

左其亭, 杨振龙, 路振广, 等. 引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 39-47, 75. ZUO Q T, YANG Z L, LU Z G, et al. Water resource utilization efficiency and spatial autocorrelation analysis of water-receiving area of Yinjiang-Jihuai Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 39-47, 75. (in Chinese)

引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析

左其亭^{1,2}, 杨振龙¹, 路振广³, 王敏³, 陶洁^{1,2}

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 郑州 450001; 3. 河南省水利科技应用中心, 郑州 450000)

摘要: 选取引江济淮工程河南受水区 9 个县(区), 构建包括水资源、经济社会和生态环境 3 个维度的水资源利用效率测算指标体系, 采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”评价方法对水资源利用效率进行测算, 构建障碍度模型辨析受水区水资源利用效率制约因素, 通过空间自相关模型分析各县(区)水资源利用效率的集聚性特征。结果表明: 受水区水资源利用效率指数(water resource utilization efficiency index, WREI)呈现波动上升趋势, 年均增幅为 3.55%; 主要障碍因子是生态用水占比和人均水资源占有量; WREI 具有较为明显的空间正相关作用, 空间集聚性呈降低趋势。

关键词: 引江济淮工程河南段; 水资源利用效率; SMI-P; 障碍因子分析; 空间自相关

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0005

引江济淮工程河南受水区是河南省重要的粮食产地, 是重要的灌溉区域, 对水资源需求量常年处于河南省前列。该区域水资源供需矛盾突出, 水资源影响了受水区经济社会发展和生态环境改善^[1]。分析受水区水资源利用效率水平可以明确受水区发展制约因素, 为实现受水区高质量发展提供建议。

水资源利用效率是指消耗单位水资源量所能产出包含经济、社会和生态多方面的效益, 可以有效反映一个地区水资源利用水平。国内外学者对水资源利用效率的计算研究已较为完善, 研究方法主要是数据包络法^[2-3]和指标评价法^[4-5], 对不同城市^[6]、流域^[7]和部门^[8-9]进行水资源利用效率的测算并为制定政策提供建议。例如: 应卓晖等^[10]构建 SBM-DEA 模型, 以劳动力、固定资产投资和用水量作为投入指标, GDP 和污水排放量作为产出指标, 测算河南省 18 个地市近十年的水资源利用效率, 发现郑

州市水资源利用效率最高, 各区域之间的水资源利用效率差距呈现逐渐缩小趋势; 白惠婷等^[11]优选指标体系, 构建模糊综合评价模型, 对京津冀城郊农业园区水资源利用效率进行测算, 发现农业园区的供用水方式对水资源利用效率起着重要的影响; 操信春等^[12]基于水足迹理论构建多维指标体系, 利用模糊综合评价模型对不同灌溉方式下稻田水资源利用效率进行评价, 提出蓄水控灌为稻田最佳灌溉方式; David 等^[13]以美国加利福尼亚州为例, 将其成本收益与资本投资评价方法结合, 深入分析了在自然状态发生变化时水资源利用效率的投资回报风险; Gabriel 等^[14]基于模拟数据对亚马孙河流域水资源利用效率进行评估, 结果显示亚马孙河流域水资源利用效率具有明显的季节性模式, 旱季与雨季的水资源利用效率相差 3% 左右。此外, Tanja 等^[15]对挪威云杉的水分利用效率进行研究, 得出其水分利用效率与生产率呈现相反趋势的结论。

收稿日期: 2022-08-04 修回日期: 2022-12-29 网络出版时间: 2023-01-05

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//13.1430.TV.20230104.1451.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJHH/JS/FWKY-2021002); 河南省水利科技攻关计划项目(GG202022)

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 河南固始人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

国内外水资源利用效率研究尺度多为流域和省市等大尺度,缺乏对县区等小尺度研究区的水资源利用效率及其影响制约因素研究,对部分微观研究区的实际指导意义并不强。测算水资源利用效率需因地制宜,细化研究区尺度,根据不同区域实际情况制定更具针对性的政策建议。因此,以引江济淮工程河南受水区 9 个县区为研究对象,评估水资源利用效率等级,分析其时空变化特征,辨析其制约因素,以期为河南段受水区提升水资源利用效率提供一定的参考价值。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

