

# 河北省粮食作物用水效率评价数据集（1995–2019）

潘佩佩<sup>1,2,3,4\*</sup>, 苗嘉欣<sup>1,2,3,4</sup>, 王晓旭<sup>5\*</sup>, 李林思<sup>1,2,3,4</sup>, 温佳昱<sup>6</sup>, 王新云<sup>7</sup>

1. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省高等学校人文社会科学重点研究基地“河北师范大学地理计算与规划研究中心”, 石家庄 050024;
3. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024;
4. 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024;
5. 河北雄安新区管理委员会自然资源和规划局, 保定 070001;
6. 北京市首都规划设计工程咨询开发有限公司, 北京 100045;
7. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

**摘要:** 作为中国典型粮食主产区, 河北省水资源短缺是制约其作物产量的关键因素, 提高耕地粮食作物用水效率是保障区域粮食安全和实现农业可持续发展的核心。作者基于气象数据、联合国粮农组织 CROP 数据库数据、实地调查数据及农村统计年鉴数据, 借助超效率 SBM 模型、空间计量模型和 GTWR 模型, 计算了河北省 139 个县域单元 1995–2019 年在多要素投入产出框架下的粮食作物用水效率数据集。数据集包括: (1) 研究区范围; (2) 1995、2000、2005、2010、2015、2019 年粮食作物蓝水、绿水及灰水足迹数据; (3) 1995–2019 年粮食作物水足迹变动趋势数据; (4) 1995、2000、2005、2010、2015、2019 年县域和分区两种尺度粮食作物水分利用效率数据; (5) 粮食作物水分利用效率影响因素的空间效应、溢出效应及空间异质性数据; (6) 冀西北区、沿海区、环京津区、冀中南区的泰尔系数与贡献率。数据集存储为.xlsx 和.shp 格式, 由 65 个数据文件组成, 数据量为 4.09 MB (压缩为 1 个文件 2.36 MB)。

**关键词:** 河北省; SBM 模型; 水足迹; 粮食作物用水效率; 影响因素

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.01.01>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.01.01>

## 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.02.04.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.02.04.V1>。

## 1 前言

水资源是粮食生产的核心要素, 典型水资源短缺的粮食主产区耕地粮食作物用水效率

收稿日期: 2023-11-10; 修订日期: 2024-03-01; 出版日期: 2024-03-25

基金项目: 河北省社会科学基金 (HB20GL042)

\*通讯作者: 潘佩佩 S-5072-2016, 河北师范大学地理科学学院, panpeipei626@163.com;

王晓旭 S-6861-2017, 河北雄安新区管理委员会自然资源和规划局, 18931179072@163.com

数据引用方式: [1] 潘佩佩, 苗嘉欣, 王晓旭等. 河北省粮食作物用水效率评价数据集 (1995–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(1): 1–13. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.01.01>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.01.01>.

[2] 潘佩佩, 苗嘉欣, 王晓旭等. 河北省粮食作物用水效率评价数据集 (1995–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.02.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.02.04.V1>.

提升直接影响国家粮食安全和区域生态安全<sup>[1]</sup>。国家十四五“节水型社会建设规划”指出,水资源短缺是当前中国社会经济发展的重要瓶颈,尤其是在全球变化和粮食产出需求增加背景下中国农业水资源短缺形势日益严峻<sup>[2]</sup>,加之农业生产过程中灌溉方式粗放、水体污染严重以及水资源利用不合理等问题导致中国农业用水利用效率低下,农业生态安全问题突出<sup>[3]</sup>。河北省是中国传统农业主产区之一,但该区水资源严重短缺,其粮食作物产量持续增长是以地下水大量开采和水位持续下降为代价的,“以水换粮”成为区域粮食生产的特色,高强度的用水投入不但严重扰动水资源循环利用,还会引发地面沉降、土壤盐碱化及水环境污染等一系列问题<sup>[4]</sup>,这对其可持续的粮食产出和生态环境带来严重威胁<sup>[5]</sup>。粮食作物用水效率评价及其影响因素识别与调控是开展区域种植结构优化和水资源高效管理的重要基础,也是缓解农业水资源供需突出矛盾、确保区域水安全和粮食安全的必然选择<sup>[6]</sup>。现有研究中的用水资源投入指标缺少对有效降水的考虑,且非期望产出指标不能全面体现农业生产对水资源和水环境的负面影响,多视角的粮食作物用水效率测算及影响要素评价对水资源优化利用至关重要<sup>[1]</sup>。本研究以河北省两大主要粮食作物——小麦和玉米作为研究对象,改进常用用水效率和非期望产出测算方法,将能够全面衡量水资源利用与粮食产出的指标——水足迹引入 SBM 模型 (Slacks-based Measure of Super-efficiency Model)<sup>[7]</sup>,系统构建了以蓝水足迹、绿水足迹、种植面积、化肥施用折纯量、农业机械总动力、农业劳动力为投入指标,以农业 GDP 作为期望产出指标,以灰水足迹为非期望产出指标的指标体系;基于气象数据、农村统计年鉴数据、联合国粮农组织 CROP 数据库数据及实地调查数据,在计算河北省 1995–2019 年粮食作物蓝水、绿水和灰水足迹的基础上,运用基于水足迹的超效率 SBM 模型计算河北省多尺度粮食作物用水效率。进而结合研究区实际构建粮食作物用水效率影响因素的指标体系,并利用空间计量模型和 GTWR 模型 (Geographically and Temporally Weighted Regression Model) 识别该区粮食作物用水效率的关键驱动要素及其空间异质性。本研究为提高河北省及其他粮食主产区粮食作物用水效率提供研究基础和决策依据,对确保农业水资源的高效利用、区域水生态安全和农业绿色可持续发展具有重要意义。

## 2 数据集元数据简介

《河北省粮食作物用水效率评价数据集 (1995–2019)》<sup>[8]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

