

李卓璇, 王小军, 陈凤, 等. 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调时空演变及影响因素研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 137-150. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.010

LI Zhuoxuan, WANG Xiaojun, CHEN Feng, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coupling coordination among water resources-economic society-ecological environment system in Jiangsu Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 137-150. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.010

江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调时空演变及影响因素研究

李卓璇^{1,2}, 王小军^{1,3}, 陈凤⁴, 徐斌², 金志丰⁵, 邹睿¹

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 5. 江苏省国土资源研究中心, 江苏 南京 210017)

摘要: 【目的】近年来, 江苏省在经济社会快速发展的同时, 水资源约束趋紧与生态环境压力不断加大, 区域发展面临资源利用与环境保护双重挑战。为充分认识江苏省水资源、经济社会与生态环境系统的协调发展状况, 【方法】构建了针对江苏省地域特征的水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调评价指标体系, 并基于信息敏感性方法对指标体系进行优化, 引入耦合协调度模型与灰色关联分析法, 构建了系统的耦合协调研究框架。最后基于该框架测算了自最严格水资源管理制度实施以来(2012—2023年)江苏省水资源-经济社会-生态环境系统的耦合协调水平及其主要影响因子。【结果】结果显示: 基于信息敏感性方法将28个初选指标筛选为21个指标, 保障了指标体系科学性和区域适宜性; 江苏省2012—2023年水资源-经济社会-生态环境系统综合评价指数从0.23提升至0.72; 江苏省耦合协调水平呈现稳定增长态势, 耦合协调类型由勉强协调上升到高级协调, 且呈“南高北低”的空间分布特征; 全年供水总量、一般公共预算收入和城市污水处理率分别是各子系统中影响耦合协调度的最主要影响因子。【结论】结果表明: 2012—2023年江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度逐渐提升, 系统间的耦合性、协调性逐渐增强, 但部分区域仍具有较大发展潜力。研究结果揭示了江苏省水资源-经济社会-生态环境系统的时空演变规律与驱动机制, 可为区域水资源精细化治理与绿色可持续发展提供参考。

关键词: 水资源-经济社会-生态环境; 耦合协调; 灰色关联分析; 江苏省; 时空演变; 可持续发展; 水资源约束; 信息敏感性方法

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0137-14



与作者互动
听语音 聊科研

收稿日期: 2025-08-16; 修回日期: 2025-09-28; 录用日期: 2025-09-28; 网络出版日期: 2025-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52121006); 水利标准制修订项目(126302001000180011, 126302001000210005); 自然资源部国土空间规划体系重大问题研究项目(20210103); 江苏省国土资源研究中心(智库)开放合作项目(ZK202106, ZK22003); 江苏省自然资源科技项目(2021003, 2022022); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(JNHB-068); 南京水利科学研究院研究生学位论文基金(Yy525004)

作者简介: 李卓璇(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源规划及管理研究。E-mail: lizhuoxuan_lzx@163.com

通信作者: 王小军(1983—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源规划及管理研究。E-mail: xjwang@nhri.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal evolution and influencing factors of coupling coordination among water resources-economic society-ecological environment system in Jiangsu Province

LI Zhuoxuan^{1,2}, WANG Xiaojun^{1,3}, CHEN Feng⁴, XU Bin², JIN Zhifeng⁵, ZOU Rui¹

(1. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 4. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, Jiangsu, China; 5. Jiangsu Research Center of Land and Resources, Nanjing 210017, Jiangsu, China)

Abstract [Objective] In recent years, alongside rapid economic and social development in Jiangsu Province, water resource constraints have tightened and ecological environment pressures has continued to intensify, posing dual challenges of resource utilization and environmental protection to regional development. To comprehensively understand the coordinated development status of the water resources, economic society, and ecological environment systems in Jiangsu Province, the coupling coordination relationship among the subsystems is examined. [Methods] An evaluation index system for the coupling coordination degree (CCD) of the water resources-economic society-ecological environment (WR-ES-EE) system was constructed based on the regional characteristics of Jiangsu Province. The index system was optimized using the information sensitivity method, and a systematic research framework for coupling coordination was established by introducing the CCD model and grey relational analysis method. Based on this framework, the CCD of the WR-ES-EE system in Jiangsu Province and its main influencing factors were measured for the period from 2012 to 2023, following the implementation of the most stringent water resources management system. [Results] The findings indicated that based on the information sensitivity method, the 28 initially selected indicators were reduced to 21, ensuring the scientific soundness and regional suitability of the index system. The comprehensive evaluation index of the WR-ES-EE system in Jiangsu Province increased from 0.23 in 2012 to 0.72 in 2023. The CCD exhibited a stable upward trend, with the coordination type rising from barely coordinated to highly coordinated, and showed a spatial distribution pattern of "high in the south and low in the north". The total annual water supply, general public budget revenue, and urban sewage treatment rate were identified as the most dominant factors influencing the CCD of each subsystem. [Conclusion] The result show that from 2012 to 2023, the CCD of the WR-ES-EE system in Jiangsu Province gradually increased, the coupling and coordination among systems were progressively enhanced, but some areas still exhibited considerable development potential. The result reveal the spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of the WR-ES-EE system in Jiangsu Province, and provide a reference for refined regional water resources management and green sustainable development.

Keywords: water resources-economic society-ecological environment system; coupling coordination; grey relational analysis; Jiangsu Province; spatiotemporal evolution; sustainable development; water resource constraints; information sensitivity methods

0 引言

水资源不仅是支撑经济社会发展的重要基础性资源,还兼具显著的生态环境属性。水资源维系着经济社会和生态环境共同发展,对经济社会发展起主要制约作用^[1]。同时生态环境的变化会引起水资源在量和质上的改变,影响经济社会的可持续发展^[2],单一维度的研究往往难以全面揭示系统间的复杂关系。在此背景下,深入探析水资源、经济社会和生态环境系统间相互联系、相互作用的耦合协调演化特征对于江苏省高质量发展具有理论价值与现实意义。

为分析和评估多个系统间的协调性,国内外学者已将耦合协调度模型用于定量评估多系统间的关系^[3]。WANG等^[4]针对山东省2006—2017年的统计

数据,采取耦合协调度模型探讨了城市化、经济和环境复合系统的内在关系;DONG等^[5]分析了中国10个资源型地区能源、经济及环境系统的耦合协调时空变化特征;HE等^[6]分析了2011—2020年中国水资源、经济社会以及生态环境系统的耦合协调度,并划分为政策导向型、资源问题约束型、社会经济主导型和特殊区位控制型四类城市;PIRES等^[7]根据社会、经济、环境和制度标准评估了与水相关的指标,发现综合多尺度指标最适合衡量水资源可持续的复杂性。针对耦合协调度模型本身的研究,赵立杰等^[8]采用熵权-层次分析法构建云耦合协调模型,分析山东省水资源关联系统协调性及动态变化;LI等^[9]为克服函数值过于集中而导致协调效应减弱的局限,建立了基于耦合度分布函数的耦合协调模型。可见,耦合协调理论已广泛应用于水资源、经济、社会与生态环境

系统的相关研究, 耦合协调度模型在不断优化和改进中趋于成熟。然而当前已有的研究仅侧重于区域耦合协调度计算和描述, 缺乏对其系统性的深入分析, 尤其是影响因子的识别与揭示, 亟需构建系统性的耦合协调及分析研究框架。