引江济淮重大调水工程对联通国家大水网,改善中国水资源空间格局具有重要意义,对工程受水区可持续发展具有积极影响。引江济淮工程福泽

安徽、河南 2 个省份 15 个地市 55 个县区,受水区总面积达 7.06 万 km²。

引江济淮工程河南受水区属于淮河流域,位于河南省东部,包括梁园区、睢阳区、柘城县、夏邑县、永城市、郸城县、淮阳区、太康县和鹿邑县共 9 个县区,受水面积为 1.21 万 km²,见图 1。该受水区属于典型的暖温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,四季分明,多年平均降水量稳定在 750 mm 左右,年际变化幅度小,年内分配不均,夏季雨量充沛,约占全年的 50% 以上。受水区主要发展农业,是河南省重要的粮食产地,对水资源依赖程度较高,随着近年来经济社会发展,水资源矛盾逐渐成为首要制约因素。豫东地区地下水过量开采现象严重,地下漏斗现象典型,除建设引调水工程外,仍需提高水资源利用效率。



图 1 引江济淮工程河南段及其受水区

Fig. 1 Schematic map of the water-receiving area of the henan section of the Yinjiang-Jihuai Project

1.2 数据来源

选取受水区 2010—2021 年近 12 年的数据,其中,年降水量数据来源于中国气象数据网,人均水资源占有量和地下水供水占比数据来源于商丘和周口两市的《水资源公报》和《引江济淮工程(河南段)初步设计报告》,城镇化率、人均 GDP 和第三产业占 GDP 比重数据来源于《商丘统计年鉴》和《周口统计年鉴》,污水处理率、生活垃圾无害化处理率、生态用水占比和集中饮用水水质达标率数据来源于商丘和周口两市的《生态环境状态公报》和《引江

济淮河南省水资源供需分析报告》,产水模数依据受水区受水面积和水资源总量计算得出,人口密度由受水区人口数量与受水区面积进行二次计算得出。由于数据年限较长,部分年鉴数据缺失,依据内插法对其进行插补延长,以保证数据完整性。

2 研究方法

2.1 构建指标体系

依据研究区实际水资源利用情况并参考相关文献^[16-17],基于科学性、全面性和代表性等原则,构建

针对引江济淮河南受水区水资源利用效率指数评价指标体系,见表1。目标层为水资源利用效率指数,准则层包括水资源、经济社会和生态环境3个维度。水资源维度是对水资源利用效率最直接的表征,其水平以水资源指数(water resources index, WRI)表征,反映研究区自然条件和人为开采的水资源利用效率水平,该维度包括产水模数、人均水资源占有量、年降水量和地下水供水占比等指标。产水模数指单位流域面积上单位时间所产生的径流量,反映在区域水资源开发利用过程中对径流量的影响;人均水资源占有量是衡量受水区淡水资源人均拥有量的重要指标,反映在区域水资源开发利用过程中对淡水资源的影响;年降水量则反映水资源开发时对区域水源的影响作用;地下水供水占比则更能反映水资源的利用水平,减少地下水的开发是区域水资源利用的主要目标之一。经济社会的发展不可避免地会对区域水资源造成一定的影响,过度的生产建设会破坏原有的水资源系统,经济社会水平也对水资源利用效率具有一定的促进作用。经济社会指数(economic and social indicators, ESI)反映人类活动和经济社会的发展对受水区水资源利用效率指数(water resource utilization efficiency index, WREI)的影响作用,包括城镇化率、人口密度、人均GDP和第三产业占GDP比例4个指标。城镇化率、人口密度和人均GDP是经济社会进程的重要表征指标,综合反映水资源利用效率与经济社会发展的互馈关系;第三产业占GDP比例可以直观反映区域内第三产业的发展现状,改善经济结构,减少第一、第二产业对水资源的消耗。在大力推动生态文明建设的环境背景下,提升研究区水资源利用效率不能以牺牲生态环境为代价,生态环境是提升水资源利用效率的红线,不可触碰。生态环境指数(ecological environment index, EEI)表征受水区在水资源开发利用过程中对生态环境的反馈程度。本文选取污水处理率、生活垃圾无害化处理率、生态用水占比、集中饮用水水质达标率构成生态环境维度。污水处理率和生活垃圾无害化处理率是从水和生活垃圾2个角度反映区域在水资源利用过程中对生态环境的反馈程度;生态用水占比则反映了区域在水资源开发利用过程中对生态环境的重视程度;集中饮用水水质达标率反映水资源开发利用对居民生活最基本的保障程度。

表1 水资源利用效率指数指标体系

Tab. 1 Water resources utilization efficiency index system

目标层	准则层	指标层	类型
	水资源维度	A_1 产水模数/($\text{万m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	正
		A_2 人均水资源占有量/ m^3	正
		A_3 年降水量/mm	正
		A_4 地下水供水占比/%	负
水资源利用效率	经济社会维度	B_1 城镇化率/%	正
		B_2 人口密度/($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)	负
		B_3 人均GDP/万元	正
		B_4 第三产业占GDP比例/%	正
	生态环境维度	C_1 污水处理率/%	正
		C_2 生活垃圾无害化处理率/%	正
		C_3 生态用水占比/%	正
		C_4 集中饮用水水质达标率/%	正