## 3 数据研发方法

数据集研发包括以下工作: (1) 基于获取的气象数据、粮食作物种植面积、生长期需水量计算粮食作物的绿水、蓝水足迹,基于粮食作物化肥施用折纯量计算灰水足迹,最终得到 1995、2000、2005、2010、2015、2019 年河北省县域单元粮食作物蓝水、绿水、灰水足迹数据及变动趋势数据; (2) 基于统计数据和测算出的水足迹数据,利用超效率 SBM 模型计算得出 1995、2000、2005、2010、2015、2019 年河北省县域和分区两种尺度粮食作物用水效率数据; (3) 基于泰尔系数分析粮食作物用水效率区域差异,得到河北省 4 大分

区的泰尔系数与贡献率数据；（4）基于空间计量模型探究粮食作物用水效率差异的成因、空间效应，并利用时空地理加权回归模型分析主要影响因素的空间分布。

表 1 《河北省粮食作物用水效率评价数据集（1995–2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	河北省粮食作物用水效率评价数据集（1995–2019）
数据集短名	WaterUseEfficiencySBM_Hebei_1995_2019
作者信息	潘佩佩 S-5072-2016，河北师范大学，panpeipei626@163.com 苗嘉欣，河北师范大学，miao_jia_xin@163.com 王晓旭 S-6861-2017，河北雄安新区管理委员会自然资源和规划局，18931179072@163.com 李林思，河北师范大学，lilinsi9360@163.com 温佳昱，北京市首都规划设计工程咨询开发有限公司，wenjiayu329@163.com 王新云，宁夏大学生态环境学院，wxy_whu@163.com
地理区域	河北省：36°05'N–42°37'N, 113°11'E–119°45'E
数据年代	1995–2019
数据格式	.xlsx、.shp
数据量	2.36 MB（压缩后）
数据集组成	65 个数据文件
基金项目	河北省社会科学基金（HB20GL042）
数据计算环境	CROPWAT 模型、超效率 SBM 模型、空间计量模型、ArcGIS
出版与共享服	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
务平台	
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载； （2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[9]</sup>
数据和论文检	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS
索系统	

3.1 算法原理

数据集主要采用了水足迹测算方法、超效率 SBM 模型、核密度函数、泰尔系数、空间计量模型及时空地理加权回归模型<sup>[10]</sup>。水足迹可以描述基于消费基础的水资源占用情况<sup>[11]</sup>，包括蓝水、绿水及灰水足迹，是相较传统取水计量指标更能衡量真实水资源占用情况的综合评价方法<sup>[12]</sup>。超效率 SBM 模型由 Tone 在数据包络分析（Data Envelopment Analysis, DEA）模型基础上提出<sup>[13]</sup>，数据集利用基于水足迹的超效率 SBM 模型测算粮食作物用水效率，该模型弥补了 DEA 方法缺乏对非期望产出的考虑从而可能导致研究结果出现偏差的不足<sup>[14]</sup>。核密度函数基于连续密度曲线以表示效率的分布特征<sup>[15]</sup>，泰尔系数用于分析区域用水效率差异及区域差异的主要来源<sup>[16]</sup>，研究基于此分析了河北省粮食作物用水效率的变化趋势及区域差异。最后，本研究基于空间计量模型中的 SDM 模型（Spatial Dubin Model）以及时空地理加权回归（GTWR）模型以探究研究区作物用水效率的空间效应、溢出效应和影响因素的时空分布特征。

3.2 技术路线

作者基于气象数据、作物相关数据、农业生产数据及行政区划数据，利用超效率 SBM 模型、空间计量模型及 GTWR 模型，计算得到河北省 139 个县域单元 1995–2019 年粮食作物用水效率评价数据集，步骤如下（图 1）。

