Q, et al. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of county−level agricultural eco−efficiency in Henan Province [J]. Economic Geography, 2025,45(1):184−192.

[29] 李青松,张凤太,苏维词,等.长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析——基于超效率 EBM−Geodetector 模型 [J]. 中国农业资源与区划, 2022,43(5):40−52.
Li Q S, Zhang F T, Su W C, et al. Measurement and influencing factors analysis of green agricultural water use efficiency in the Yangtze River Economic Belt: based on super−efficiency EBM–Geodetector model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(5):40−52.

[30] 周　婷,徐含乐,徐奇刚,等.基于随机森林分类模型填补森林资源连续清查缺失因子 [J]. 生态学报, 2024,44(18):8269−8282.
Zhou T, Xu H L, Xu Q G, et al. Filling missing factors in continuous forest inventory based on random forest classification model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18):8269−8282.

[31] Geng Q, Ren Q, Nolan R H, et al. Assessing China's agricultural water use efficiency in a green−blue water perspective: A study based on data envelopment analysis [J]. Ecological Indicators, 2019,96:329−335.

[32] 孙淑惠,陈晓楠,张春梅.环境约束下农业用水效率的时空演变与地区差异——基于沿江区域与沿黄区域比较视角 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(2):339−353.
Sun S H, Chen X N, Zhang C M. Spatiotemporal evolution and regional differences of agricultural water use efficiency under environmental constraints: a comparative perspective between Yangtze and Yellow River regions [J]. Resources and Environment of the Yangtze Basin, 2023,32(2):339−353.

[33] 杜志雄.立足粮食安全和资源约束,探究农业用水效率提升路径——评《河北省农业用水效率测度及提升路径研究》 [J]. 农业经济问题, 2024,(3):145.
Du Z X. Based on food security and resource constraints, exploring paths to improve agricultural water use efficiency: a review of "Study on measurement and improvement paths of agricultural water use efficiency in Hebei Province" [J]. Issues in Agricultural Economy, 2024,(3):145.

[34] 徐章星,邱晓楠,田贵良,等.南水北调工程通水对受水区农业用水的影响 [J]. 自然资源学报, 2024,39(5):1222−1240.
Xu Z X, Qiu X N, Tian G L, et al. Impact of South–North Water Diversion project's water delivery on agricultural water use in receiving regions [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(5):1222−1240.

[35] 郝　铭,段琳琼,陈常优,等.黄河流域与长江经济带农业水资源利用效率与影响因素的差异性研究 [J]. 水土保持通报, 2022,42(4):267−277.
Hao M, Duan L Q, Chen C Y, et al. Comparative study of agricultural water resource use efficiency and influencing factors between the Yellow River Basin and the Yangtze River Economic Belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):267−277.

[36] Mallareddy M, Thirumalaikumar R, Balasubramanian P, et al. Maximizing water use efficiency in rice farming: A comprehensive review of innovative irrigation management technologies [J]. Water, 2023,15(10):1802.

[37] 杨燕燕,王永瑜,徐绮阳.黄河流域水资源利用驱动因素及脱钩效应研究 [J]. 干旱区地理, 2025,48(1):20−30.
Yang Y Y, Wang Y Y, Xu Q Y. Study on driving factors and decoupling effect of water resource utilization in the Yellow River Basin [J]. Arid Land Geography, 2025,48(1):20−30.

[38] 程　蕾,陈吕军,田金平,等."以水定产"驱动的黄河流域可持续水管理策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023,25(1):187−197.
Cheng L, Chen L J, Tian J P, et al. Research on sustainable water management strategies driven by "production based on water allocation" in the Yellow River Basin [J]. Engineering Sciences, 2023,25(1):187−197.

[39] 许　锘,陈东景.基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究 [J]. 水利经济, 2024,42(5):20−27.
Xu N, Chen D J. Study on decoupling relationship between water resource use and high−quality economic development based on water footprint [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024,42(5):20−27.

[40] 戴　蔚,于恩平,倪中新.水资源要素禀赋改善是否促进了经济高质量发展?——基于"南水北调"工程的准自然实验 [J]. 上海经济研究, 2024,(9):60−68.
Dai W, Yu E P, Ni Z X. Does improvement in water resource endowment promote high−quality economic development? — A quasi−natural experiment based on the "South–North Water Transfer" project [J]. Shanghai Journal of Economics, 2024,(9):60−68.

[41] 黄新东,张新艳,张　帆.中国主要粮食作物种植结构优化下稳粮减排及成本效益分析 [J]. 生态学报, 2025,(6):1−14.
Huang X D, Zhang X Y, Zhang F. Stabilizing grain production, reducing emissions and cost−benefit analysis under optimized cropping structure of major food crops in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,(6):1−14.

[42] 马九杰,崔　怡,董　翀.信贷可得性、水权确权与农业节水技术投资——基于水权确权试点准自然实验的证据 [J]. 中国农村经济, 2022,(8):70−92.
Ma J J, Cui Y, Dong C. Credit availability, water rights confirmation and agricultural water−saving technology investment: evidence from quasi−natural experiment of water rights confirmation pilot [J]. Chinese Rural Economy, 2022,(8):70−92.

[43] Bwambale E, Abagale F K, Anornu G K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review [J]. Agricultural Water Management, 2022,260:107324.

[44] 秦　腾,佟金萍,支彦玲.水权交易机制对农业用水效率的影响及效应分析 [J]. 自然资源学报, 2022,37(12):3282−3296.
Qin T, Tong J P, Zhi Y L. Effects and influence of water rights trading mechanisms on agricultural water use efficiency [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(12):3282−3296.

[45] 杜丽娟,孟怡辰,杜美卿,等.农业碳汇修正下省际横向碳补偿额度测算:基于七大地理分区的实证研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2025,41:579−589.
Du L J, Meng Y C, Du M Q, et al. Estimation of interprovincial horizontal carbon compensation quotas under agricultural carbon sink correction: an empirical study based on seven major geographic regions [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025,41:579−589.

作者简介：陈逸琛(1995−),男,福建福州人,副研究员,博士,主要从事资源与环境管理、减污降碳协同增效研究.发表论文 10 余篇.chenyichen@fzu.edu.cn.