注:正向指标表示指标数值越大则评价结果越优,反之亦然。

2.2 SMI-P 模型

指标量化的方法可分为定量指标量化和定性指标量化两大类。对于定量指标量化的方法研究已经十分成熟,较为常见的评价方法有模糊综合评价、层次分析法、TOPSIS法、分层聚类法等。选择由左其亭^[18]于2008年提出的“单指标量化-多指标综合-多准则集成”的综合评价方法,即“SMI-P模型”。该方法主要由以下3个步骤组成。

单指标量化:该模型对单指标量化的方法不做唯一要求,为解决不同指标的量纲问题,选择采用模糊隶属度方法以消除量纲误差,通过模糊隶属函数将各指标映射到[0,1]上,具体计算公式为

$$\mu_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_i \\ 0.3 \left(\frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} \right) & a_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq c_i \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq d_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq e_i \\ 1 & e_i < x_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$u_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq e_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{d_i - x_i}{d_i - e_i} \right) & e_i < x_i \leq d_i \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{c_i - x_i}{c_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq c_i \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{b_i - x_i}{b_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 \left(\frac{a_i - x_i}{a_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq a_i \\ 0 & a_i < x_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中： μ_i 为指标的单指标量化值； x_i 、 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 e_i 分别表示指标的原始数据、最差值、较差值、及格值、较优值、最优值； i 表示不同指标。式(1)和式(2)分别为正向和负向指标计算公式。

多指标综合：测算水资源利用效率指数的指标体系分为水资源维度、经济社会维度和生态环境维度 3 个准则层，计算准则层的综合得分步骤称之为多指标综合，通过对指标加权求得准则层的隶属度，具体计算公式为

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \mu_j \quad (3)$$

式中： S_i 表示不同准则层的得分； w_j 表示第 i 个指标的权重，采取层次分析法与熵权法计算各单指标的组合同权重^[19]。

多准则集成：多准则集成是将不同准则层的得分通过加权得到水资源利用效率综合指数。

$$T = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (4)$$

式中： T 为水资源利用效率综合指数； w_i 表示准则层权重，3 个维度的权重均为 1/3。

基于和谐理论并参考相关文献^[20]，将水资源利用效率水平划分为 5 个等级，见表 2。

表 2 水资源利用效率水平划分等级
Tab. 2 The level of water resources utilization efficiency

WREI	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]
等级	很低	较低	一般	较高	很高

2.3 障碍因子分析模型

基于“SMI-P”模型对受水区水资源利用效率评价结果，构建障碍因子分析模型辨识对受水区提升水资源利用效率的制约因素，基于指标偏离度的障碍度诊断模型是较为常用的障碍因子诊断分析模型，具体计算公式^[21]为

$$L_i = 1 - x'_i \quad (5)$$

$$P_i = \frac{L_i w_i}{\sum_{i=1}^n L_i w_i} \quad (6)$$

式中： L_i 为指标偏离度； x'_i 为指标标准化后数值； w_i 为指标权重； P_i 为指标障碍度； n 为指标数量。

2.4 空间自相关模型

2.4.1 全局空间自相关

全局空间自相关是从整体宏观的角度判断要素的聚合程度，计算结果用全局莫兰指数表示，莫兰指数的范围为 $[-1, 1]$ ；当全局莫兰指数为负时，说明受水区水资源利用效率在空间上呈负相关关系；当全局莫兰指数为正时，说明受水区水资源利用效率呈正相关关系；当全局莫兰指数为 0 时，则不存在任何相关关系。借助 GeoDa 软件，采用 k -nearest 法构建空间矩阵计算引江济淮工程河南受水区 2010、2015 和 2021 年水资源利用效率的全局莫兰指数，具体计算步骤^[22]为

$$I_{GM} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (7)$$

式中： I_{GM} 表示全局空间莫兰指数； z_i 表示不同县区的水资源利用效率； \bar{z} 为整个受水区的水资源利用效率指数平均值； $n=9$ ； ω_{ij} 为空间权重矩阵； S 为样本的方差值。

2.4.2 局部空间自相关

局部空间自相关是分析相邻单元之间的空间关联性，可以有效表示受水区水资源利用效率局部空间分布特征。如果局部莫兰指数为正，则受水区单元之间存在高-高集聚或低-低集聚的空间分布特征，反之则存在高-低或者低-高集聚的空间特征。具体计算公式为

$$I_{LM} = \frac{n(z_i - \bar{z}) \sum_{j=1}^m \omega_{ij} (z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (8)$$