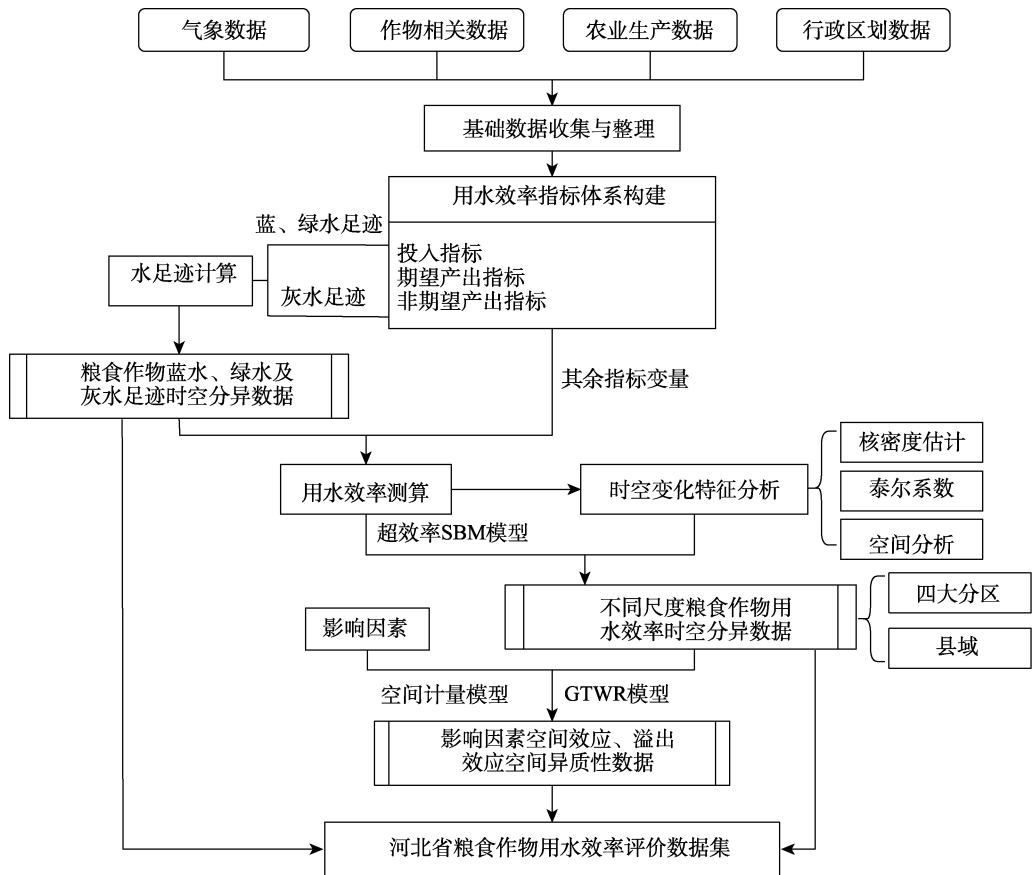


图 1 河北省粮食作物用水效率评价数据集（1995–2019）研发技术路线图

（1）基础数据收集与整理

本研究采取的基础数据来源列于表 2。

研究区行政区划数据:本研究涉及到的 139 个县域单元依据河北省 2015 年行政区域划分得到，其中市辖区合并为一个县域单元，并参考已有文献<sup>[17]</sup>，将河北省划分为冀西北区（张家口市、承德市）、沿海区（沧州市、唐山市、秦皇岛市）、环京津区（保定市、廊坊市）以及冀中南区（石家庄市、衡水市、邢台市、邯郸市）四个区域。

气象数据、粮食作物系数及生育期数据:气象数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心<sup>1</sup>，包括河北省各市的温度、湿度、降水、风速、日照时数数据；粮食作物系数及生育期数据由实地调研各地区农户获取的信息并结合相关参考文献对联合国粮农组织

<sup>1</sup> 中国科学院资源环境科学与数据中心. <https://www.resdc.cn/Default.aspx>.

CROP 数据库所获数据调整得到，如表 3 所示。以此为基础采用由联合国粮农组织开发的 CROPWAT 模型计算作物生长过程中的蓝、绿水蒸散量（mm）。

经济社会统计数据：利用河北省农村统计年鉴，获取与用水效率测算及影响因素指标选取相关的经济社会统计数据。用水效率测算采用的指标涉及到的变量<sup>[10]</sup>除蓝水、绿水及灰水足迹外，种植面积通过统计数据获得，其余变量数据无法直接获取，需在统计数据的基础上参考相关文献处理方法<sup>[18]</sup>计算得到。影响因素指标选取涉及到的变量（表 4），可通过统计数据获得，包括年降水量、有效灌溉面积、农作物播种面积、玉米播种面积、粮食作物播种面积、第一产业产值、各县域农村居民人均纯收入、城镇人口、总人口、粮食作物化肥施用折纯量。

表 2 基础数据来源信息表

数据来源	数据类型	时间（日期）	比例尺或分辨率
全国地理信息资源目录服务系统	行政区划数据	2015 年	1 : 100 万
中国气象局	气象数据	1995、2000、2005、2010、2015、2019 年	市域单元
联合国粮农组织 CROP 数据库/实地调查	粮食作物系数及生育期数据	2021 年 7 月 7–8 日实地调研	县域单元
河北省农村统计年鉴	经济社会统计数据	1995、2000、2005、2010、2015、2019 年	县域单元

表 3 河北省粮食作物系数及生育期数据统计表

作物	生育期	作物系数			
		Initial	Development	Mid-season	Late-season
小麦	9.28–6.13	0.43	0.90	1.10	0.49
玉米	6.16–9.25	0.40	0.81	1.17	0.88

（2）粮食作物水足迹计算

数据集计算包括蓝水、绿水及灰水足迹，其中灰水足迹测算基于河北省小麦–玉米轮作实际情况并结合现有研究，将氮肥最大容许浓度、淋失率分别设为 10 mg/L（国家制定最大值）和 10%<sup>[17]</sup>，自然状态下取最小值（0）。

（3）粮食作物用水效率计算

通过改进投入指标，同时考虑灌溉用水和有效降水，并以灰水足迹作为非期望产出指标<sup>[7]</sup>，将水足迹引入超效率 SBM 模型测算粮食作物用水效率。投入指标中的水足迹可以通过计算得到，种植面积可以通过统计数据得到，其他投入指标由于统计数据无法直接获取，因此参考已有研究<sup>[18]</sup>，运用权重系数法计算两种作物相关数据。

（4）分析不同尺度粮食作物用水效率时空变化特征

采用核密度估计方法、泰尔系数和 GIS 空间分析方法分别分析河北省不同尺度（省域、区域和县域）粮食作物用水效率的时空变化特征，需要的数据为河北省行政区划数据及各县域粮食作物用水效率数据。

（5）分析粮食作物用水效率空间差异成因及空间效应

基于河北省粮食种植实际，并结合已有研究<sup>[2,19–21]</sup>确定了河北省粮食作物用水效率影

响因素的 8 个指标（表 4），进一步利用空间计量模型分析粮食作物用水效率的空间差异成因及空间效应。由于空间计量模型有三种不同类型<sup>[22]</sup>，研究通过用水效率的空间自相关检验、模型检验与最优模型选择，最终确定采用时空双固定效应下的 SDM 模型，计算所需数据为河北省行政区划数据及投入指标、期望产出和非期望产出各指标变量。

（6）分析粮食作物用水效率影响因素时空异质性

研究基于时空地理加权回归模型分析各因素对河北省作物用水效率影响的时空异质性，研究主要过程为：多重共线性检验—影响因素选择—时空地理加权回归模型运行。所需数据包括河北省行政区划数据、粮食作物用水效率数据、影响因素所涉及变量（表 4）。

表 4 影响因素选取指标

	变量名称	变量代码	变量解释
自变量	年降水量	AP	年降水量（mm）
	有效灌溉程度	EID	有效灌溉面积/农作物播种面积（%）
	种植结构	AFS	玉米播种面积/粮食作物播种面积（%）
	产业结构	IS	农业产值/第一产业产值（%）
	农村居民人均纯收入	CDI	各县域农村居民人均纯收入（元）
	城镇化水平	UL	城镇人口/总人口（%）
	农业机械力密度	AGM	农业机械总动力/农作物播种面积（%）
	化肥施用强度	FAI	农业化肥施用量/农作物播种面积（%）

