

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.007

河南省水资源效率综合测度及时空分异

焦士兴¹, 王安周², 张崇崇³, 赵荣钦⁴, 尹义星⁵, 刘亚奇⁶, 马晓蕾¹

(1. 安阳师范学院资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455002; 2. 洛阳市第十九中学, 河南 洛阳 471000;
3. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 4. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院,
河南 郑州 450046; 5. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044;
6. 水利部黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004)

摘要:基于 DEA 模型评价河南省水资源绿色效率、环境效率和经济效率, 运用 ArcGIS 软件分析水资源效率的时空特征, 依托 GeoDa 软件进行相关性分析。结果表明: 河南省不同类型水资源效率变化趋势不同, 其中水资源经济效率呈现下降趋势, 水资源环境效率和绿色效率呈现波动上升趋势; 河南省 18 市水资源效率差距变化趋势不同, 其中水资源经济效率差距呈缩小趋势, 水资源环境效率和绿色效率差距呈增大趋势, 且水资源经济效率明显高于水资源环境效率和绿色效率; 河南省水资源经济效率高和中高等级城市、低和中低等级城市各占 50%, 而水资源环境效率和绿色效率高和中高等级城市、低和中低等级城市则分别占 55.6% 和 44.4%; 河南省水资源效率相似的地区存在空间集聚效应, 其中水资源经济效率全局空间自相关性呈增强趋势, 水资源环境效率和绿色效率全局空间自相关性则呈减弱趋势; 河南省水资源经济效率、环境效率和绿色效率低-低集聚地区均为安阳市, 经济效率高-高集聚地区为平顶山、许昌、漯河和周口等 4 市, 环境效率高-高集聚地区为平顶山和许昌市, 绿色效率高-高集聚地区则为洛阳和许昌市, 低-高与高-低集聚地区数都为 0。

关键词:水资源效率; 经济效率; 环境效率; 绿色效率; 时空分异; SBM-DEA 模型; 河南省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0048-08

Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province

//JIAO Shixing¹, WANG Anzhou², ZHANG Chongchong³, ZHAO Rongqin⁴, YIN Yixing⁵, LIU Yaqi⁶, MA Xiaolei¹
(1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, China; 2. The Luoyang 19th High School, Luoyang 471000, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 5. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 6. Hydrological Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Based on the DEA model, the green efficiency, environmental efficiency, and economic efficiency of water resources in Henan Province were evaluated. The temporal-spatial characteristics of water resources efficiency were analyzed using ArcGIS software, and the correlation analysis was carried out using GeoDa software. The results demonstrate that water resources efficiencies in Henan Province have different trends, in which the economic efficiency shows a downward trend, while the environmental efficiency and green efficiency show fluctuating upward trends; water resources efficiency gaps of 18 cities also have different trends, in which the gap of economic efficiency shows a narrowing trend, while those of environmental efficiency and green efficiency show increasing trends; the economic efficiency is obviously higher than the environmental efficiency and green efficiency. Cities with high grade and medium-high grade of economic efficiency, and those with low grade and medium-low grade of economic efficiency account for 50%, respectively, while cities with high grade and medium-high grade of environmental efficiency and green efficiency, and those with low grade and medium-low

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A170001); 河南省大学生创新创业训练计划(S202110479039); 安阳市 2020 年科技发展计划; 安阳师范学院大学生创新基金(S202110479039)

作者简介: 焦士兴(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源和水环境研究。E-mail: jiaoshixing@163.com

grade of environmental efficiency and green efficiency account for 55.6% and 44.4%, respectively. There are characteristics of spatial agglomeration for the areas with similar values of water resources efficiency in Henan Province, with an increasing trend of global spatial autocorrelation for the economic efficiency, and a decreasing trend of global spatial autocorrelation for the environmental efficiency and green efficiency. Anyang City is the only one low-low cluster area of the green efficiency, environmental efficiency, and economic efficiency; the high-high cluster areas of the economic efficiency are Pingdingshan, Xuchang, Luohe, and Zhoukou cities, those of the environmental efficiency are Pingdingshan and Xuchang cities, and those of the green efficiency are Luoyang and Xuchang cities; and there is not any low-high and high-low cluster areas for the green efficiency, environmental efficiency, and economic efficiency.

Key words: water resource efficiency; economic efficiency; environmental efficiency; green efficiency; temporal-spatial differentiation; SBM-DEA model; Henan Province

水是人类赖以生存和发展的基础性自然资源和战略性物质资源^[1]。河南省常年人均水资源仅 440 m³, 不足全国平均水平的 1/5, 属水资源严重短缺地区。随着社会经济高速发展, 河南省用水量及废水排放量不断增长, 据统计, 2018 年比 2017 年分别增加 0.8 亿 m³ 和 0.2 亿 t, 水资源供需矛盾和水环境污染问题日益凸显^[2], 因此提高用水效率成为解决水资源问题的重要途径。