式中变量含义同上。

3 结果分析

3.1 水资源利用效率测算结果

3.1.1 时间维度测算分析

通过对受水区 WREI 的时间特征分析，近 10 年

来受水区 WREI 呈现波动上升趋势,由 2010 年的 0.287 上升至 2021 年的 0.677,年均增长率为 3.55%,说明在可持续发展背景下,受水区水资源利用效率稳步提升,已经达到“较高”水平。

由图 2 得知,2013 年至 2019 年是水资源利用效率指数平均增速最高的年份,因为在这几年间河南省加强水安全保障和实施水生态环境保护规划,商丘和周口两市坚定执行打赢污染防治攻坚战的政策,两市水环境质量得到有效改善,水资源利用效率也快速上升。这与左其亭等^[23]对黄河流域水资源利用水平在 2013 年以后持续上升具有一致性。通过对 WRI、ESI 和 EEI 分析可得,3 个维度与 WREI 呈现明显协同性,EEI 的年均增幅最大(4.6%),WRI 的年均增幅次之(3.2%),ESI 的年均增幅最低(2.9%),说明受水区近年来水生态环境得到明显改善,人们对生态环境的重视程度增强,大力推动生态文明建设,这与两市实施碧水工程有一定联系,完善受水区在内的所有县区的污水处理厂管网等基础设施,与张满满等^[24]对河南省水生态安全评价结果具有一致性。

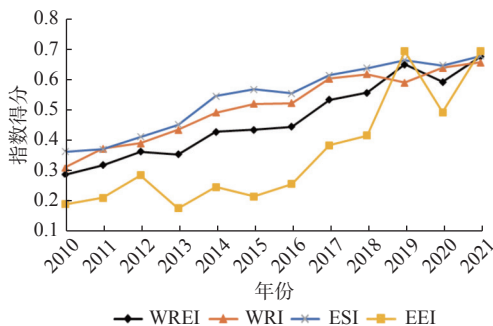


图 2 受水区水资源利用效率指数

Fig. 2 Water resources utilization efficiency index chart of water-affected areas

3.1.2 空间维度测算分析

通过 ArcGIS 软件,绘制受水区水资源利用效率测算结果,见图 3。9 个县区的 WREI 由 2010 年的存在较大空间差异逐渐趋同。从 WREI 的多年均值来看,永城市和睢阳区处于 9 县区中领先位置,太康县则处于较低水平,这与受水区经济社会发展情况具有趋同趋势,部分县区现阶段以大力推动经济建设为主,对水资源的重视程度不高,导致 WREI 水平较低,也为其他区域提供警示作用。淮阳区近 12 年来 WREI 跨越 3 个等级,由 2010 年的极低等级(0.15)提升至 2021 年的较高等级(0.60),通过对 3 个准则层维度分析,淮阳区的 EEI 由最初的 0.09 提升至 0.74,EEI 的提升为 WREI 的提升贡献值最大,

这也与近年来淮阳区高度重视生态文明建设息息相关,推动可持续发展,扎实推动生态文明建设,重点解决废污水排放问题,严格限制企业排污。虽然跨越了 3 个等级,但是淮阳区却不是 WREI 提升最多的县区,柘城县由 2010 年的较低等级(0.23)提升至 2021 年的较高等级(0.76),WREI 的增加值高达 0.53,从 3 个准则层维度分析,WRI 提高 0.40,ESI 提高 0.44,EEI 提升 0.72,与淮阳区一致,EEI 的巨大提升也是柘城县 WREI 提升的重要因素。睢阳区 WREI 的排名由 2010 年的第一(0.50)降低至 2021 年的第六(0.63),WREI 仅提高了 0.13,是受水区 9 个县区中 WREI 提升最少的县区,这也为睢阳区制定水资源政策提供了新的建议,不可照搬固有的水资源政策。

3.2 障碍因子诊断分析

通过公式(5)~(6)计算受水区整体指标障碍度结果见表 3,水资源利用效率障碍因子排名前 5 的为生态用水占比(C_3)、人均水资源占有量(A_2)、人口密度(B_2)、产水模数(A_1)和第三产业占 GDP 比例(B_4)分别占总障碍度的 31.40%、21.25%、13.11%、11.32% 和 8.55%,生态用水占比和人均水资源占有量是制约受水区提高水资源利用效率的关键因素,提高受水区生态用水占比和人均水资源量是目前需首要解决的问题,这也与国务院加快推动建设引江济淮工程具有契合性。引江济淮工程的目标之一就是补充河南受水区生态用水量,在该工程建成投入使用,可为受水区提高水资源利用效率带来极大的推动作用。降低人口密度和提高产水模数也是提高受水区水资源利用效率时重点考虑的因素,应适当转移城镇人口,降低人口密度,减少水供应危机出现的概率。