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《河北省粮食作物用水效率评价数据集（1995–2019）》由以下部分组成：（1）研究区范围；（2）1995、2000、2005、2010、2015、2019 年粮食作物蓝水、绿水及灰水足迹数据；（3）1995–2019 年粮食作物水足迹变动趋势数据；（4）1995、2000、2005、2010、2015、2019 年县域和分区两种尺度粮食作物水分利用效率数据；（5）粮食作物水分利用效率影响因素的空间效应、溢出效应及空间异质性数据；（6）4 大分区（冀西北区、沿海区、环京津区、冀中南区）的泰尔系数与贡献率。

4.2 数据结果

（1）河北省粮食作物水足迹时空变化特征

蓝水、绿水和灰水足迹分别代表作物生长过程中灌溉用水的消耗量、降水消耗量、排放的污染物量。1995–2019 年河北省粮食作物总水足迹受种植面积增加影响，总体呈上升趋势，年增长率为 1.03%。其中，蓝水足迹变化相对平稳，绿水及灰水足迹小幅度上升，且灰水足迹增长率较大，并于 2000 年开始降低。整体上，蓝、绿水足迹比重降低，灰水足迹比重上升且变化幅度较大。河北省粮食作物蓝水、绿水及灰水足迹空间分布数据如图 2、图 3、图 4 所示，高值区均集中分布在冀中南以及沿海区，低值区分布在冀西北区及环京津区的西北部地区，整体呈现西北低、东南高的格局，这是由于河北省主要粮食作物种植空间格局大致呈由南向北逐渐递减的规律分布。其中，小麦种植呈由西南向东北递减分布

特征，玉米种植呈中部>南部>北部的规律分布<sup>[23]</sup>。此外，粮食作物高产区蓝、绿水消耗量高但生产过程排放污染物也较多，灰水足迹值较高。

### （2）河北省不同空间尺度粮食作物用水效率时空异质性

河北省域、区域和县域三种尺度下粮食作物用水效率均存在空间差异。省域尺度上，粮食作物用水效率两极分布差异比较明显，其中 1995–2000 年、2000–2015 年分别呈现下降和上升趋势，至 2019 年，多数县域粮食作物用水效率降低且区域用水效率两极化现象加重。

从区域空间格局上看（图 5），1995–2019 年四大区域粮食作物用水效率空间格局变化明显，冀西北区呈下降趋势，沿海区、环京津区及冀中南区呈波动式下降趋势。其中，2000–2015 年各区域变化幅度较小，且空间分布相对稳定，呈冀西北区低-环京津区高的格局，2019 年冀西北区用水效率明显提升，其余区域均明显下降，由北向南逐渐降低，与 1995 年空间分布格局一致。此外，对区域泰尔系数及贡献率的分析<sup>[10]</sup>表明河北省整体粮食作物用水效率存在明显区域差异，且差异主要源于区域内部。从四个区域来看，1995–2019 年

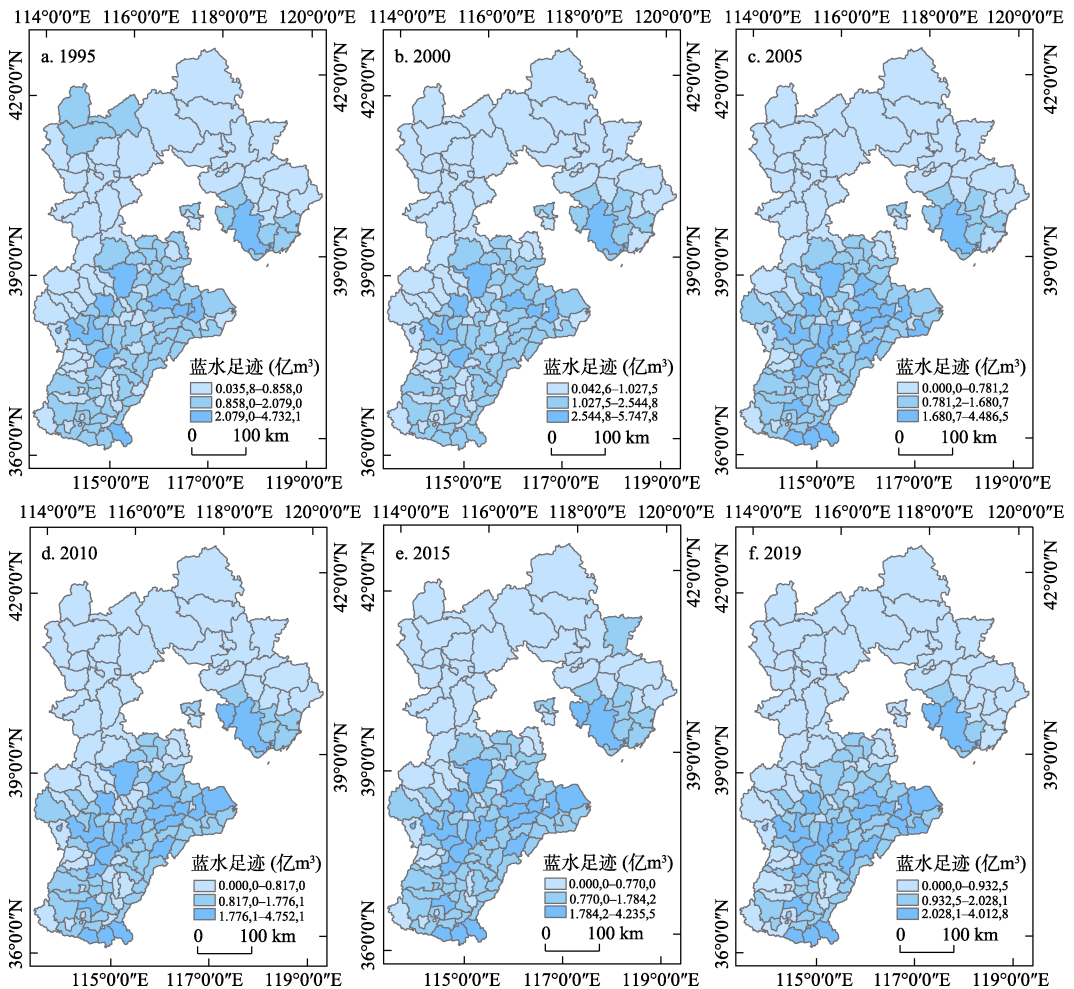


图 2 河北省粮食作物蓝水足迹分布格局系列图（1995–2019）

冀中南区内部粮食作物用水效率差异降低；冀西北区内部用水效率差异大且对河北省粮食作物用水效率区域内差异的贡献率增加；沿海区与环京津区对河北省粮食作物用水效率差异贡献度较低且变化幅度较小。