国内外在测评方法、评价指标等方面开展了水资源效率相关研究。在评价方法方面, 主要有比值分析法^[3]、指标体系法^[4]、随机前沿分析法 (stochastic frontier analysis, SFA)^[5-6]、生态功能法^[7]、Leontief 二次成本函数法^[8]和数据包络分析法 (data envelopment analysis, DEA) 等^[9-10], 其中 DEA 法避免了投入产出的函数关系及人为赋权的主观性, 评价结果客观准确, 运用最为广泛; 在评价指标方面, 多采用水资源、劳动力和资本等作为投入指标, 以 GDP 为期望产出^[11], 部分学者将灰水足迹、废水排放量等作为非期望产出^[12], 用以分析水资源利用效率; 在研究尺度和领域上, 分别从国家、省域、农业、工业等方面对水资源效率进行评价^[13-16]。

综上, 国内外对水资源效率开展了大量理论和实践探索, 但从水资源社会、经济和生态效益视角开展绿色效率的研究较少^[17-18], 且基于非期望产出的市域层面研究相对薄弱。河南省作为粮食生产核心区和中原经济重点建设区, 水资源短缺问题日益突出, 因此, 明确水资源效率状况并提出相应战略对策, 对解决水资源问题具有重要现实意义。基于此, 本文以河南省 18 市为研究单元, 采用基于松弛变量的测量 (slack-based measurement, SBM)-DEA 模型研究 2005—2017 年水资源绿色效率, 并与环境效率、经济效率进行对比分析, 同时运用 ArcGIS、GeoDa 软件分析水资源效率时空特征和相关性, 以期为促进河南省水资源持续利用提供参考。

1 水资源效率研究方法

1.1 水资源效率的界定

水资源效率是水资源产出效益与水资源及相关资源投入的比值^[19], 是衡量水资源及相关资源投入与产出效益的重要标准。基于绿色发展的核心理念, 水资源绿色效率用以综合测评水资源在经济、生态和社会等产出的效益, 从而尽量减少水资源投入及非期望产出 (如水环境污染等)、增大期望产出 (如水资源产生的社会效益等)。根据孙才志等^[18]对水资源效率的界定方法, 衡量水资源经济效率是为了减少水资源及相关资源投入, 使经济产出最大化; 衡量水资源环境效率的目的是在水资源经济效率基础上, 将污水排放总量作为非期望产出, 以实现经济产出最大化、水污染最小化; 衡量水资源绿色效率的目的则是在水资源环境效率基础上, 将社会发展指数纳入期望产出, 以实现经济产出最大化、社会最和谐化、水污染最小化, 3 种类型的水资源效率均以用水总量、劳动力和固定资产投资作为投入, 但其产出有所区别。在水资源经济效率测评系统中, 期望产出指标为国民生产总值 (GDP), 应用模型为 CCR (Charnes A, Cooper W W, Rhodes E)-DEA^[16]; 在水资源环境效率测评系统中, 期望产出指标为 GDP, 非期望产出指标为污水排放总量, 应用模型为 SBM-DEA^[18]; 在水资源绿色效率测评系统中, 期望产出指标为 GDP 和社会发展指数, 非期望产出指标为污水排放总量, 应用模型为 SBM-DEA^[18]。

1.2 SBM-DEA 模型

传统的 DEA 模型仅考虑期望产出, 未将非期望产出纳入, 致使测度值与实际值之间存在误差。因此, 本文采用 Tone^[20]提出的非径向、非角度的 SBM 模型, 将投入产出的松弛变量写入函数中, 使测度值更加准确。松弛变量即为冗余量, 当评价单元存在效率损失 (即水资源效率值 $\rho \neq 1$) 时, 通过减少评价单元投入量或者增加期望产出量、减少非期望产出量, 可使 $\rho = 1$, 而增减部分即为冗余量。水资源效

率值计算公式^[16]如下:

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_{xn} / x_{k'n}^{(t')}}{1 + \frac{1}{M+L} \left(\sum_{m=1}^M S_{ym} / y_{k'm}^{(t')} + \sum_{l=1}^L S_{bl} / b_{k'l}^{(t')} \right)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K w_k^{(t)} x_{kn}^{(t)} + S_{xn} &= x_{k'n}^{(t')} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K w_k^{(t)} y_{km}^{(t)} - S_{ym} &= y_{k'm}^{(t')} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K w_k^{(t)} b_{kl}^{(t)} + S_{bl} &= b_{k'l}^{(t')} \end{aligned} \right. \quad (2) \\ & w_k^{(t)} \geq 0, S_{xn} \geq 0, S_{ym} \geq 0, S_{bl} \geq 0 \end{aligned}$$