长江流域是我国最具综合性和战略性的经济带之一。近年来, 随着国家提出“共抓大保护、不搞大开发”的方针, 生态优先与绿色发展成为主旋律, 长江流域绿色可持续发展日益受到重视, 《长江保护法》作为首部流域专门立法正式施行^[10]。围绕流域水安全与生态安全等议题, XIA 等^[11]在剖析长江流域生态与水资源所面临的突出挑战后, 从经济社会系统与生态水文过程的作用关系、水资源管理模式以及水生态治理等角度, 构建面向流域可持续发展的系统模拟框架。在产业发展方面, 王小军等^[12]聚焦长江干流化工园区的水资源利用与环境保护问题, 提出了包括落实最严格水资源管理制度、推动水资源开发与产业协同机制建设等多项对策。作为长江经济带的重要组成部分, 江苏在国家长江大保护战略中地位突出, 其水资源利用格局、生态环境质量与经济社会发展之间的耦合协调水平, 直接关系到区域绿色可持续发展的成效。为此, WANG 等^[13]在评估江苏省主要城市生态效率的基础上, 通过耦合模型分析了经济增长与生态效率相互关系, 结果表明江苏省应调整工业结构以提高生态效率; 贾晴雯等^[14]针对 2015—2019 年江苏省的社会经济和水生态环境指标, 通过熵值法赋权并结合耦合协调度模型, 对区域社会经济发展和水生态环境状况进行了整体评价; 汪红莉等^[15]通过构建经济、生态环境间的动态耦合模型, 评估了 1995—2007 年江苏省经济-生态间的协调状况; 郭利丹等^[16]基于生态足迹理论, 分析了 2008—2017 年江苏省的水资源生态足迹、水资源生态承载力和生态盈亏状况。然而, 以上研究均未针对江苏省的地域特点构建水资源、经济社会、生态环境三大子系统耦合协调评价指标体系, 同时指标体系构建多依赖专家经验判断或简单相关性分析, 指标间无法体现区域特征或具有重复和冗杂, 进而影响典型区域耦合协调评价结果的精度与科学性。

针对已有的研究现状和不足, 本研究结合江苏省地域特征, 构建适用于该区域的水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度评价指标体系, 并引入信息敏感性方法对初选指标进行优化, 以保证体系的科学性。在此基础上, 综合采用 CRITIC-熵权组合赋权、耦合协调度模型与灰色关联分析等方法, 构建系统化

的耦合协调研究框架。对我国最严格水资源管理制度实施以来(2012—2023 年)江苏省及其 13 个地级市的水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调水平及其主要影响因子进行了系统分析, 旨在为江苏省水资源利用效率提升、绿色可持续发展建设和生态环境保护提供重要的科学依据与决策参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

江苏省地跨北纬 30°45′—35°08′, 东经 116°21′—121°56′, 总面积 10.72×10⁴ km², 下辖 13 个设区市。其地势平坦, 平均海拔在 0~50 m 之间, 地貌主要由平原(86.90%)、山地(1.56%)和丘陵(11.54%)组成(见图 1)。江苏省属于典型的季风性气候, 年平均降水量在 704~1 250 mm 之间, 境内水资源条件优越^[13-16], 水域面积达 1.73×10⁴ km², 多年平均水资源量为 321.60 亿 m³。近年来江苏省经济发展迅速, 根据《江苏统计年鉴 2024》, 截至 2023 年末, 江苏省常住人口为 8 526 万人, 地区生产总值达到 12.82 万亿元。

1.2 研究方法

研究框架如图 2 所示。首先, 构建水资源、经济社会、生态环境系统的耦合协调度评价指标体系, 并通过信息敏感性方法对初选指标进行筛选与优化。其次, 采用基于博弈论的 CRITIC 与熵权的组合赋权法确定指标权重。最后, 综合运用耦合协调度模型与灰色关联分析, 形成江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调研究框架。

1.2.1 水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度评价指标构建

为了全面衡量江苏省水资源-经济社会-生态环境系统的耦合协调水平, 本研究在构建指标体系时兼顾科学合理性、系统完备性与数据可获取性。在总结前人研究^[16-28]的基础上, 结合区域实际条件选取了 28 个评价指标(见表 1)。选取数据均来源于《江苏统计年鉴(2013—2024)》(<https://tj.jiangsu.gov.cn/col/col91733/index.html>)、《江苏省水资源公报(2012—2023)》(<https://jswater.jiangsu.gov.cn/col/col84437/index.html>)、《江苏省生态环境公报(2012—2023)》(<https://sthjt.jiangsu.gov.cn/col/col83805/>)。为描述地理分布, 本研究将江苏省由北向南划分为苏北(盐城、连云港、淮安、宿迁、徐州)、苏中(南通、扬州、泰州)和苏南(南京、镇江、无锡、常州、苏州)。

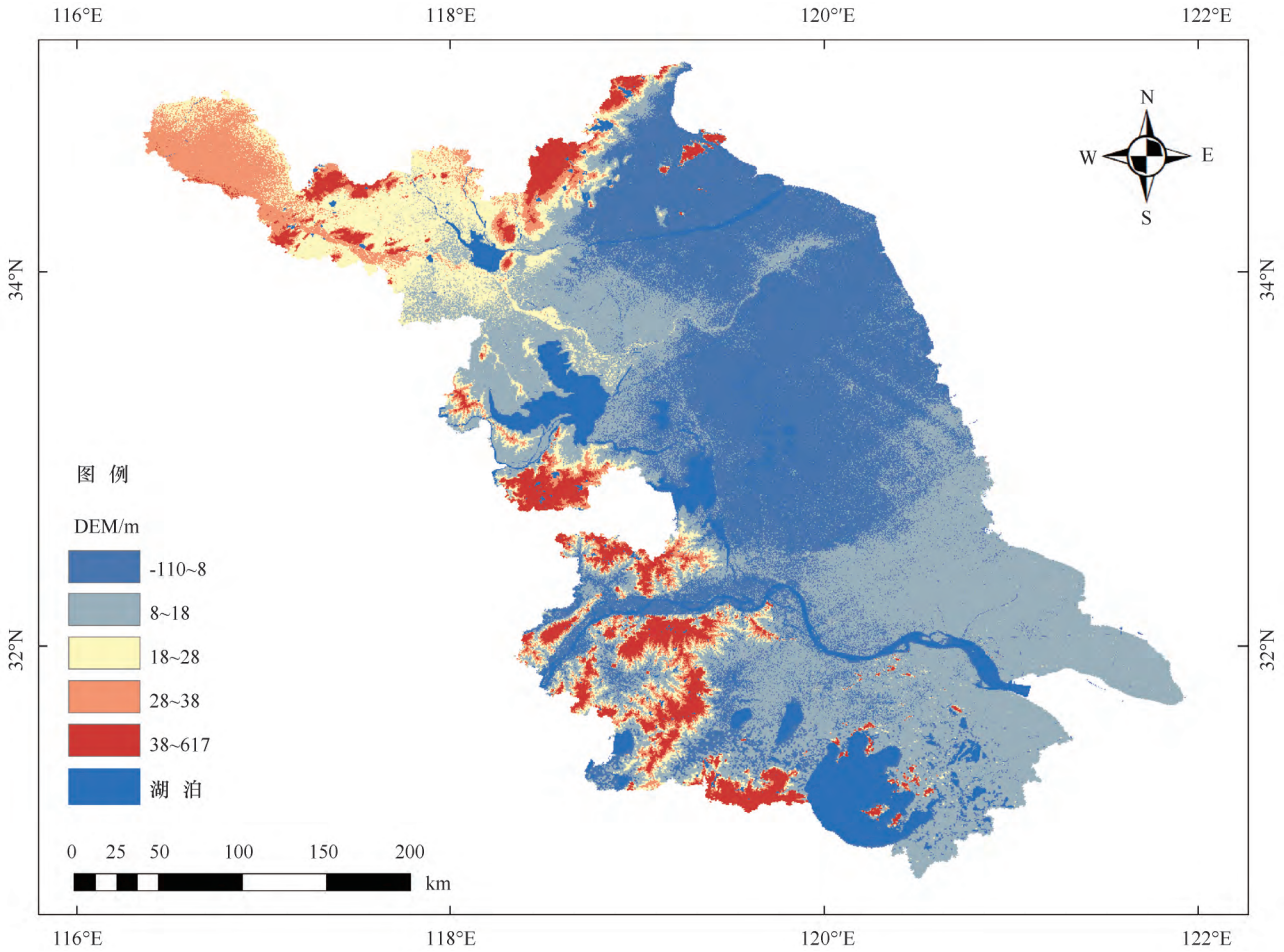


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2.2 指标体系优化

一般地, 信息敏感性指单个指标对指标体系所包含信息的影响程度, 通过结合主成分分析和偏导数反映某指标对原始指标集信息影响程度的大小^[29], 可使保留的指标对原始指标集信息影响显著且指标集间信息重叠程度较低^[30]。前 p 个主成分的累计方差贡献率为 Ω_p , 若 Ω_p 大于 85% 则表明这 p 个主成分指标能够完全反映原始指标集^[31]。其主要计算公式为

$$|X^T X - \lambda_j I| = 0 \quad (1)$$

$$\Omega_p = \sum_{j=1}^p \omega_j = \sum_{j=1}^p \frac{\lambda_j}{k} > 85\% \quad (2)$$