从县域空间格局上看（图 6），研究区粮食作物用水效率存在一定区域差异且空间格局变化显著，平原地区空间分布相对稳定，2000–2015 年高值区和中值区有所增加，但 2015–2019 年呈现低值区明显扩张，中值区显著减少的格局；西部和北部山地丘陵地区高值区有所降低。总体上，1995–2019 年河北省低值区空间分布范围扩张，高值区和中值区分布有所减少。

### （3）不同尺度粮食作物用水效率影响因素空间异质性

粮食作物用水效率的因素影响包括直接影响效应（对本地的影响）以及间接溢出效应（对周边地区的影响）。本研究<sup>[10]</sup>表明农村居民人均纯收入、城镇化率和农业机械力密度表现为正向影响且有明显的溢出效应；有效灌溉程度和产业结构表现为正向影响，但其溢出效应不显著；由于当前河北省种植结构优化程度不够，其对粮食作物用水效率起负向影响

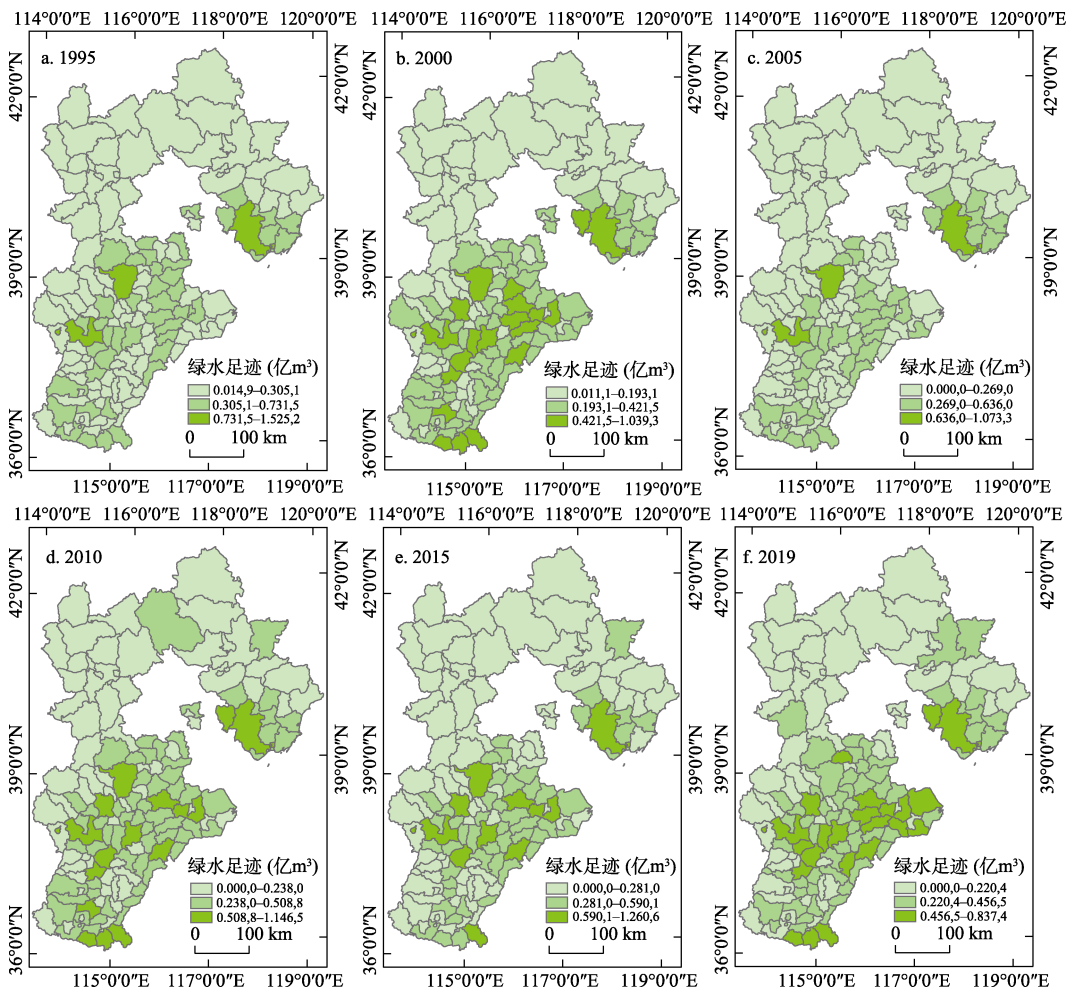


图3 河北省粮食作物绿水足迹分布格局系列图（1995–2019）



响；化肥施用强度表现为负向影响且溢出效应明显；年降水量对用水效率影响较不明显。同时，研究还分析了对用水效率影响较为明显的因素对作物用水效率影响的空间差异。其中，有效灌溉程度、产业结构对用水效率的影响程度总体北高南低；城镇化率影响程度由东北向西南递减；农业机械化密度负向影响区主要分布在西北部；化肥施用强度和种植结构的负向影响区较多，且两者的分布格局相反，表明未来结合区域差异开展化肥减量增效和种植结构优化是粮食作物用水效率提高的重要切入点。

4.3 数据结果验证

空间计量模型存在三种形式，需要经过数据验证以选择最适合的模型。本研究<sup>[10]</sup>通过空间自相关显著性检验、拉格朗日乘数检验、似然比检验及 Hausman 检验，确定采用以时空双固定效应下的 SDM 模型。结果表明模型拟合效果较好并通过了显著性检验，揭示了河北省粮食作物用水效率存在明显的空间效应和溢出效应。