式中: $x_{kn}^{(t)}$ 和 $x_{k'n}^{(t')}$ 分别为投入指标 n 在第 k 和 k' 个生产单元 t 和 t' 时期的值; $y_{km}^{(t)}$ 和 $y_{k'm}^{(t')}$ 分别为期望产出指标 m 在第 k 和 k' 个生产单元 t 和 t' 时期的值; $b_{kl}^{(t)}$ 和 $b_{k'l}^{(t')}$ 分别非期望产出指标 l 在第 k 和 k' 个生产单元 t 和 t' 时期的值; N 、 M 、 L 分别为投入、期望产出、非期望产出的指标数量; T 为年份数; K 为生产单元数目; S_{xn} 、 S_{bl} 分别为投入、非期望产出的冗余; S_{ym} 为期望产出的不足; $w_k^{(t)}$ 为决策单元的权重。目标函数 ρ 关于 S_{xn} 、 S_{ym} 和 S_{bl} 严格单调递减, 且 $0 < \rho \leq 1$; 当 $S_{xn} = S_{ym} = S_{bl} = 0$ 时, $\rho = 1$, 表示生产单元有效; $0 < \rho < 1$, 则表示生产单元存在效率损失, 可以通过优化投入量、期望产出及非期望产出量来改善水资源利用效率。

1.3 空间自相关分析方法

空间自相关系数是度量地理单元空间相关性的指标, 表征研究区域内集聚或者离散程度, 被测空间之间距离越近相关性越强, 距离越远相关性越弱。空间自相关系数包含全局空间自相关系数和局部空间自相关系数。

1.3.1 全局空间自相关

全局空间自相关表示某一单元在整个空间范围内对空间的依赖程度, 常用构成的莫兰指数散点图表示空间分布情况。计算公式^[18]如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J w_{ij}} \quad (3)$$

式中: I 为全局空间自相关指数; y_i 、 y_j 分别为城市 i 、 j 水资源效率观测值; \bar{y} 为城市水资源效率的平均值; J 为研究城市的数量; w_{ij} 为邻接空间权重, 若城市 i 与城市 j 相邻, 则 $w_{ij} = 1$, 反之, 则 $w_{ij} = 0$; S 为标准差。 $I \in [-1, 1]$, 当 $I > 0$ 时, 表明研究对象具有全局空间正相关; 当 $I = 0$ 时, 表明全局空间不相关,

服从随机分布; 当 $I < 0$ 时, 表明全局空间负相关。

1.3.2 局部空间自相关

局部空间自相关用以描述不同地理单元相似程度, 常用 LISA (local indicators of spatial association) 呈现区域内地理单元间的空间集聚程度和分布状况; 其空间集聚模式有 4 种类型: 高-高关联、低-低关联、高-低关联、低-高关联。公式^[21]如下:

$$I_i = \frac{y_i - \bar{y}}{S^2} \sum_{j=1}^J w_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (4)$$

式中 I_i 为城市 i 水资源效率的局部空间自相关指数。当 $I_i > 0$ 时, 表示同一类型的城市存在空间集聚; 当 $I_i = 0$ 时, 表示不存空间集聚现象; 当 $I_i < 0$ 时, 表示不同类型的城市存在空间集聚。

2 指标构建及数据来源

河南省位于华北平原的南部, 地貌东西差异明显, 总面积 16.7 万 km^2 , 占国土总量的 1.74%, 是全国小麦、玉米、棉花、油料等农产品的重要生产基地之一。河南省地跨长江、淮河、黄河、海河四大流域, 属于温带大陆性季风气候, 多年平均降水量为 767.37 mm, 多年平均水资源总量为 405 亿 m^3 , 居全国第 19 位。河南省辖 18 个市, 2018 年末总人口 10906 万人, 2018 年国内生产总值 48055.86 亿元, 居全国第 5 位, 经济发展潜力巨大。

2.1 评价指标体系构建

水资源的开发利用是多种生产要素协同作用的结果, 水资源、劳动力和资本等生产要素相结合才能带来经济产出和社会效益, 根据柯布-道格拉斯生产函数以及相关成果^[6,9-11,18], 投入指标多为劳动力、水资源量、资本存量、生活用水量, 期望产出为区域 GDP。

基于此, 考虑数据的代表性、完整性和可获得性, 选取河南省从业人员数量 (代表劳动力投入, 选用三大产业从业人员数量作为间接衡量劳动力的指标)、用水总量 (代表水资源投入, 即工农业和城乡生活环境用水量之和) 和社会固定资产投资总额 (代表资本投入) 作为投入指标, 将 GDP、社会发展指数 (分别代表经济产出和社会效益产出) 作为期望产出, 将污水排放总量 (代表用水过程中产生负效应) 作为非期望产出, 构建水资源效率评价指标体系。

2.2 社会发展指数计算方法

社会发展指数可衡量社会发展水平状况。本文选取总抚养系数、城乡收入差距比等 2 个负向指标, 万人中受高等教育人数、教育支出在财政支出中占比、城镇化率、万人拥有卫生技术人员、科技投入在

财政支出中占比等 5 个正向指标,构建社会发展指数评价体系。

由于指标之间度量单位及数量级的差别而存在不可公度性,为反映真实情况,对数据采用极差化法进行标准化处理^[11],进而计算社会发展指数。计算公式^[18]如下:

$$G_j = \frac{1}{e} \sum_{i=1}^e X_{ij} \tag{5}$$

式中: G_j 为第 j 年社会发展指数; X_{ij} 为某一地区第 j 年指标 i 标准化后的值; e 为指标数量。社会发展指数越大,社会发展水平越高,反之较差。