式中, X 为 Z-Score 标准化后的指标矩阵; k 为指标数量; λ_j 为 $X^T X$ 矩阵的特征值; ω_i 为主成分方差贡献率。

信息敏感性 β_j 计算公式为

$$\beta_j = \sum_{i=1}^p \omega_i |\partial Z_i / \partial X_j| = \sum_{i=1}^p \beta_{ij} \quad (3)$$

$$\beta_{ij} = \omega_i |\partial Z_i / \partial X_j| = \omega_i |e_{ij}| \quad (4)$$

$$e_{ij} = \alpha_{ij} / \sqrt{\lambda_i} \quad (5)$$

式中, α_{ij} 为第 j 个指标在第 i 个主成分上的负载系数; e_{ij} 为特征值 λ_i 对应的特征向量的分量; β_j 为第 j 个指标的敏感性, 值越大表明该指标越重要。

对全部指标的敏感性 β_j 排序, 按照顺序逐项累加, 并计算排名靠前的 m 个指标的 β_j 之和在全部指标的 β_j 之和中的占比 τ_m ; 当累计比例超过 80% 时, 取对应的 m 个指标作为最优保留集, 从而保证评价指标体系的精简性与有效性。其公式为

$$\tau_m = \sum_{j=1}^m \beta_j / \sum_{j=1}^k \beta_j \quad (6)$$

1.2.3 基于博弈论的 CRITIC-熵权组合赋权法

为解决单一计算权重方法的局限性, 提高评价结果准确率, 本文参考相关学者研究结果^[32-36], 采用 CRITIC-熵权组合赋权法计算各项评价指标的权重, 并基于博弈论对两种指标权重进行组合。

(1) 熵权法计算过程如下。

正指标为

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (7)$$

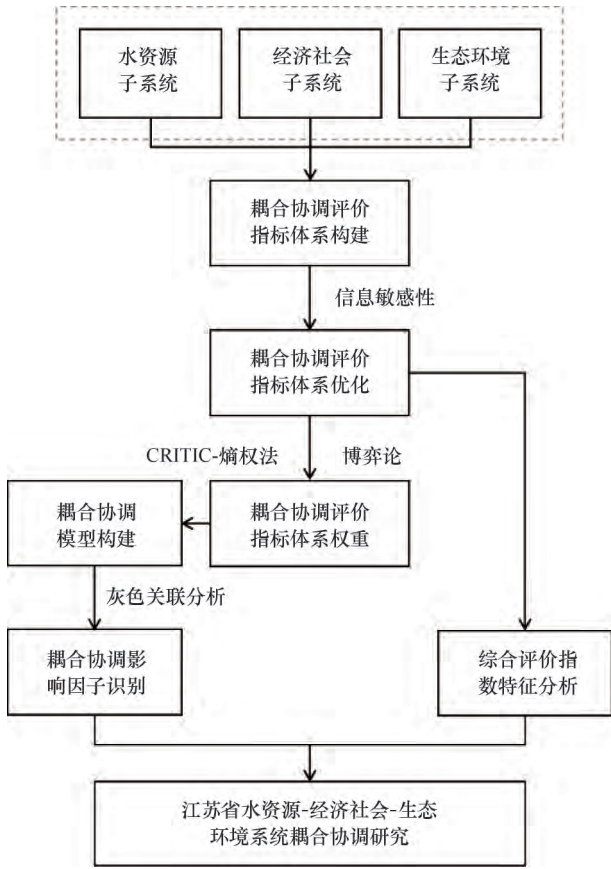


图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

逆指标为

$$X'_{ij} = \frac{X_{j\max} - X_{ij}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (9)$$

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \quad (10)$$

$$\theta_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum_{j=1}^k E_j} \quad (11)$$

式中, X_{ij} 为 i 市第 j 个指标值; $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值; P_{ij} 为第 j 个指标所占比重; E_j 为第 j 个指标熵值; θ_j 为各指标的熵权; n 为地级市个数; k 为子系统中指标个数。

(2) CRITIC 法计算公式为

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (12)$$

$$C_j = S_j \times \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) = S_j \times R_j \quad (13)$$

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^k C_j} \quad (14)$$

式中, r_{ij} 为评价指标 i 和 j 之间的相关系数; R_j 为指标冲突性系数; C_j 为第 j 个指标信息量; S_j 为第 j 个评价指标的标准差; W_j 为各指标权重。

(3) 基于博弈论计算各项指标组合权重 W^*

$$W^* = \mu_1 \theta_j + \mu_2 W_j \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} W^* & W^{*T} \\ W_j & W_j^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_j \theta_j^T \\ W_j W_j^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{a}{a+b} \\ \mu_2 = \frac{b}{a+b} \end{cases} \quad (17)$$

式中, μ_1 和 μ_2 分别表示熵权法和 CRITIC 法的权重系数, 且 $\mu_1 + \mu_2 = 1$; W^* 为基于博弈论确定的综合权重。

1.2.4 综合评价指数

水资源、经济社会和生态环境子系统的综合评价指数可通过以下方法计算, 其计算公式为

$$\begin{cases} f(x) = \sum_{i=1}^m X'_{ij} W_f^* \\ g(y) = \sum_{i=1}^n X'_{ij} W_g^* \\ h(z) = \sum_{i=1}^p X'_{ij} W_h^* \end{cases} \quad (18)$$

式中 $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$ 分别为三系统的综合评价指数; W_f^* 、 W_g^* 、 W_h^* 分别为三系统的权重占比; m 、 n 、 p 分别为各子系统中的评价指标的个数。

1.2.5 耦合协调度模型

水资源、经济社会和生态环境子系统间的耦合协调度计算公式为

$$C = 3 \times \sqrt[3]{\frac{f(x) \times g(y) \times h(z)}{[f(x) + g(y) + h(z)]^3}} \quad (19)$$

$$T = \alpha \times f(x) + \beta \times g(y) + \gamma \times h(z) \quad (20)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (21)$$

式中, C 为耦合度; α 、 β 、 γ 分别为待定系数, $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$; T 为三系统综合评价指数; D 为耦合协调度。

参考相关学者的研究结果^[17-21], 可根据耦合协调度的取值范围将系统发展状况划分为三个大类共九个等级, 如表 2 所列。

1.2.6 灰色关联分析法

灰色关联分析法是寻求系统要素之间重要关系的

表 1 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system for coupling coordination degree of water resources-economic society-ecological environment system in Jiangsu Province

| 系统层 | 指标层 | 指标含义 | 序号 | 指标属性 |
|---------|----------------------------------|--|----------|------|
| 水资源子系统 | 降水量/mm | 一定时间内从天空降落到地面上的水未经蒸发、渗透、流失在水平面上积聚的深度 | X_1 | + |
| | 全年供水总量/ 10^4 t | 指报告期供水企业(单位)供出的全部水量(包括有效供水量及损失水量) | X_2 | + |
| | 地表水可利用量/ 10^8 m ³ | 天然河川径流量 | X_3 | + |
| | 地下水可利用量/ 10^8 m ³ | 降水和地表入渗地下水的补给量 | X_4 | + |
| | 产水系数 | 水资源总量/降水量 | X_5 | + |
| | 城市人均日生活用水量/m ³ | 城市日生活用水量/城市总人口 | X_6 | + |
| | 用水总量/ 10^8 m ³ | 各类用户取用的毛用水量 | X_7 | - |
| | 集中式饮用水水源地水质达标率/% | 在用、备用和规划水源地水样所有检测水质指标符合要求的样本数占总样本数的比例 | X_8 | + |
| | 万元 GDP 用水量/m ³ | 用水总量/GDP | X_9 | - |
| | 城市人口用水普及率/% | 城市用水人口数/城市人口总数 | X_{10} | + |
| 经济社会子系统 | 规模以上工业企业利润总额/ 10^8 元 | 年主营业务收入在 2000 万元以上的工业企业的利润总额 | X_{11} | + |
| | 居民恩格尔系数/% | 食品支出总额占个人消费支出总额的比重 | X_{12} | - |
| | 一般公共预算收入/ 10^8 元 | 国家财政参与社会产品分配所取得的收入 | X_{13} | + |
| | 人均 GDP/元 | GDP/总人口 | X_{14} | + |
| | GDP 增长率/% | (本期 GDP-上期 GDP)/上期 GDP | X_{15} | + |
| | 人口密度/人·km ⁻² | 人口总数/面积 | X_{16} | + |
| | 城镇化率/% | 区域常住人口与总人口数的比例 | X_{17} | + |
| | 第一产业产值占比/% | 第一产业产值占 GDP 的比重 | X_{18} | + |
| | 第二产业产值占比/% | 第二产业产值占 GDP 的比重 | X_{19} | + |
| | 第三产业产值占比/% | 第三产业产值占 GDP 的比重 | X_{20} | + |
| 生态环境子系统 | 无害化处理厂日处理能力/t | 无害化处理厂处理的设计能力 | X_{21} | + |
| | 建成区绿化覆盖面积/ 10^4 m ² | 城市建成区内的植被覆盖面积 | X_{22} | + |
| | 城市污水日处理能力/ 10^4 t | 污水处理厂(或处理装置)每昼夜处理污水量的设计能力 | X_{23} | + |
| | 城市污水处理率/% | 经过污水处理厂处理的城市污水量/污水排放总量 | X_{24} | + |
| | 城市人均公园绿地面积/m ² | 城市公园绿地面积/城市人口总数 | X_{25} | + |
| | 建成区排水管道密度/km·km ⁻² | 建成区所有排水总管、干管、支管、检查井及连接井进出口等长度之和/建成区面积 | X_{26} | + |
| | 生活垃圾年处理量/ 10^4 t | 生活垃圾产量中能够被清运至垃圾消纳场所或转运场所的量 | X_{27} | + |
| | 生态环境用水量/m ³ | 河道外生态环境用水,为保护、修复或建设给定区域的生态与环境需要人为供给的水量 | X_{28} | + |