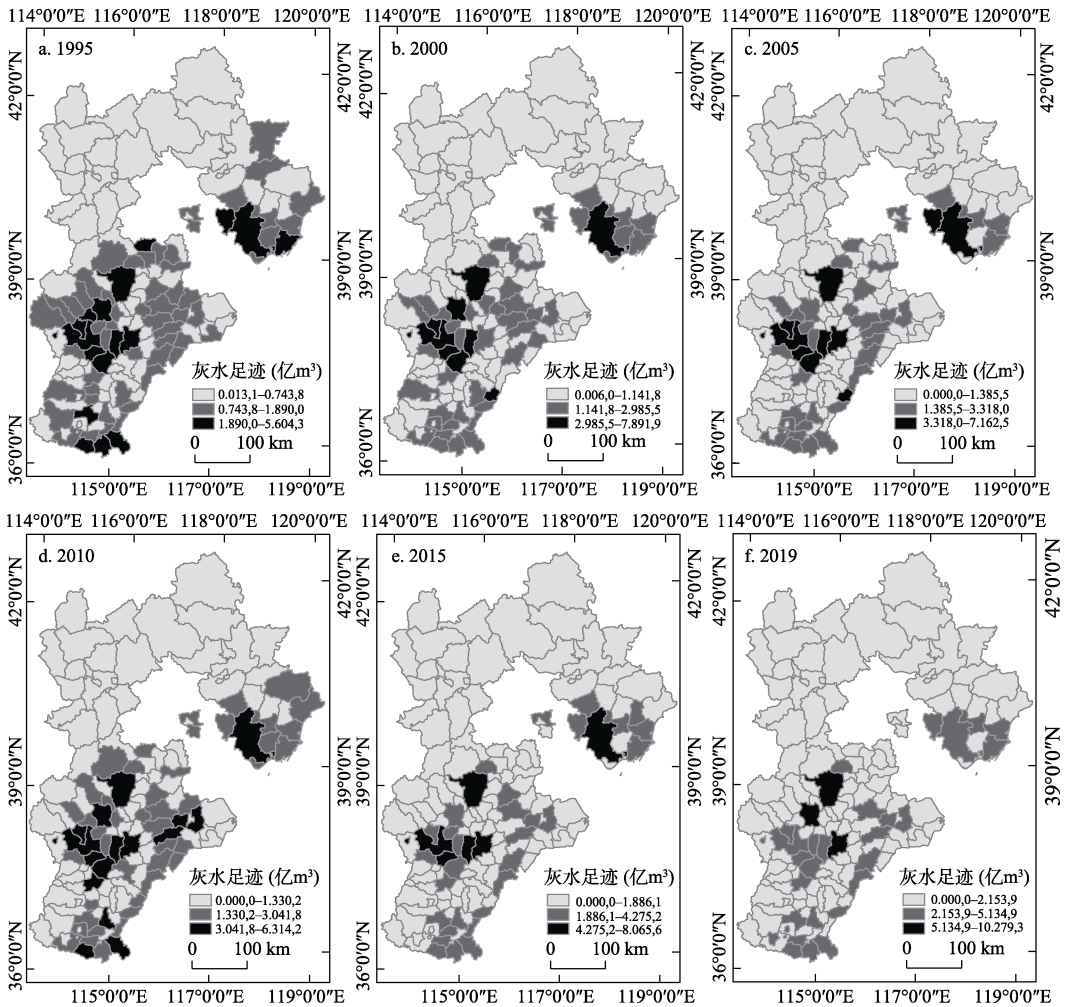


图 4 河北省粮食作物灰水足迹分布格局系列图（1995–2019）

粮食作物用水效率及影响因素分析结果是基于统计数据计算得到，实际中没有具体定位观测数值可以进行对比分析且很难进行实地验证，因此本研究对比国内学者已有研究进行结果验证。用水效率测算方面，数据结果指出河北省粮食作物用水效率总体上处于较低水平，并在 2015 年之后呈现明显下降趋势，与相关研究<sup>[24]</sup>结果相符合。在用水效率影响因素分析上，本研究运行 GTWR 模型后回归模型参数  $R^2$  调整至 0.948，模型解释度较高，研究结论与部分国内学者相关研究结果一致，即有效灌溉程度对粮食作物用水效率存在正向影响效应<sup>[24-26]</sup>，种植结构、年降水量以及化肥施用强度则主要表现为负向效应<sup>[3,24,25,27]</sup>。但也有部分学者的研究结果与本文结论不一致，认为化肥施用量对作物用水效率为正向效应<sup>[28]</sup>，这是由于已有研究没有将用水效率中的非期望产出考虑进去，计算结果难以全面反映作物用水效率的实际值。此外，需要注意的是本研究计算灰水足迹仅考虑氮肥污染作为水资源污染指标，随着农业技术的进步，后续研究中灰水足迹测算应考虑加入磷肥及新型肥料污染等水污染指标。