2.3 数据来源

从业人员数量、固定资产投资、总抚养系数、城镇化率、万人中受高等教育人数、万人拥有卫生技术人员、教育支出在财政支出中占比、科技投入在财政支出中占比、城乡收入差距比等数据来源于《河南统计年鉴》(2007—2018 年);用水总量(包括工农业和生活用水量)和污水排放量等数据来源于《河南省水资源公报》(2005—2017 年)。

3 结果与分析

3.1 河南省水资源效率的时序演化

依据水资源经济效率、环境效率和绿色效率内涵,采用相应计算模型^[16,18],基于河南省 18 市 2005—2017 年的数据,计算得出水资源效率值。

3.1.1 河南省水资源效率评价

由表 1 可见,河南省水资源经济效率从 2005 年的 0.878 降至 2017 年的 0.832,呈微小下降趋势,水资源经济效率呈下降趋势的地市包括洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、焦作、濮阳、许昌、漯河、三门峡、南阳、商丘、济源等 12 市。2012 年,河南省进入经济新常态阶段,产业结构调整导致第二、第三产业用水量增加,但对于 DEA 评价模型来说,只有投入产出比例协调一致时,其评价效率才会呈增长的趋势,因此,即使经济快速发展,仍会出现水资源经济效率不增反降的现象。河南省水资源环境效率从 2005 年的 0.389 提升至 2017 年的 0.466,且河南省 18 市水资源环境效率均呈现波动增长趋势,表明河南省加大了水资源管理和技术投入,水环境质量得到不断改善。河南省水资源绿色效率从 2005 年的 0.426 提升到 2017 年的 0.496,表明伴随着河南省社会发展、文明程度的提高,水资源绿色效率不断提升。

从河南省水资源经济、环境和绿色效率变化趋势来看,仅将 GDP 作为期望产出指标的水资源经济效率,其测评结果是下降的;当不断完善测评系统时,对于考虑非期望产出(污水排放总量)的水资源环境效率,以及不仅考虑污水排放总量,同时将社会发展指数作为期望产出指标的水资源绿色效率,测评结果均呈现良性发展趋势。因此,加强水资源管理、加大污水处理资金投入和提高社会文明程度等,

表 1 2005—2017 年河南省水资源效率

Table 1 Water resources efficiency in Henan Province from 2005 to 2017

地 市	经济效率				环境效率				绿色效率			
	2005 年	2011 年	2017 年	平均值	2005 年	2011 年	2017 年	平均值	2005 年	2011 年	2017 年	平均值
郑 州	1.000	1.000	1.000	1.000	0.481	0.560	0.692	0.578	0.507	0.639	0.701	0.615
开 封	1.000	0.983	0.926	0.970	0.481	0.420	0.692	0.531	0.507	0.472	0.701	0.560
洛 阳	0.954	0.845	0.775	0.858	0.451	0.473	0.469	0.464	0.475	0.539	0.486	0.500
平顶山	0.951	1.000	0.843	0.931	0.454	0.560	0.654	0.556	0.478	0.639	0.662	0.593
安 阳	0.782	0.912	0.811	0.835	0.323	0.478	0.351	0.384	0.339	0.543	0.374	0.419
鹤 壁	0.922	0.841	0.756	0.840	0.380	0.434	0.391	0.402	0.507	0.517	0.469	0.498
新 乡	0.679	0.740	0.874	0.764	0.279	0.369	0.404	0.351	0.294	0.423	0.378	0.365
焦 作	0.945	0.898	0.765	0.869	0.386	0.446	0.398	0.410	0.410	0.515	0.427	0.451
濮 阳	0.818	0.832	0.764	0.805	0.318	0.375	0.322	0.338	0.334	0.415	0.348	0.366
许 昌	0.909	1.000	0.855	0.921	0.424	0.560	0.480	0.488	0.446	0.639	0.512	0.532
漯 河	1.000	0.977	0.805	0.927	0.481	0.560	0.692	0.578	0.507	0.639	0.701	0.615
三门峡	0.887	0.926	0.777	0.864	0.389	0.467	0.481	0.446	0.507	0.639	0.701	0.615
南 阳	0.823	0.847	0.731	0.800	0.393	0.411	0.311	0.372	0.414	0.468	0.322	0.401
商 丘	0.779	0.839	0.800	0.806	0.344	0.374	0.318	0.345	0.362	0.426	0.338	0.375
信 阳	0.585	0.679	0.737	0.667	0.277	0.320	0.297	0.298	0.292	0.364	0.314	0.324
周 口	0.863	0.937	0.961	0.921	0.355	0.351	0.348	0.351	0.373	0.401	0.363	0.379
驻马店	0.962	0.961	0.923	0.949	0.386	0.386	0.398	0.390	0.407	0.440	0.426	0.424
济 源	0.948	0.956	0.875	0.926	0.402	0.511	0.692	0.535	0.507	0.639	0.701	0.615
平均值	0.878	0.899	0.832	0.870	0.389	0.448	0.466	0.434	0.426	0.520	0.496	0.480
标准差	0.115	0.092	0.080	0.096	0.065	0.079	0.150	0.098	0.078	0.098	0.154	0.110
变异系数	0.131	0.102	0.096	0.110	0.168	0.176	0.321	0.222	0.183	0.189	0.311	0.228