表 2 耦合协调度类型及等级

Table 2 Types and classification grades of coupling coordination degree

| 类型 | 耦合协调度 | 协调等级 |
|--------|---------|------|
| 失调衰退类型 | 0.1~0.2 | 严重失调 |
| | 0.2~0.3 | 中度失调 |
| | 0.3~0.4 | 轻度失调 |
| 过度发展类型 | 0.4~0.5 | 濒临失调 |
| | 0.5~0.6 | 勉强协调 |
| 协调发展类型 | 0.6~0.7 | 初级协调 |
| | 0.7~0.8 | 中级协调 |
| | 0.8~0.9 | 高级协调 |
| | 0.9~1.0 | 优质协调 |

方法,通过分析多要素时间变化曲线相似性来定量分析要素间的紧密性^[37-39]。要素时间变化曲线相似程度被定义为关联度,要素关联度越高表明要素的变化过程存在一致性和同步性,因此灰色关联分析法经常

被用于因果分析、驱动因素等研究中。本研究基于 MATLAB 使用灰色关联分析法量化分析江苏省水资源、经济社会、生态环境系统内各因素的相互作用及影响程度。

2 结果与分析

2.1 基于信息敏感性的评价指标体系优化

主成分特征值和贡献率如表 3 所列。严格按照特征值大于 1 的原则,筛选出 5 种主成分,累计方差贡献率达到 89.68%,满足主成分累计方差贡献率大于 85%的标准。指标信息敏感性 β_j 及累计信息含量 τ_m 如图 3 所示。敏感性排名前三的指标为全年供水总量 X_2 (17.21)、建成区绿化覆盖面积 X_{22} (17.19) 和城市污水日处理能力 X_{23} (17.05),可见原始指标集受水资源子系统及生态环境子系统指标影响较为明显。

表3 主成分贡献率

Table 3 Principal component contribution rates

| 成分 | 初始特征值 | | | 提取载荷平方和 | | |
|----|--------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | 总计 | 方差百分比/% | 累积/% | 总计 | 方差百分比/% | 累积/% |
| 1 | 12.138 | 50.573 | 50.573 | 12.138 | 50.573 | 50.573 |
| 2 | 3.769 | 15.704 | 66.278 | 3.769 | 15.704 | 66.278 |
| 3 | 2.602 | 10.842 | 77.120 | 2.602 | 10.842 | 77.120 |
| 4 | 1.772 | 7.383 | 84.503 | 1.772 | 7.383 | 84.503 |
| 5 | 1.241 | 5.173 | 89.676 | 1.241 | 5.173 | 89.676 |

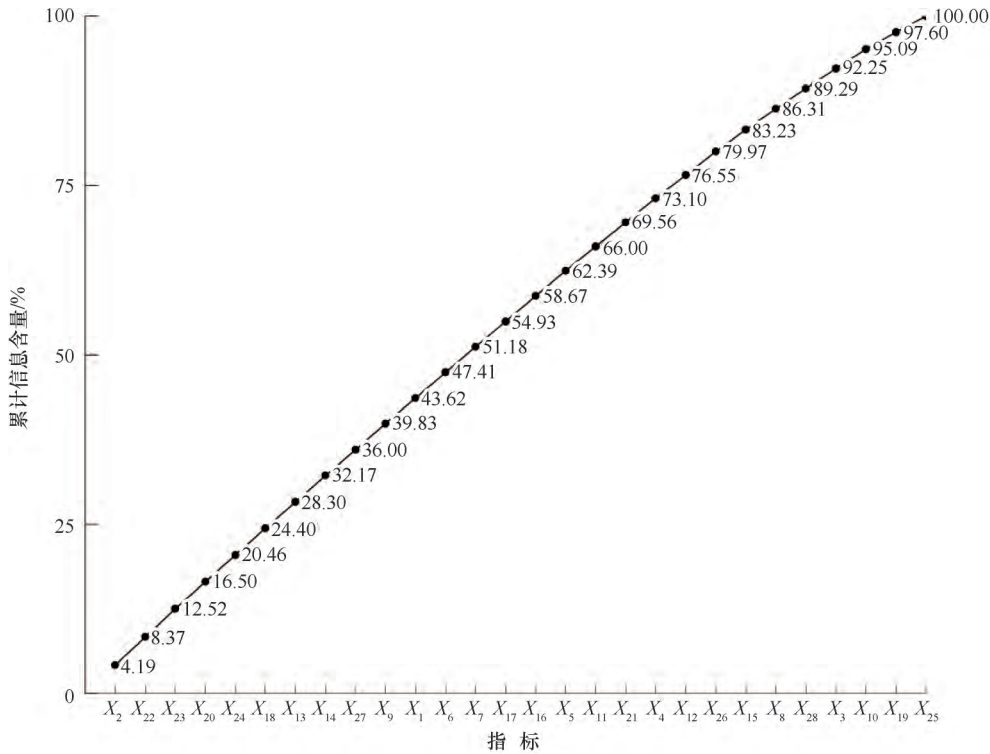


图3 指标累计信息含量

Fig. 3 Cumulative information content of indicators

在完成敏感性排序的基础上,进一步分析各项指标累计信息占比(见图3)。结果显示,指标 X_{26} (79.97%) 低于累计信息含量 80% 的参考临界值。因此,本研究选择前 21 个指标,形成科学合理的指标体系。

基于式(7)一式(17)可得出各指标权重。各系统中,经济社会系统的权重最大,为 0.37,其次是水资源和生态环境系统,分别为 0.34 和 0.28。CRITIC 法计算的权重分布在 0.03~0.14。相比而言,熵权法计算的权重分布更均衡,均小于 0.10。基于博弈论的综合权重分布在 0.03~0.10。