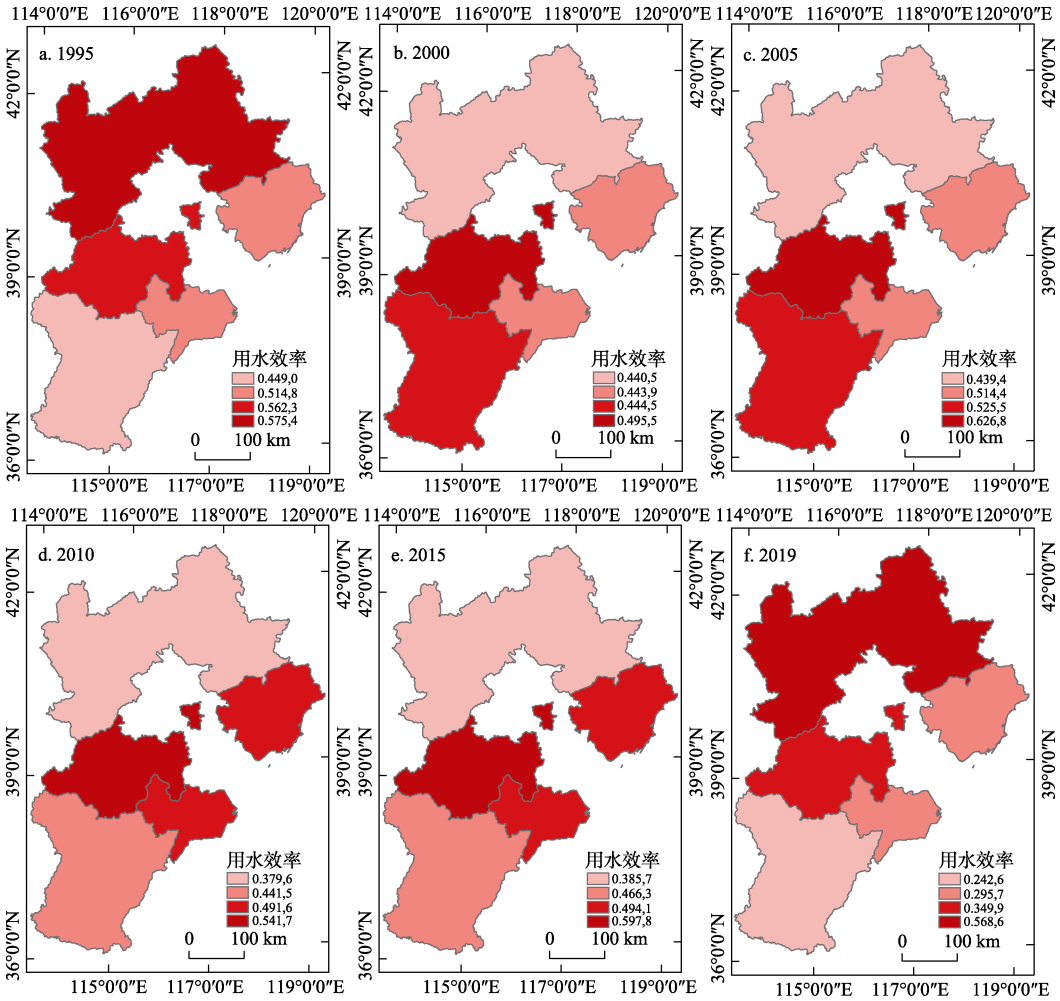


图 5 河北省 4 大区域粮食作物用水效率分布格局系列图（1995–2019）

### 5 讨论和总结

水资源短缺已经并将持续制约区域粮食可持续产出和水生态安全目标的实现，典型水资源紧缺的粮食主产区粮食作物水资源利用效率提高是缓解其水资源供需矛盾、保障粮食和生态安全的关键<sup>[24]</sup>。本研究选取河北省全域 139 个县域单元，运用改进的多要素投入产出框架下的粮食作物用水效率测算模型计算粮食作物用水效率，并综合空间计量模型和 GTWR 模型分析其空间效应和驱动因素。结果表明，1995 年( 246.01 亿 m<sup>3</sup> )至 2015 年( 314.94 亿 m<sup>3</sup> ) 河北省粮食作物总水足迹呈上升趋势，且 1995 年以来河北省灰水足迹年增长幅度最大。粮食作物用水效率整体处于较低水平，并在后期呈现下降趋势，冀西北区域内粮食作物用水效率差异最大且对河北省整体用水效率差异的贡献率增加。粮食作物用水效率对各影响因素的响应具有明显的空间效应和溢出效应，其中城镇化水平和农业机械力密度表现为正向影响且有明显的溢出效应，有效灌溉程度和产业结构表现为正向影响，但其