计算各县区水资源利用效率障碍度结果见表 4,表 4 中仅展示各县区水资源利用效率障碍因子位于前 2 位的指标,由上文可知,太康县 WREI 最低,通过对其障碍因子进行分析可知,生态用水占比和人均水资源占有量是制约 WREI 的主要因素,这就要求太康县加大生态用水投入,发展绿色环保型产业,改善当地水资源环境,严格限制污水排放,引江济淮工程进行水资源配置时,应着重考虑太康县缺水问题,在合理范围内应多分配水量。大多数县区的主要障碍因子为人均水资源占有量、生态用水占比,但是也有个别县区如鹿邑县,城镇化率是其第二高的障碍因子,这就要求鹿邑县以推动经济发展为重心,深化改革产业结构,进而提高水资源利用效率。

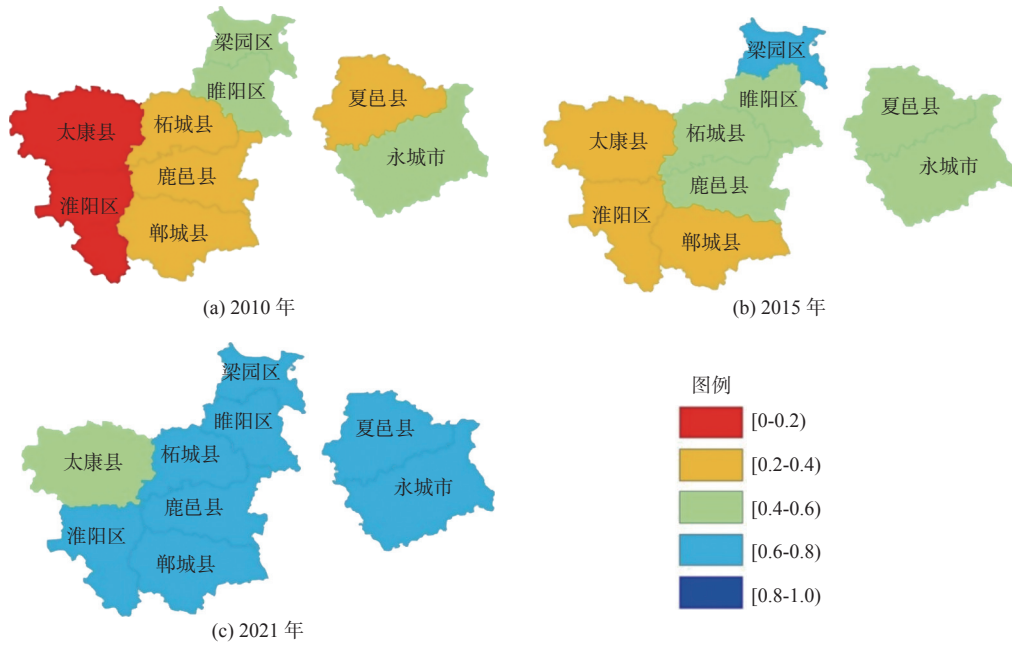


图 3 受水区水资源利用效率空间特征

Fig. 3 Spatial characteristics of water resource utilization efficiency in water-receiving areas

表 3 受水区整体障碍因子

Tab. 3 Overall barrier factors in water-receiving area

指标	A_1	A_2	A_3	A_4	B_1	B_2	B_3	B_4	C_1	C_2	C_3	C_4
障碍度	11.32	21.25	2.72	2.29	4.18	13.11	5	8.55	0.06	0.11	31.4	0.01

表 4 受水区整体障碍因子

Tab. 4 Overall barrier factors in water-receiving area

地区	梁园 区	睢阳 区	柘城 县	夏邑 县	永城 市	郸城 县	淮阳 县	太康 县	鹿邑 县
指标	A_2	A_2	C_3	C_3	A_1	C_3	A_2	C_3	C_3
障碍度	29.5	20.3	34.1	46.7	19.8	39.1	29.5	25.4	59.6
指标	B_4	B_2	B_2	B_2	B_4	A_2	C_3	A_2	B_1
障碍度	20.7	16.8	13.1	16.3	9.7	15.9	21.3	25.4	12.6