2.2 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统综合评价指数特征

2012—2023 年江苏省水资源-经济社会-生态环境系统综合评价指数时间变化如图 4 所示。其中,水

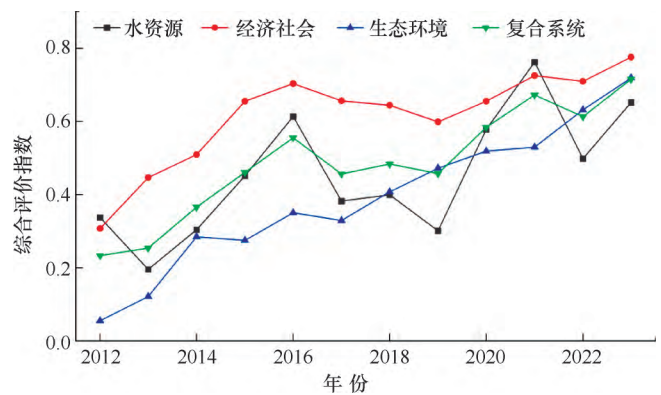


图4 系统综合评价指数变化趋势

Fig. 4 Trend of comprehensive evaluation index of system

资源子系统变化幅度显著且总体呈上升趋势,由 2012 年的 0.34 提升至 2023 年的 0.65,并于 2021 年

达到峰值 0.76, 年均增长率为 14.55%, 仍有一定提升空间。经济社会子系统综合评价指数在研究前期稳定增长, 2016 年后呈现先降后升的趋势, 年均增长率为 9.73%, 尤其是 2021 年该指数突破 0.73 后持续保持高位。生态环境子系统综合评价指数在前期快速增长, 之后虽有小幅波动, 但年均增长率高达 32.46%。随着各子系统间耦合性、协调性的逐年加强, 复合系统综合评价指数呈“增加(2012—2016 年)—波动(2016—2019 年)—增加(2019—2023 年)”的增长趋势, 年均增长率为 12.07%。

表 4 指标权重

Table 4 Indicator weights

| 子系统 | 指标 | 权重 | | | |
|-------------------|-------------------|-----------|---------|---------|---------|
| | | CRITIC 权重 | 熵权法 | 综合权重 | |
| 水资源 (0.342 4) | X_1 | 0.047 7 | 0.026 5 | 0.038 5 | |
| | X_2 | 0.031 9 | 0.083 2 | 0.053 9 | |
| | X_4 | 0.088 7 | 0.045 1 | 0.069 8 | |
| | X_5 | 0.057 7 | 0.025 2 | 0.043 6 | |
| | X_6 | 0.045 2 | 0.036 5 | 0.041 4 | |
| | X_7 | 0.056 2 | 0.052 8 | 0.054 7 | |
| | X_9 | 0.046 2 | 0.032 9 | 0.040 4 | |
| | 经济社会 (0.374 2) | X_{11} | 0.038 0 | 0.062 0 | 0.048 3 |
| | | X_{12} | 0.037 1 | 0.017 7 | 0.028 7 |
| X_{13} | | 0.033 0 | 0.073 2 | 0.050 2 | |
| X_{14} | | 0.042 1 | 0.037 1 | 0.039 9 | |
| X_{16} | | 0.036 7 | 0.038 5 | 0.037 4 | |
| X_{17} | | 0.034 6 | 0.039 2 | 0.036 5 | |
| X_{18} | | 0.136 5 | 0.045 5 | 0.097 3 | |
| X_{20} | | 0.031 8 | 0.041 2 | 0.035 8 | |
| 生态环境 (0.282 4) | | X_{21} | 0.034 9 | 0.052 5 | 0.042 4 |
| | X_{22} | 0.031 6 | 0.060 4 | 0.044 0 | |
| | X_{23} | 0.032 9 | 0.092 2 | 0.058 3 | |
| | X_{24} | 0.049 2 | 0.027 5 | 0.039 8 | |
| | X_{26} | 0.053 6 | 0.042 3 | 0.048 7 | |
| | X_{27} | 0.034 4 | 0.068 7 | 0.049 1 | |

2.3 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度时空演变特征

2012—2023 年江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度的时空分布如图 5 所示。从空间演变特征来看, 江苏省耦合协调度呈现出由南向北逐级递减的特征。苏南地区整体水平最高, 平均耦合协调度常年保持在 0.70 以上, 表现出“东西高、中部低”的分布格局。其中, 南京市和苏州市的耦合协调度分别达到 0.82 和 0.81, 居于全省前列; 无锡市(0.70)和常州市(0.66)也处于较高水平, 形成全省的高值集聚区, 且区域内部差异相对较小, 整体稳定在中高级协调阶段。苏中地区的耦合协调度主要分布在 0.50~0.62, 与苏南地区相比差距依然明显, 整体处于中等协调水平。苏北地区的平均耦合协调度多在

0.45~0.60, 区域内差异显著。其中, 徐州市和淮安市耦合协调度相对较高, 而连云港市偏低, 最低年份仅为 0.34, 区域整体耦合协调度落后于全省平均水平。

从时间演变特征来看, 2012—2023 年江苏省各地级市的耦合协调度整体呈现逐步提升趋势, 但不同区域与城市间存在明显差异。苏南地区整体保持在较高水平。其中, 南京市由 2012 年的 0.79 上升至 2016 年的 0.84, 并在 2017 年达到最高值 0.86, 2023 年仍维持在 0.80; 苏州市在 2012—2023 年期间稳定在 0.79~0.83, 表现出高位稳定特征; 相比之下, 镇江市提升幅度较小, 整体水平长期落后于苏南地区平均值。苏中地区耦合协调度主要分布在 0.50~0.62。其中, 扬州市表现为波动变化, 但大部分年份处于协调发展类型; 泰州市则从 2012 年的 0.43 提升至 2023 年的 0.51, 改善较为明显; 南通市 2012 年为 0.55, 2017 年提升至 0.62, 但研究后期波动幅度相对较大。苏北地区整体呈波动中上升趋势, 表现为由过度发展逐步向协调发展过渡。其中, 徐州市和盐城市均表现为波动性发展, 前者波动幅度较小(0.55~0.60), 后者波动范围较大(0.40~0.55)。其余城市总体呈现逐步提升态势, 其中连云港市增幅最为显著, 从 2014 年的 0.34 快速提升至 2023 年的 0.55, 年均增速达 0.028。

2.4 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度归因分析

根据 2012—2023 年江苏省典型年(2012 年、2017 年和 2023 年)水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度主要影响因子识别情况(见图 6), 水资源子系统中关联度最高的影响因子是全年供水总量, 多年平均关联度为 0.71, 且多数影响因子关联度分布在 0.60~0.80; 经济社会子系统中关联度最高的影响因子是一般公共预算收入, 多年平均关联度为 0.90, 大部分影响因子关联度大于 0.70; 生态环境子系统中关联度最高的影响因子是城市污水处理率, 多年平均关联度为 0.86, 大部分影响因子关联度大于 0.80。从 2012—2023 年典型年份关联度排序首位的因子类型变化来看, 2012 年和 2017 年均由水资源子系统影响因子占据首位, 关联度分别为 0.97 和 0.96; 而 2023 年则由生态环境子系统影响因子居首, 关联度为 0.86。