能够促使水资源综合效率不断提升。

3.1.2 河南省 18 市水资源效率差距变化趋势

从河南省水资源效率变异系数来看(表 1),经济效率变异系数由 2005 年的 0.131 减小到 2017 年的 0.096,环境效率变异系数由 2005 年的 0.168 增加到 2017 年的 0.321,绿色效率变异系数则由 2005 年的 0.183 增加到 2017 年的 0.311,表明河南省 18 市水资源经济效率差距不断缩小,而环境效率和绿色效率差距则呈增大趋势。从水资源经济、环境和绿色效率平均值来看(表 1),河南省水资源经济效率多年均值高达 0.870,而环境效率和绿色效率多年均值分别为 0.434 和 0.480。因此仅将 GDP 作为期望产出指标时,水资源经济效益较高;在此基础上,考虑非期望产出污水排放总量,即考虑污水处理的环境成本时,水资源的环境效率低于经济效率;在期望产出指标中纳入社会维度指标后,水资源绿色效率略有提高。因此水环境污染对水资源效率的提升具有抑制作用,社会发展进步、文明程度提升能优化水资源效率测评系统,对提高水资源效率有正向促进作用。

3.2 河南省水资源效率空间分异

3.2.1 河南省水资源效率等级分布

基于河南省 2005—2017 年水资源效率平均值,利用 ArcGIS 自然断裂点法,将 3 种类型的水资源效率划分为 4 个等级,如表 2 所示。自然断裂点法在进行空间聚类分级的方法,其聚类约束条件为组间方差最大、组内方差最小。

表 2 水资源效率等级划分

等级	经济效率	环境效率	绿色效率
低 级	[0.656,0.725]	[0.381,0.396]	[0.404,0.429]
中低级	(0.725,0.851]	(0.396,0.464]	(0.429,0.499]
中高级	(0.851,0.934]	(0.464,0.525]	(0.499,0.552]
高 级	(0.934,1.000]	(0.525,0.622]	(0.552,0.643]

河南省水资源效率等级的空间分布如图 1 所示。水资源经济效率与环境效率等级空间分布基本一致。图 1 表明,水资源环境效率中高、高等级的城市有 10 个(占 55.6%),分别为郑州、开封、许昌、漯河、济源、平顶山、三门峡、洛阳、驻马店和周口等市;除三门峡市外,其余 9 个城市(占 50%)也属于水资源经济效率中高、高等级的城市。水资源环境效率中低、低等级的城市有 8 个(占 44.4%),分别为信阳、南阳、商丘、焦作、新乡、濮阳、安阳和鹤壁等市;水资源经济效率中低、低等级的城市有 9 个(占 50%),与水资源环境效率同等级的城市相比,仅多了三门峡市。

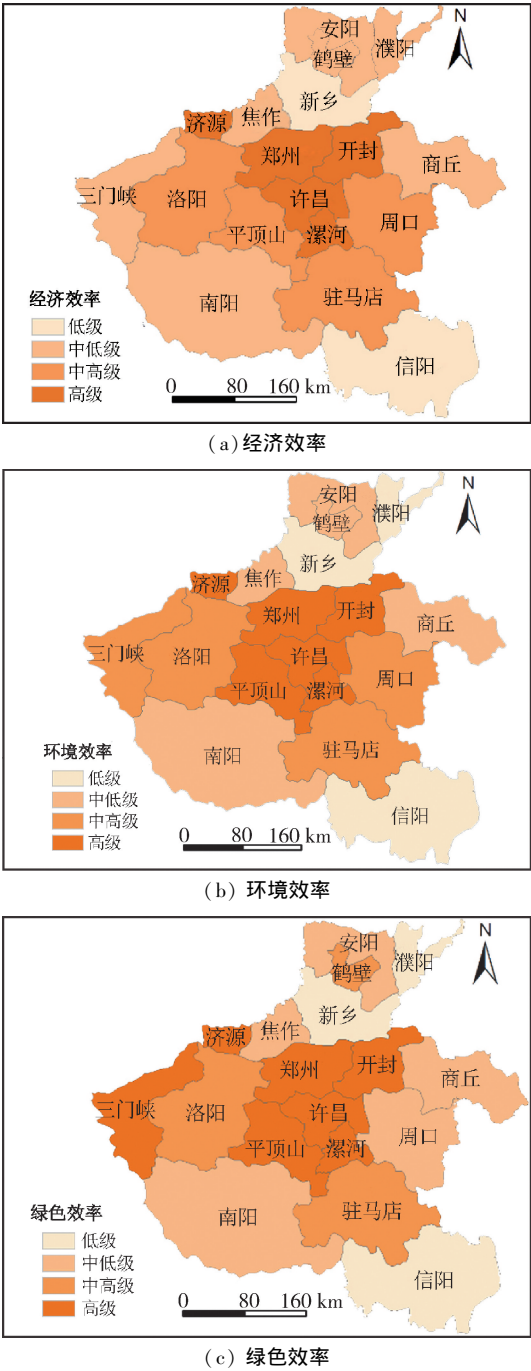


图 1 河南省水资源效率空间等级分布

Fig.1 Spatial distribution of water resources efficiency grades in Henan Province