3.3 空间自相关分析

3.3.1 全局空间自相关

利用 GeoDA 软件,对受水区 2010、2015 和 2021 年的 WREI 进行全局空间自相关分析,基于模型内部构建的 k -nearest 矩阵,对结果进行 999 次随机化置换,计算 WREI 的全局莫兰指数结果见图 4。2010、2015 和 2021 年受水区 WREI 的全局空间莫兰指数分别为 0.559 1、0.555 9 和 0.322 0,呈现正相关现象,即 WREI 较高的县区会带动周围县区的

WREI 提高,反之亦然。通过全局空间莫兰指数可以直观地看到受水区 9 个县区 WREI 的空间集聚度呈现先持平后下降的趋势。通过对 P 值分析可得,2010 年通过了 1% 的显著性检验,而 2021 年仅通过了 10% 的显著性检验,也印证了受水区各县市之间的空间集聚程度逐渐下降的结论。

3.3.2 局部空间自相关

利用 GeoDA 软件,绘制受水区 2010、2015 和 2021 年的局部莫兰指数 LISA 聚类地见图 5,受水区主要呈现高-高、低-低和高-低集聚 3 种类型模式。2010 年太康县、淮阳区呈现低-低集聚模式,2015 年淮阳区与 2021 年一样仍然呈现低-低集聚,睢阳区具有高-高集聚模式,2021 年与 2015 年相比,睢阳区的高-高集聚模式消失,柘城县呈现高-低集聚模式。

对 LISA 聚类图分析:太康县持续呈现低-低集聚模式,说明太康县的 WREI 水平较低,并且这种低水平会辐射周围县区,这也为其周围县区提出了警示,这些地区应合理调整经济结构和产业结构,合理规划水资源配置,提升居民用水意识,进而提升区域水资源利用效率。睢阳区于 2015 年呈现高-高集聚模式,睢阳区的高 WREI 会辐射周围区域,为周围区域提升 WREI 带来了积极的作用,周围县区可向睢阳区借鉴经验,学习其水资源利用模式。2021 年柘城县 WREI 处于热点区域,周围县区的 WREI 水平较低,这就要求睢阳区、太康县和鹿邑县加快

建设节约型社会,推动绿色发展,避免水资源成为制约经济发展的因素。

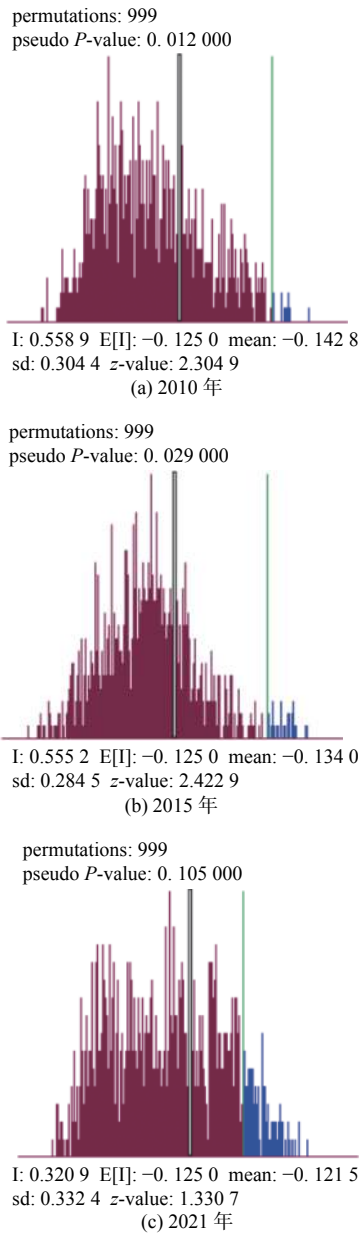


图4 受水区水资源利用效率莫兰指数结果

Fig. 4 Results chart of the Moran Index on water use efficiency in water-receiving areas