从区域特征来看(见图 7), 江苏省耦合协调度的主要影响因子呈现出显著的空间差异。苏南地区经济社会子系统中人均 GDP、城镇化率及第二产业产值

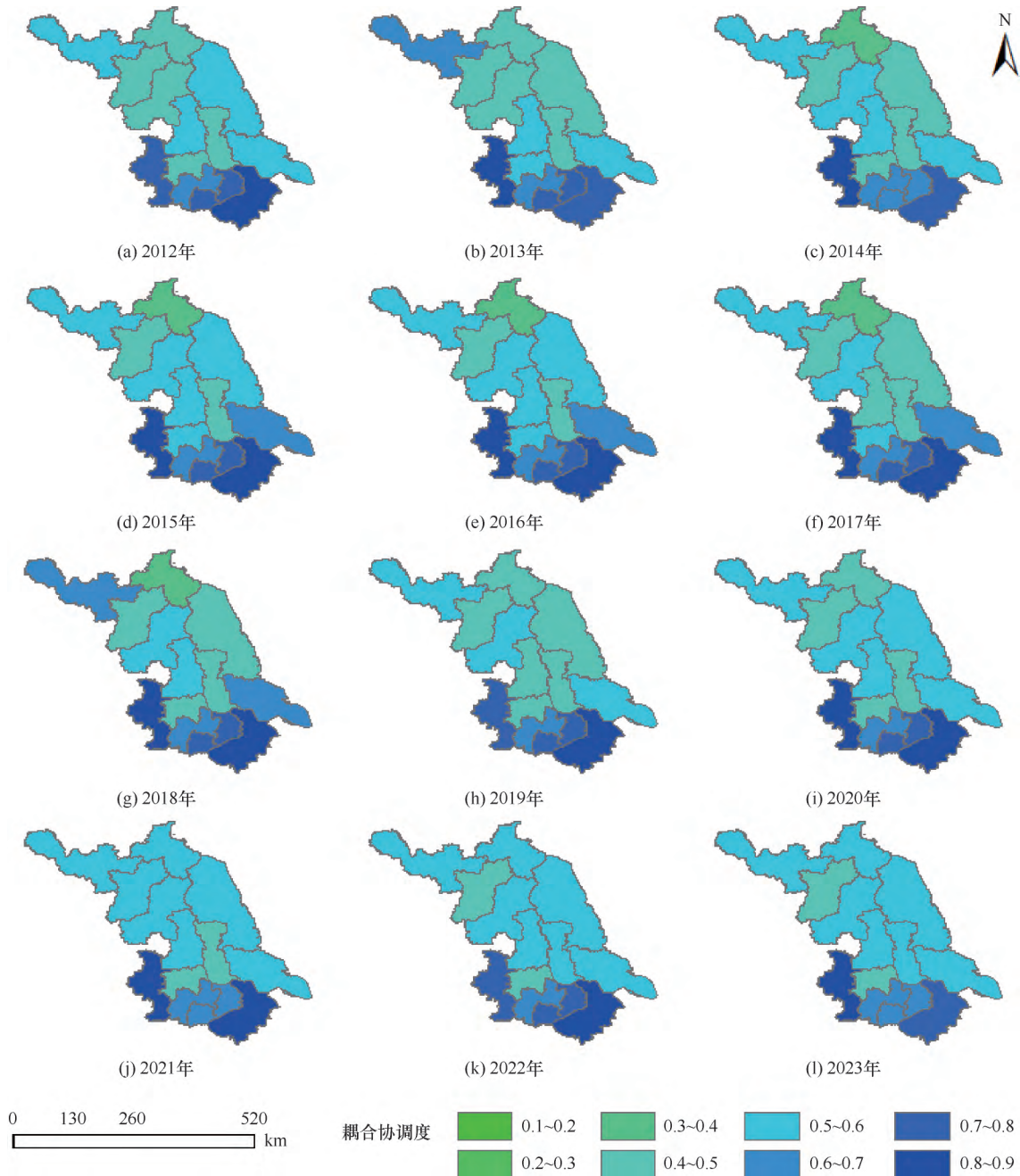


图5 2012—2023年耦合协调度时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of coupling coordination degree (2012—2023)

占比是主要因素，其中南京市、苏州市和无锡市的关联度普遍高于 0.70，说明该区域的产业升级和城镇化进程是长期维持高位耦合协调水平的重要支撑。水资源子系统中万元 GDP 用水量关联度较高，如镇江市和无锡市的关联度均在 0.71 左右，在水资源刚性约束背景下，提高用水效率对区域协调发展的支撑作用尤为显著。生态环境子系统中绿化覆盖面积和城市污水处理率为主要因素，如常州市的相应关联度均超过 0.8，反映出生态环境治理投入对维持较高耦合协

调水平具有重要保障作用。

苏中地区整体协调水平处于中等，表现为受水资源波动性与产业结构调整约束较为显著。水资源子系统中主要受降水量及供水总量的影响，即水资源的年际波动对区域协调水平具有显著影响。在经济社会子系统中关联度较高的因素有人均 GDP、城镇化率和第三产业产值占比，如泰州市人均 GDP 和城镇化率关联度分别为 0.82 和 0.76，扬州市和南通市的第三产业产值占比关联度均超过 0.65。受制于经济总量

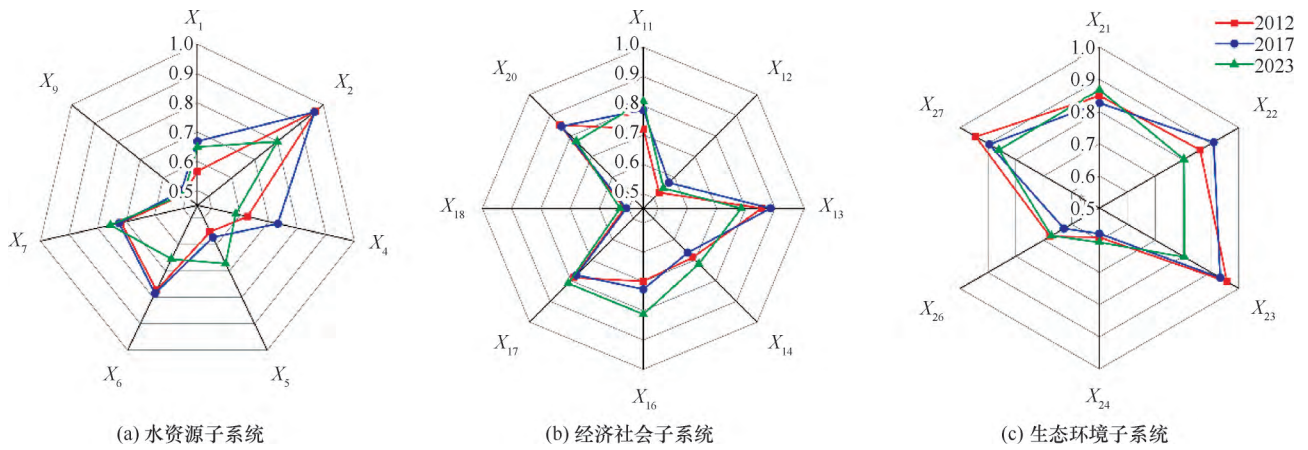


图6 江苏省典型年水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度主要影响因子关联度

Fig. 6 Relational degrees of main influencing factors of coupling coordination degree of water resources-economic society-ecological environment system in typical years in Jiangsu Province

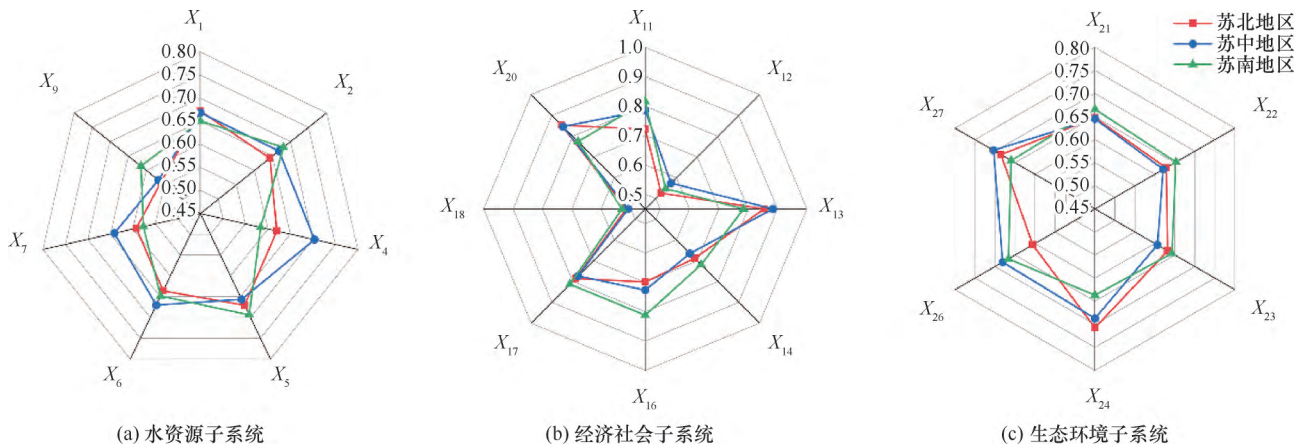


图7 江苏省不同区域水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度主要影响因子关联度

Fig. 7 Relational degrees of main influencing factors of coupling coordination degree of water resources-economic society-ecological environment system in different regions of Jiangsu Province

和产业转型的限制，其整体驱动效应相对有限。在生态环境子系统中，泰州市的主要影响因子为生活垃圾年清运量(0.79)，南通市和扬州市的主要影响因子则分别为建成区排水管道密度(0.73)和城市污水处理率(0.68)。

苏北地区整体协调水平偏低，表现为经济社会约束与生态环境瓶颈叠加。水资源子系统中，连云港市和宿迁市的降水量关联度均超过0.70，即水资源供给对苏北地区协调发展影响显著。经济社会子系统中人均GDP和第三产业产值占比为主要影响因子，如宿迁市、淮安市和连云港市的相应关联度均超过0.73。城镇化水平和产业结构转型是影响其耦合协调度的主要因素。生态环境子系统中连云港市和淮安市的城市污水处理率关联度分别为0.75和0.84，反映出生态环境治理水平仍是制约苏北地区耦合协调水平