河南省水资源绿色效率中高、高等级的城市占 55.6%。图 1 表明,水资源绿色效率高等级的城市为郑州、许昌、三门峡、漯河、济源、开封、平顶山等 7 市;中高级城市为洛阳、鹤壁、驻马店等 3 市。郑州、许昌、漯河、济源等市属于经济发展质量相对较高区域^[22],用水技术水平较高,水资源绿色效率相对较高。三门峡市社会发展指数多年平均值约为 0.680,位居河南省第三,且经济结构和效益发展良好^[22],效率值相对较高,表明优化投入产出量、减少投入冗余量能有效提高水资源绿色效率。驻马店市

是经济发展水平相对落后地区^[23],水环境污染较小且水资源量较为充足,水资源绿色效率较高,因此水资源绿色效率与经济发展水平没有必然联系^[10]。

河南省水资源绿色效率中低、低等级城市占 44.4%。图 1 表明,水资源绿色效率中低等级的城市包括安阳、焦作、南阳、周口、商丘等 5 市,低等级的城市为濮阳、新乡和信阳等 3 市。2017 年安阳市用水总量 12.274 亿 m³,其中农业灌溉用水 6.204 亿 m³,污水排放量 2.609 亿 m³,17 个地表水体监测断面中 IV~劣 V 类水质比例为 68.75%,导致水资源绿色效率偏低;焦作市年均社会发展指数约为 0.734,在河南省排名第二,但是生态环境较差^[17],绿色效率偏低,由此看来,投入与产出匹配差会在很大程度上降低评价单元的效率值。南阳、周口和商丘等市经济发展水平相对较弱,节水技术较为落后,人口数量较多且耗水量大,致使绿色效率偏低。信阳市水资源总量充足,年均总量可达 88.527 亿 m³,但是期望产出 GDP 和社会发展指数不高,导致水资源绿色效率值较低。

3.2.2 河南省水资源效率的空间相关性

基于 2005 和 2017 年河南省 18 市水资源效率值,借助 GeoDa 软件中的单变量全局及局部空间自相关功能,分析 2005—2017 年河南省水资源利用效率空间相关性。

a. 河南省水资源效率的全局空间相关性不明显。表 3 表明,2005 年和 2017 年水资源效率的空间自相关显著性检验值 *P* 均大于 0.1 (2005 年环境效率除外),说明置信度小于 90%,水资源效率空间关联性较弱;3 种类型水资源效率的全局空间自相关指数 *I* 值都大于 0,说明河南省水资源效率相似地区具有空间正相关性且存在空间集聚效应。水资源经济效率全局空间自相关性缓慢增强,2017 年全局空间自相关指数相比 2005 年略有增加,表明各市相似地区集聚效应有所增强;水资源环境效率全局空间自相关性减弱,2017 年全局空间自相关指数相比 2005 年降低了 0.145,表明各市相似地区分散程度

表 3 河南省水资源效率全局空间自相关指数

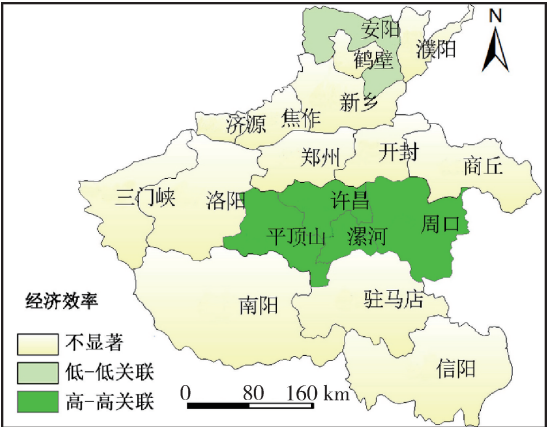
Table 3 Global spatial autocorrelation index of water resources efficiency in Henan Province

水资源效率	年份	<i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
经济效率	2005	0.053	0.882	0.185
	2017	0.063	0.618	0.249
环境效率	2005	0.247	2.071	0.031
	2017	0.102	0.128	1.097
绿色效率	2005	0.100	1.041	0.135
	2017	0.032	0.238	0.659

注:*Z* 为 *I* 的标准化统计量。

加剧,进一步说明相邻各市水环境治理能力的差异呈现扩大趋势;水资源绿色效率的全局空间自相关性减弱,2017 年全局空间自相关指数相比 2005 年降低了 0.068,说明各市相似地区的聚集程度有所下降,邻近地市的社会进步与环境治理能力差异会减弱水资源绿色效率的空间自相关性。