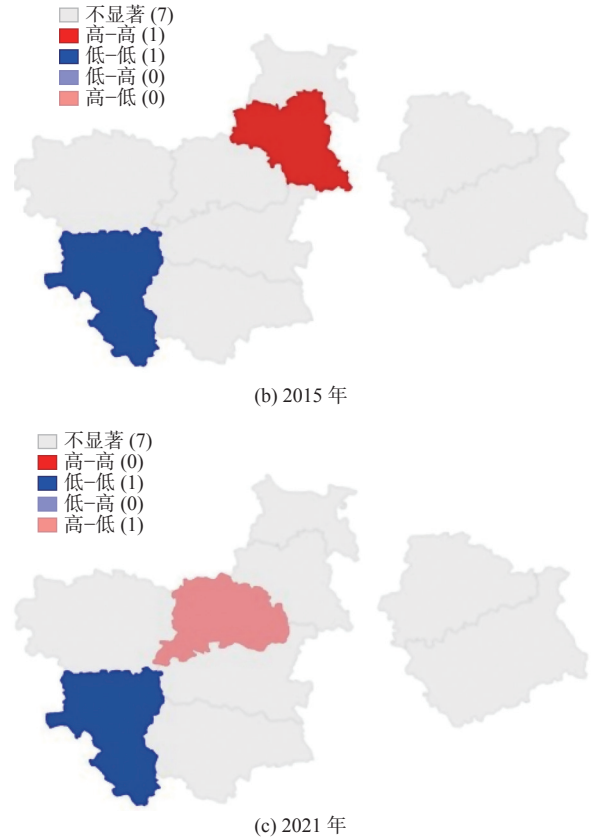
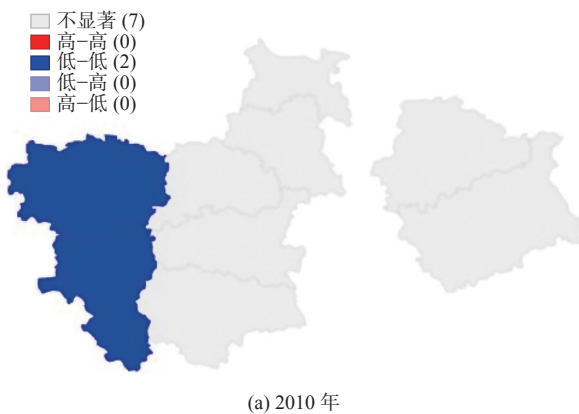


图5 受水区水资源利用效率LISA聚类图

Fig. 5 LISA cluster map of water resource utilization efficiency in water-receiving areas

4 结论

近10年来引江济淮工程河南受水区WREI呈现波动上升的趋势,年均增长率为3.55%。3个准则层维度均呈现增长趋势,EEI的年均增幅最大,WRI次之,WRI的年均增幅最小。

生态用水占比和人均水资源占有量为受水区WREI提升的主要制约因素,也有部分县(区)的主要障碍因素为城镇化率和产水模数等指标,这为整个受水区和各个县(区)制定提升WREI政策提供了技术支撑。

受水区水资源利用效率存在较为明显的正相关作用,其中,太康县持续呈现低-低集聚模式,2021年睢阳区的高-高集聚模式消退,柘城县呈现高-低集聚模式。

参考文献:

- [1] 张知非,倪红珍,陈根发,等.我国分区水压力变化趋势分析与差异化应对建议[J].水利水电技术,2020,51(11):41-48. DOI: 10.1360/csb2012-57-16-1412.
- [2] 乔睿楠,金明姬.基于DEA-Malmquist指数模型的吉

- 林省水资源利用效率分析[J]. *中国农村水利水电*, 2022(9): 162-167. DOI: 10.18402/resci.2017.04.02.
- [3] 何楠, 袁胜楠, 王军. 基于DEA-Malmquist模型的黄河流域水资源利用效率评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(5): 7-11. DOI: 10.12677/jwrr.2019.84039.
- [4] 白芳芳, 齐学斌, 乔冬梅, 等. 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 146-152. DOI: 10.18402/resci.2017.09.06.
- [5] MENG Y, ZHANG X, SHE D X, et al. The spatial and temporal variation of water use efficiency in the Huai River basin using a comprehensive indicator[J]. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2017, 17(1): 229-237. DOI: 10.2166/ws.2016.128.
- [6] LI P, SHI P J. Spatiotemporal evolution of water use efficiency in water conservation areas in the upper reaches of the Yellow River: A case study of the Lanzhou[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 768(5): 052080. DOI: 10.1088/1757-899x/768/5/052080.
- [7] WANG Z W, WU L X, HUANG W, et al. Research on the potential of water resources utilization efficiency in the North Canal basin to improve environmental flow guarantee degree[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 831(1): 012077. DOI: 10.1088/1755-1315/831/1/012077.
- [8] HUANG Y J, HUANG X K, XIE M N, et al. A study on the effects of regional differences on agricultural water resource utilization efficiency using super-efficiency SBM model[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-11. DOI: 10.1038/s41598-021-89293-2.
- [9] 朱丽娟, 陆秋雨. 中国省域耕地与灌溉水资源利用效率及其耦合协调度的空间相关性分析[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(3): 297-308. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.
- [10] 应卓晖, 赵衡, 王富强, 等. 基于DEA和Tobit模型的河南省水资源利用效率评价及影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 255-262. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0027.
- [11] 白惠婷, 刘玉春, 赵晗, 等. 京津冀城郊农业园区水资源利用效率评价方法及实例[J]. *中国农村水利水电*, 2019(10): 84-92. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.10.017.
- [12] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. *水利学报*, 2020, 51(10): 1189-1198. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2020.0260.
- [13] DAVID A, ADAM L. Incorporating uncertainty in the economic evaluation of capital investments for water-use efficiency improvements[J]. *Land Economics*, 2021, 97(3): 655-671. DOI: 10.3368/wple.97.3.100119-0143R.
- [14] GABRIEL D O, NATHANIEL A B, ELISABETE C M, et al. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19): 5291-5309. DOI: 10.1080/01431161.2017.1339924.
- [15] TANJA G M, INGO H, BJORN G, et al. Increasing water use efficiency comes at a cost for Norway spruce[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 296. DOI: 10.3390/f7120296.
- [16] 何伟, 王语苓, 傅毅明, 等. 黄河流域城市水资源利用效率评估及需水量估算[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(6): 482-498. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0154.
- [17] LIU G, OMAID N, FAN Z. Evolution and the drivers of water use efficiency in the water-deficient regions: A case study on Ω -shaped region along the Yellow River, China.[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 29(13): 19324-19336. DOI: 10.1007/s11356-021-16969-7.
- [18] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 1-7. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.001.
- [20] 左其亭, 杨振龙, 曹宏斌, 等. 基于SMI-P方法的黄河流域水生态安全评价与分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 10-19,165. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.03.002.
- [21] 李文正, 刘宇峰, 张晓露, 等. 陕西省城市绿色发展水平时空演变及障碍因子分析[J]. *水土保持研究*,