的主要因素。

3 讨论

为充分认识江苏省水资源、经济社会、生态环境系统耦合协调发展状况，本文通过综合考虑研究区水资源、社会、经济及生态环境等因素特征，提出了适合研究区的特异性评价指标体系。已有研究普遍在水资源与经济社会、生态环境之间的耦合协调指标体系构建上采用专家经验法或相关性分析法，往往忽视指标间的敏感性差异，导致评价结果存在信息冗余^[13-20]。本文在前人研究的基础上，提出了适合江苏省的3大子系统耦合协调评价指标体系，并基于信息敏感性方法对初始指标体系进行优化，剔除了对系统耦合协调度贡献有限的指标，如城市人口用水普及率、GDP增长率等。这一处理不仅避免了冗余指标

对评价精度的干扰,而且使得评价结果更符合江苏省地表水条件相对稳定、公共服务普及率较高、经济结构转型已趋成熟等实际情况。与江红莉等^[15]相关成果相比,本文更强调方法上的优化与区域特异性体现,从而提升了评价体系的科学性与合理性。

研究评估了2012—2023年江苏省水资源、经济社会、生态环境三个子系统发展状况,各系统综合评价指数整体呈波动上升趋势(见图4)。水资源子系统综合评价指数由2012年的0.34提升至2023年的0.65。但水资源子系统综合评价指数波动较大,主要受降水量、温度等不确定性因素影响,同时作为南水北调东线工程的水源地,调水过程进一步加剧了波动性,这与邓鹏等^[24]的研究结论一致。经济社会子系统综合评价指数始终显著高于其他子系统,反映了江苏省在经济发展和进步方面的突出优势。生态环境子系统综合评价指数则保持稳定增长,得益于生态保护政策持续实施、绿色治理能力提升以及国家级绿色工业园区建设等措施,有效推动了城市绿色低碳转型。总体而言,江苏省水资源-经济社会-生态环境系统综合评价指数在研究期内呈曲折上升趋势,这与张芷若等^[25]的研究结论相一致。

研究进一步评估了2012—2023年江苏省水资源-经济社会-生态环境系统的耦合协调发展状况(见图5)。从时间维度看,研究期内耦合协调水平整体呈现稳步提升态势,反映了全省在水资源管理、经济社会发展与生态环境治理方面协同推进的成效。从空间维度看,耦合协调水平呈现“南高北低”的格局,区域差异显著。苏南地区经济基础雄厚,生态环境治理水平高,通过经济社会和生态环境子系统的优势带动整体耦合协调度长期处于全省领先,其中南京市和苏州市在2016年后达到高级协调。苏中地区各市耦合协调度差异较小且随时间波动变化,整体发展潜力尚待挖掘。苏北地区耦合协调水平偏低,部分城市因初期一般公共预算收入偏低、生态环境治理能力不足,导致耦合协调度低于全省平均水平,但大部分城市在研究期内耦合协调度呈现上升趋势。

最后,研究分析了江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调度的主要影响因子(见图6),主要包括一般公共预算收入(0.90)、城市污水处理率(0.86)、城镇化率(0.86)、第三产业产值占比(0.84)和人口密度(0.83)。总体来看,经济社会子系统的影响因子灰色关联度普遍高于其他子系统,这与经济社会子系统综合评价指数长期处于高位的特征一致。从高关联度指标的变化趋势来看,水资源子系

统中,降水量关联度呈先升后降态势,表明气候波动对系统的阶段性影响逐渐趋稳;地下水可利用量关联度下降,与地下水限采政策实施及南水北调工程缓解地下水压力有关。经济社会子系统中,城镇化率关联度上升,说明城镇化质量提升在后期显著推动了耦合协调度增长;一般公共预算收入和第三产业产值占比关联度较高,体现了财政投入与服务业发展对系统协调水平的基础支撑作用。生态环境子系统中,城市污水处理率与城市污水日处理能力关联度较高,反映出环保基础设施建设成效显著,也提示江苏省生态环境子系统在一定程度上仍依赖末端治理模式。图7进一步揭示了江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调水平总体提升的同时,影响因子呈现出空间异质性。苏南地区以经济社会发展与生态环境治理为主要驱动力,形成了中高水平耦合协调格局;苏中地区受水资源波动性与产业结构调整的双重制约,整体处于中等水平;苏北地区则受制于经济社会约束与生态环境建设不足,耦合协调水平长期处于相对低位。

基于此,为进一步促进区域绿色可持续发展,从以下几个方面提出针对性对策:一是促进水土资源高效利用与协同管理。在苏南高度城市化地区,严格实施用水总量和强度双控,大力发展滴灌、喷灌等节水灌溉技术。在沿海地区,推行“水资源刚性约束下的国土空间规划”,禁止高耗水项目在水资源超载地区布局,保障生态用水需求。二是强化技术创新与绿色驱动。重点支持工业废水深度处理与回用技术、智慧水管理平台的研发与应用,对相关企业提供税收减免。鼓励沿江化工、纺织等传统高耗水行业进行绿色工艺改造。三是推进产业结构调整与空间布局优化。在耦合协调水平较低的区域制定产业转型目录,逐步淘汰高耗水产业,积极培育节能环保型产业。利用长三角一体化契机,推动产业在区域内的梯度转移与协同布局,实现区域整体效率与可持续性的提升。

本文计算了江苏省2012—2023年水资源-经济社会-生态环境系统的耦合协调发展水平,并识别了三大子系统耦合协调度的主要影响因子,但研究仍存在一定的局限性。首先,研究尺度聚焦于地市尺度,未能深入揭示县域尺度上的差异,可能忽略了局部区域在水资源利用、经济发展与生态治理方面的特殊性。其次,由于早期数据统计口径存在差异及数据缺失,本研究未能对最严格水资源管理制度实施前后效果进行系统性对比分析。未来研究可针对各子系统构建尺度更为精细的评价模型,结合多源数据及多尺度耦合分析方法深入探讨复杂系统的时空协同特征与作用机

制, 从而为江苏省精准治理与可持续发展提供更加科学的决策依据。

4 结论

本文以江苏省为研究区, 基于信息敏感性方法构建了水资源、经济社会、生态环境耦合协调评价指标体系, 通过 CRITIC-熵权组合赋权法、博弈论、综合评价指数法、耦合协调度模型及灰色关联分析法形成了系统性的耦合协调研究框架, 进而深入分析了 2012—2023 年江苏省耦合协调特征及其影响因子, 其主要结论如下。

(1) 基于信息敏感性方法优化了指标体系, 筛选出 21 个对系统影响显著且指标间信息重叠程度低的指标, 构建了能科学反映江苏省水资源-经济社会-生态环境系统状况的评价指标体系。

(2) 江苏省 2012—2023 年期间复合系统综合评价指数总体增加。3 大子系统综合评价指数年均增长率分别为 14.55%、9.73% 和 32.46%, 子系统间相互耦合与联动促进了复合系统变化, 复合系统综合评价指数年均增长率为 12.07%。

(3) 江苏省水资源-经济社会-生态环境系统耦合协调类型在研究期内由勉强协调上升到高级协调, 由过度发展水平上升到协调发展水平, 耦合协调水平呈现稳定增长的态势。空间上呈“苏南地区>苏中地区>苏北地区”的南高北低梯度特征。

(4) 江苏省 3 大子系统耦合协调的最主要影响因素为全年供水总量(水资源子系统)、一般公共预算收入(经济社会子系统)和城市污水处理率(生态环境子系统), 表明水资源供给能力、财政发展水平及环保治理能力在系统协调发展中的关键作用。

参考文献(References):

- [1] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
ZUO Q T, CHEN X. Water Resources Planning and Management for Sustainable Development[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [2] 钟淋涓, 方国华, 国延恒. 水资源、社会经济与生态环境相互作用关系研究[J]. 水利经济, 2007, 25(3): 4-7.
ZHONG L J, FANG G H, GUO Y H. Study on the interaction relationship between water resources, socio-economic, and ecological environment[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2007, 25(3): 4-7.
- [3] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.