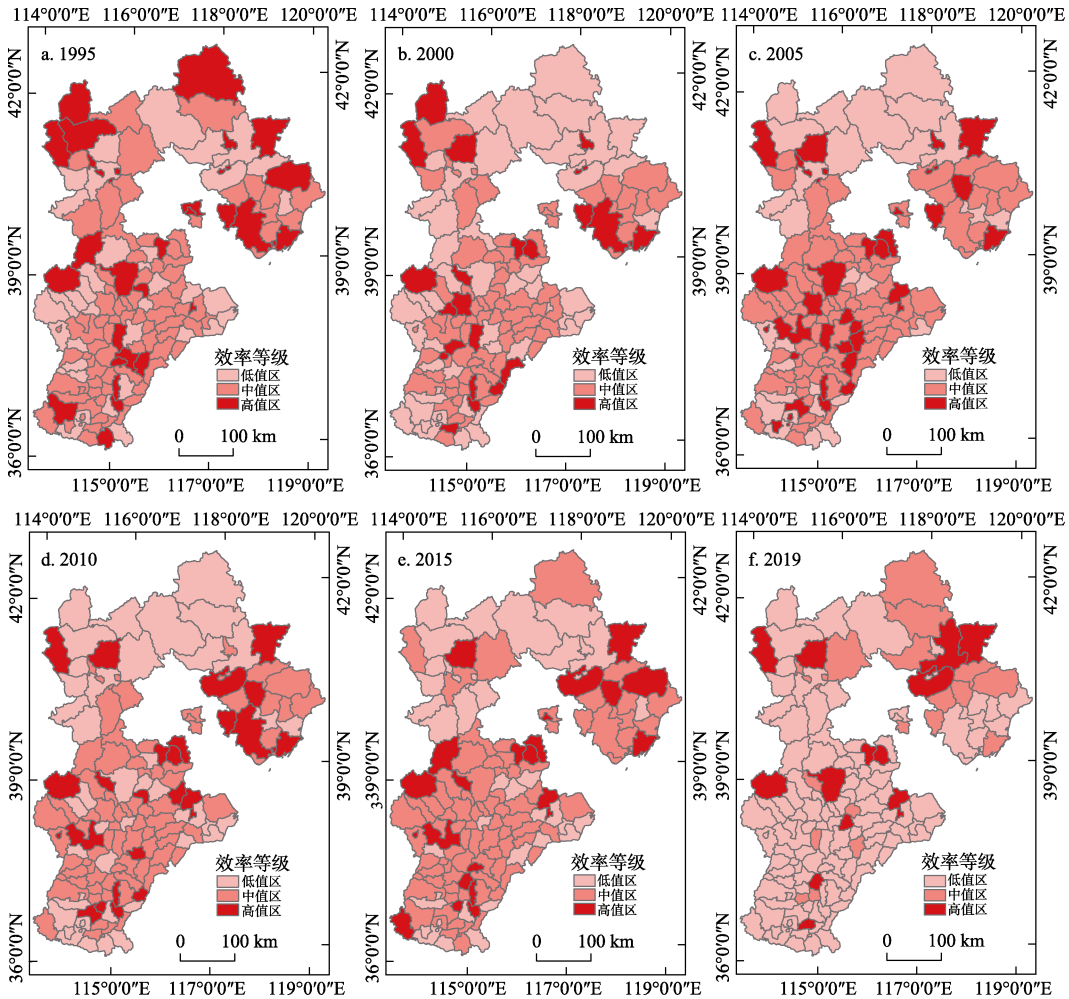


图 6 河北省县域粮食作物用水效率分布格局系列图（1995–2019）

溢出效应不显著,而化肥施用强度和种植结构均为负向效应,其中化肥施用强度溢出效应明显。

河北省粮食作物用水效率评价数据集从多视角全面评估粮食作物用水效率并探究各影响因素的空间效应及空间异质性,能为该区以及其他水资源限制性高的典型粮食主产区因地制宜的耕地水资源优化利用决策与农业种植结构调整提供基础数据支持。数据结果表明种植结构和化肥施用强度是区域用水效率提高的限制性因素,说明当前推动种植结构调整和农业绿色发展刻不容缓。但本研究中有有效灌溉程度并未考虑节水灌溉的实际影响,研究团队 2022–2023 年实地调研中发现河北省三大深层地下水漏斗区(冀枣衡、沧州、南宫)节水设施虽然已经启用,但由于不能满足粮食作物灌溉需求,部分地区农户认可度和使用率均偏低,影响用水效率的提高,后续应综合评估节水灌溉对有效灌溉面积的实际影响。同时,由于当前基础数据获取限制,并未分析不同类型以及其他种类的粮食作物用水效率,并缺乏长时间尺度的县域粮食作物用水效率演变规律研究,后续可以在时间序列选择和指标选取上进一步完善。

**作者分工:** 潘佩佩、王晓旭、王新云对数据集的开发做了总体设计;潘佩佩、苗嘉欣、温佳昱采集和处理了不同类型粮食作物用水效率测算数据;潘佩佩、温佳昱设计了模型和算法;温佳昱、李林思做了数据验证;潘佩佩、苗嘉欣撰写了数据论文等。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] 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/OL].节水灌溉,2024:1–18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1420.TV.20240227.1129.024.html>.
- [2] 常明,王西琴,贾宝珍.中国粮食作物灌溉用水效率时空特征及驱动因素——以稻谷、小麦、玉米为例[J].资源科学,2019,41(11):2032–2042.
- [3] 吴兆丹,张依,吴兆磊等.中国粮食主产区农作物生产广义用水经济效率时空演变及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2763–2777.
- [4] Yan, Z. X., Zhang, W. Y., Liu, X. W., *et al.* Grain yield and water productivity of winter wheat controlled by irrigation regime and manure substitution in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 295: 108731.
- [5] 李激,姜珊,赵勇等.京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J].水资源保护,2023,39(5):39–48.
- [6] 崔思梦,吴梦洋,王小军等.基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J].水利学报,2023,54(8):967–977.
- [7] 田嘉欣,党小虎,杨志等.水足迹视角下黄土高原经济林果扩张的水安全风险——以苹果种植为例[J].自然资源学报,2022,37(10):2750–2762.
- [8] 潘佩佩,苗嘉欣,王晓旭等.河北省粮食作物用水效率评价数据集(1995–2019)[J/DB/OL].全球变化数据仓储电子杂志,2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.02.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.02.04.V1>.
- [9] 全球变化科学研究数据出版系统.全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).

- [10] 温佳昱, 潘佩佩, 王晓旭等. 河北省粮食作物用水效率时空特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 117–127.
- [11] 尹默雪, 赵先贵. 基于水足迹理论的内蒙古 1990–2016 年水资源评价[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(6): 120–125.
- [12] 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(139): 1577–1600.
- [13] Tone, K. A. slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32–41.
- [14] Liu, W. B., Meng, W., Li, X. X., et al. DEA models with undesirable inputs and outputs [J] *Annals of Operations Research*, 2010, 173(1): 177–194.
- [15] 郑滋槐, 姜超, 汪婕等. 常态化防疫背景下城市盗窃犯罪的时空演变及其机理研究——以浙江海宁市为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 341–352.
- [16] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别 [J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155–1167.
- [17] 赵倩石, 潘佩佩, 王晓旭等. 基于 DEA-Malmquist 指数的河北省耕地利用效率及其影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1162–1171.
- [18] 谭忠昕, 郭翔宇. 基于超效率 DEA 模型的中国粮食生产用水效率评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 280–288.
- [19] 闫明涛, 乔家君, 瞿萌等. 河南省农业生态效率测度、空间溢出与影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1396–1405.
- [20] Geng, Q. L., Ren, Q. F., 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.
- [21] 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.
- [22] 蔡荣, 陶素敏. 中国粮食生产布局演变及空间机制分解: 1978–2018[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 1–7.
- [23] 曹永强, 李维佳, 袁立婷. 河北省主要农作物生产时空格局变化特征及安全评价[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1319–1327.
- [24] 苏喜军, 纪德红, 何慧爽. 黄淮海平原农业水资源绿色效率时空差异与影响因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(3): 106–111.
- [25] 张启楠, 张凡凡, 麦强等. 中国粮食生产效率空间溢出网络及提升路径[J]. 地理学报, 2022, 77(4): 996–1008.
- [26] 赵姜, 孟鹤, 龚晶. 京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(3): 76–84.
- [27] 宋海风, 刘应宗. 粮食主产区小麦生态效率及降污潜力研究——基于藏粮于田的视角[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 97–101.
- [28] 崔宁波, 于尊, 姜兴睿. 黑龙江垦区粮食生产水资源利用效率研究[J]. 农业经济与管理, 2020(5): 54–63.