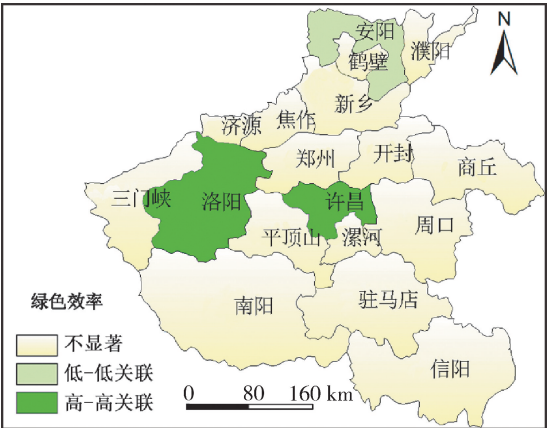
b. 河南省水资源效率局部空间自相关性较差。图 2 表明,水资源经济效率不存在空间聚类的城市为 13 个,环境效率和绿色效率不存在空间聚类的城



(a) 经济效率



(b) 环境效率



(c) 绿色效率

图 2 河南省水资源效率局部空间自相关分布
Fig.2 Local spatial autocorrelation distribution of water resources efficiency in Henan Province

市均为 15 个,3 种类型水资源效率超过 72.2% 的区域均不存在空间聚类现象,表明各邻市间水资源利用效率呈现明显的分异现象,具有相似水资源效率值的城市分布较为分散。图 2 表明,水资源经济效率高-高集聚区有 4 个,分别是平顶山、许昌、漯河和周口等市;水资源环境效率高-高集聚区有 2 个,分别是平顶山和许昌市;水资源绿色效率高-高集聚区有 2 个,分别是洛阳和许昌市,许昌市是 3 种类型水资源效率高-高集聚区。3 种类型水资源效率低-低集聚地区仅有 1 个安阳市,而低-高与高-低集聚地区数都为 0。3 种类型水资源效率高-高集聚区与低-低集聚区 P 值分别为 0.05 和 0.01,说明高-高集聚区、低-低集聚区的空间自相关分别在 1% 和 5% 的水平下显著。

4 结 论

a. 河南省不同类型水资源效率变化趋势不同,水资源经济效率呈现下降趋势,环境效率和绿色效率呈现波动上升趋势;水资源经济效率明显高于环境效率和绿色效率,且绿色效率略高于环境效率。

b. 河南省 18 市不同类型水资源效率差距变化趋势不同,其中经济效率差距呈缩小趋势,环境效率和绿色效率差距呈增大趋势;河南省水资源经济效率高和中高等级城市、低和中低等级城市分别占 50%;而水资源环境效率和绿色效率高和中高等级城市、低和中低等级城市则分别占 55.6% 和 44.4%。

c. 河南省水资源效率相似的地区存在空间集聚现象,其中经济效率全局空间自相关性呈增强趋势,环境效率和绿色效率全局空间自相关性则呈减弱趋势。河南省水资源经济效率、环境效率和绿色效率高-高集聚区分别有 4 个、2 个和 2 个,低-低集聚地区仅有 1 个安阳市,低-高与高-低集聚地区数均为 0。

d. 河南省应在经济稳定发展基础上,不断优化产业结构,促进水资源优化配置,提升社会服务及技术创新水平,确保水资源、资本、劳动力等投入最小化,期望产出 GDP 和社会发展指数最大化,非期望产出污水排放最小化,不断提高水资源经济效率。

e. 河南省应提升水资源绿色效率与水资源环境效率,以农业为重点的地区,应加强农业基础设施投入,不断提高农田节水灌溉效率;以工业为重点的地区,加强管理力度,提升污水处理和循环利用水平;经济相对发达地区,应增强节水意识,提高用水效率。

f. 河南省应加强水环境治理,增强社会公平性,同时注重调配水资源,确保水资源量充足的区域用水实现有效利用,水资源量匮乏的区域用水需求得到保障,缩小水资源环境效率、水资源绿色效率的区域差异。

参考文献:

- [1] 祁丽霞,杨承佳,王国帅. 河南省水资源与经济社会发展状况匹配关系的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(2):30-36. (QI Lixia, YANG Chengjia, WANG Guoshuai. Study on the matching relations of Henan Provincial water resources with social and economic development[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2017,38(2):30-36. (in Chinese))
- [2] 陈海涛,徐嘉豪. 基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J]. 人民珠江,2020,41(1):48-53. (CHEN Haitao, XU Jiahao. Evaluation of water resources carrying capacity in Henan Province based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Pearl River,2020,41(1):48-53. (in Chinese))
- [3] 李世祥,成金华,吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(3):215-220. (LI Shixiang, CHENG Jinhua, WU Qiaosheng. Regional difference of the efficiency of water usage in China [J]. China Population, Resources and Environment,2008,18(3):215-220. (in Chinese))
- [4] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. 水资源保护,2021,37(1):61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):61-68. (in Chinese))
- [5] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T, et al. Water efficiency of agricultural production in china: regional comparison from 1999 to 2002[J]. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology,2004,3(3/4):231-251.
- [6] 陈关聚,白永秀. 基于随机前沿的区域工业全要素水资源效率研究[J]. 资源科学,2013,35(8):1593-1600. (CHEN Guanju, BAI Yongxiu. Regional differences in total-factor industrial water efficiency based on stochastic frontiers approach[J]. Resources Science,2013,35(8):1593-1600. (in Chinese))
- [7] 李斌,陈午,许新宜,等. 基于生态功能的水资源三级区水资源开发利用效率研究[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1918-1925. (LI Bin, CHEN Wu, XU Xinyi, et al. Research on the utilization ratio of the third class water resources regions based on ecological function[J]. Journal