- 2019, 26(6): 280-289. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.037](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.037).
- [22] 李志刚, 王梦雨, 牛继强, 等. 基于空间自相关分析的市域耕地空间格局演变分析: 以洛阳市为例[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2021, 34(3): 415-421. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0972.2021.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2021.03.012).
- [23] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(10): 29-38. DOI: [10.12062/cpre.20210107](https://doi.org/10.12062/cpre.20210107).
- [24] 张满满, 于鲁冀, 张慧, 等. 基于PSR模型的河南省水生态安全综合评价研究[J]. *生态科学*, 2017, 36(5): 49-54. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.05.007](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.05.007).

Water resource utilization efficiency and spatial autocorrelation analysis of water-receiving area of Yinjiang-Jihuai Project

ZUO Qiting^{1,2}, YANG Zhenlong¹, LU Zhenguang³, WANG Min³, TAO Jie^{1,2}

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protect, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: At present, the problem of the uneven spatial and temporal distribution of water resources in China is still very serious, and the lack of overall allocation capacity of water resources in river basins, the poor water ecological environment caused by water shortage, and the failure to eradicate flood and drought disasters have seriously affected China's economic modernization. The State Council of China proposed to vigorously promote the construction process of 172 major water conservancy projects, accelerate the construction of the national water network system, enhance the ability to allocate water resources across regions, and solve the dilemma faced by China's water resources. The Yinjiang-Jihuai Project is one of the 172 major water conservancy projects, realizing the connection of the Yangtze River and the Huai River, the fuze water receiving area and the area along the project, effectively improving the problem of water scarcity and ecological environment, and providing a strong guarantee for the economic take-off of the region.

To identify the basic situation of water resource utilization in the engineering construction area and provide basic evaluation and analysis data for the project construction, 9 counties and districts in the water-receiving area of the henan section of the Yinjiang-Jihuai Project are selected to construct a water resource utilization efficiency index (WREI) system that includes three dimensions of water resources, economy and society, and ecological environment, and uses the evaluation method of "single index quantification-multi-index synthesis-multi-criterion integration" to measure the water resource utilization efficiency, and constructs an obstacle model to identify the constraints on the utilization efficiency of water resources in the water resources area. The agglomeration characteristics of water resource utilization efficiency in various counties and districts were analyzed by the spatial autocorrelation model.

The results show that in the past decade, the WREI in the water-receiving area has shown a fluctuating upward trend, and under the background of sustainable development, the water resource utilization efficiency of the water-receiving area has been steadily improved and has reached a "high" level. The WREI of the nine counties has gradually converged from the existence of large spatial differences in 2010. The analysis of the obstacle factors of water resources utilization efficiency can be concluded that factors such as the proportion of ecological water use and the per capita water resources share restrict the improvement of water resource utilization efficiency. There is an obvious positive correlation between the water resource utilization efficiency of the water-receiving area of henan in the Yinjiang-Jihuai Project.

(下转第 75 页)