- of Natural Resources, 2016, 31 (11): 1918-1925. (in Chinese))
- [8] TORRES M, MORRISON P C J. Driving forces for consolidation or fragmentation of the US water utility industry: a cost function approach with endogenous output [J]. Journal of Urban Economics, 2006, 59 (1): 104-120.
- [9] 刘晓君, 闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (6): 32-38. (LIU Xiaojun, YAN Lizhen. Research on water resources utilization efficiency and factors in western China based on data envelopment model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (6): 32-38. (in Chinese))
- [10] 朱达, 唐亮, 谢启伟, 等. 基于数据包络分析方法的城市水资源利用效率研究 [J]. 生态学报, 2020, 40 (6): 1956-1966. (ZHU Da, TANG Liang, XIE Qiwei, et al. Efficiency assessment of water resource utilization cities based on data envelopment analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (6): 1956-1966. (in Chinese))
- [11] 孙才志, 谢巍, 姜楠, 等. 我国水资源利用相对效率的时空分异与影响因素 [J]. 经济地理, 2010, 30 (11): 1878-1884. (SUN Caizhi, XIE Wei, JIANG Nan, et al. The spatio-temporal difference of water resource utilization relative efficiency and influencing factors in China [J]. Economic Geography, 2010, 30 (11): 1878-1884. (in Chinese))
- [12] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度 [J]. 地理学报, 2014, 69 (1): 121-133. (ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69 (1): 121-133. (in Chinese))
- [13] 邓光耀. 基于污水排放量分配的中国水资源利用效率测算 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 28-34. (DENG Guangyao. Estimation of water use efficiency in China based on sewage discharge distribution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 28-34. (in Chinese))
- [14] 孙才志, 马奇飞. 中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究 [J]. 地理研究, 2020, 39 (1): 53-63. (SUN Caizhi, MA Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China [J]. Geographical Research, 2020, 39 (1): 53-63. (in Chinese))
- [15] 罗芳, 田苗, 孙彩虹, 等. 长江经济带农业水资源利用效率时空差异分析 [J]. 人民长江, 2020, 51 (2): 1-7. (LUO Fang, TIAN Miao, SUN Caihong, et al. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of agricultural water resource use efficiency in Yangtze River Economic Belt [J]. Yangtze River, 2020, 51 (2): 1-7. (in Chinese))
- [16] 章恒全, 黄元龙, 秦腾, 等. 考虑非期望产出的工业水资源绿色效率研究: 基于 SBM-Tobit 面板模型 [J]. 水利经济, 2019, 37 (5): 35-40. (ZHANG Hengquan, HUANG Yuanlong, QIN Teng, et al. Research on the green efficiency of industrial water resources considering undesired output: based on the SBM-Tobit panel model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37 (5): 35-40. (in Chinese))
- [17] 焦士兴, 张崇崇, 王安周, 等. 河南省绿色发展水平综合测度与时空演化研究 [J]. 安全与环境学报, 2019, 19 (6): 2192-2200. (JIAO Shixing, ZHANG Chongchong, WANG Anzhou, et al. On comprehensive measurement of green environment development level and spatial temporal evolution in Henan [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19 (6): 2192-2200. (in Chinese))
- [18] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32 (12): 1999-2011. (SUN Caizhi, JIANG Kun, ZHAO Liangshi. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (12): 1999-2011. (in Chinese))
- [19] 杨高升, 谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究: 基于 SE-SBM 与 ML 指数法 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (2): 349-358. (YANG Gaosheng, XIE Qiuhaohao. Study on spatial and temporal differentiation of green water resources efficiency in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 (2): 349-358. (in Chinese))
- [20] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143 (1): 32-41.
- [21] 张定, 曹卫东, 范娇娇, 等. 长三角城市物流发展效率的时空格局演化特征与机制 [J]. 经济地理, 2014, 34 (8): 103-110. (ZHANG Ding, CAO Weidong, FAN Jiaojiao, et al. The spatio-temporal evolution characteristics and mechanism of Yangtze River Delta city logistics development efficiency [J]. Economic Geography, 2014, 34 (8): 103-110. (in Chinese))
- [22] 孟青青. 河南省经济发展质量综合评价 [D]. 郑州: 河南财经政法大学, 2017.
- [23] 陈璐, 李成标. 河南省区域经济发展水平评价分析 [J]. 地域研究与开发, 2015, 34 (4): 18-22. (CHEN Lu, LI Chengbiao. Evaluation of the development level of regional economy in Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2015, 34 (4): 18-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-12-30 编辑: 施业)