- WANG S J, KONG W, REN L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China. [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.
- [4] WANG Y F, GENG Q J, SI X H, et al. Coupling and coordination analysis of urbanization, economy and environment of Shandong Province, China[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(7): 10397-10415.
- [5] DONG Q Y, ZHONG K Y, LIAO Y J, et al. Coupling coordination degree of environment, energy, and economic growth in resource-based provinces of China[J]. Resources Policy, 2023, 81: 103308.
- [6] HE L Y, DU X Q, ZHAO J H, et al. Exploring the coupling coordination relationship of water resources, socio-economy and eco-environment in China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 918: 170705.
- [7] PIRES A, MORATO J, PEIXOTO H, et al. Sustainability assessment of indicators for integrated water resources management[J]. Science of The Total Environment, 2017, 578: 139-147.
- [8] 赵立杰, 仕玉治, 李福林, 等. 基于云耦合协调模型的水资源关联系统协调性动态评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 747-758.
ZHAO L J, SHI Y Z, LI F L, et al. Dynamic evaluation of water resources correlation system coordination based on cloud coupling coordination model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 747-758.
- [9] LI Q C, ZHANG P. Study of the safety-economy-environmental protection coordination of Beijing's natural gas industry based on a coupling coordination degree model[J]. Sustainability, 2025, 17(6): 2686.
- [10] SHENG J C, RUI D, HAN X. Governmentality and sociotechnical imaginary within the conservation-development nexus: China's Great Yangtze River Protection Programme[J]. Environmental Science & Policy, 2022, 136: 56-66.
- [11] XIA J, LI Z, ZENG S D, et al. Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin[J]. Geoscience Letters, 2021, 8(1): 18.
- [12] 王小军, 张建云, 廖传华, 等. 长江干流化工园区水资源管理与保护研究[J]. 中国水利, 2022(5): 51-53.
WANG X J, ZHANG J Y, LIAO C H, et al. Studies on water resources management and protection in chemical industry parks along the main stream of the Yangtze River[J]. China Water Resources, 2022(5): 51-53.
- [13] WANG S J, HUA G H, YANG L Z. Coordinated development of economic growth and ecological efficiency in Jiangsu, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(29): 36664-36676.
- [14] 贾晴雯, 董增川, 朱圣男, 等. 江苏省水生态与经济耦合协调度评价[J]. 水利经济, 2022, 40(3): 42-47.

- JIA Q W, DONG Z C, ZHU S N, et al. Evaluation on coordination degree of water ecology and economy coupling in Jiangsu Province [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2022, 40(3): 42-47.
- [15] 江红莉,何建敏. 区域经济与生态环境系统动态耦合协调发展研究: 基于江苏省的数据[J]. *软科学*, 2010, 24(3): 63-68.
- WANG H L, HE J M. The dynamic coupling model of coordinated development between regional economic and ecological environment systems based on Jiangsu Province [J]. *Soft Science*, 2010, 24(3): 63-68.
- [16] 郭利丹,井沛然. 基于生态足迹法的江苏省水资源可持续利用评价[J]. *水利经济*, 2020, 38(3): 19-25.
- GUO L D, JING P R, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province based on ecological footprint theory. [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(3): 19-25.
- [17] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1871-1884.
- TIAN P, WANG J Y, HUA W, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1871-1884.
- [18] 苏莹,董增川,崔璨,等. 湖南省“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统协调发展评价[J]. *中国农村水利水电*, 2023(7): 63-73.
- SU Y, DONG Z C, CUI C, et al. Evaluation of coordinated development of coupling system of “water resources-economic society-ecological environment” in Hunan Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(7): 63-73.
- [19] 张恬姿,王小军,齐广平,等. 甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调演变分析[J]. *水利水电工程学报*, 2023(2): 53-63.
- ZHANG T Z, WANG X J, QI G P, et al. Analysis of the spatial-temporal evolution characteristics of water resources-economy society-ecological environment coupling and coordination in Gansu Province [J]. *Hydro-science and Engineering*, 2023(2): 53-63.
- [20] 白美霞,王高旭,张轩,等. 青海省水资源-环境-社会经济系统耦合协调特征[J]. *人民黄河*, 2023, 45(4): 70-75.
- BAI M X, WANG G X, ZHANG X, et al. Coupling and coordination characteristics of water resources-environment-socio-economic system in Qinghai Province [J]. *Yellow River*, 2023, 45(4): 70-75.
- [21] 王剑,裴颖,张译心,等. 天津市新型城镇化与水资源耦合协调发展研究[J]. *水力发电*, 2022, 48(2): 24-28.
- Wang J, PEI Y, ZHANG Y X, et al. Study on coupling and coordinated development of new-type urbanization and water resources in Tianjin [J]. *Water Power*, 48(2), 24-28.
- [22] 祝笑笑. 黄河流域水-能源-粮食耦合协调特征及空间关联分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- ZHU X X. Water-Energy-Food Coupling Coordination Characteristics and Spatial Correlation Analysis in the Yellow River Basin [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [23] 陈子慧. 安徽省水资源-水环境承载力综合评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
- CHEN Z H. Study on Comprehensive Evaluation of Water Resources and Water Environment Carrying Capacity in Anhui Province [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2023.
- [24] 邓鹏,陈菁,陈丹,等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究: 以江苏省为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6): 232-238.
- DENG P, CHEN J, CHEN D, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: take Jiangsu Province as an example [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(6): 232-238.
- [25] 张芷若,肖喜萌. 长江经济带水资源-经济社会-生态环境耦合协调研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(11): 30-36.
- ZHANG Z R, XIAO X M. Coupling coordination of water resources-economic society-ecological environment in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(11): 30-36.
- [26] 袁昕恬,王婷,刘彬,等. 基于PSR-Markov模型的水-经济社会协调发展时空演变[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(4): 839-848.
- YUAN X T, WANG T, LIU B, et al. Spatiotemporal evolution of the coordinated development of water resources and socio-economic economy in Hebei Province based on PSR-Markov model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(4): 839-848.
- [27] 姜言. 东北地区城镇化过程中生态环境与农业发展时空协同演化特征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2023.
- JIANG Y. Spatial and Temporal Co-evolution Characteristics of Ecological Environment and Agriculture Development In the Process of Urbanization in Northeast China [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2023.
- [28] 孟令冉. 江苏省乡村生态系统健康评价与耦合调控研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- MENG L R. Research on Health Assessment and Coupling Regulation of Rural Ecosystem in Jiangsu Province [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [29] 迟国泰,陈洪海. 基于信息敏感性的指标筛选与赋权方法研究[J]. *科研管理*, 2016, 37(1): 153-160.
- CHI G T, CHEN H H. A study of indice screening and weighting method based on information sensitivity [J]. *Science Research Management*, 2016, 37(1): 153-160.
- [30] 汪冬华. 多元统计分析与SPSS应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2010.

- WANG D H. Multivariate Statistical Analysis and SPSS Application [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2010.
- [31] 陈洪海,王慧,隋新. 基于信息贡献率的评价指标筛选与赋权方法[J]. 科研管理, 2020, 41(8): 240-247.
- CHEN H H, WANG H, SUI X. Evaluation indicator screening and weighting method based on information contribution ratio[J]. Science Research Management, 2020, 41(8): 240-247.
- [32] 李国良,付强,孙勇,等. 基于熵权的灰色关联分析模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(6): 15-18.
- LI G L, FU Q, SUN Y, et al. Grey relational analysis model based on weighted entropy and its application[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17(6): 15-18.
- [33] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [34] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.
- SONG D M, LIU C X, SHEN C, et al. Multiple objective and attribute decision making based on the subjective and objective weighting [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9.
- [35] HAN L, WANG Y, LI S D, et al. Evaluation of water resource carrying capacity and analysis of driving factors in the Dadu River Basin based on the entropy weight method and CRITIC comprehensive evaluation method[J]. Water, 2025, 17(16): 2360.
- [36] 侯定丕. 博弈论导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.
- HOU D P. The Tutorial of Game Theory [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004.
- [37] 朱现场,金允龙. 东海某水域海上交通事故灰色关联分析[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2021, 44(3): 11-15.
- ZHU X C, JIN Y L. Grey relative analysis of marine accidents in waters of the East China Sea [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2021, 44(3): 11-15.
- [38] 穆瑞,张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价[J]. 系统工程理论与实践, 2008(10): 125-130.
- MU R, ZHANG J T. Research of hierarchy synthetic evaluation based on grey relational analysis [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008(10): 125-130.
- [39] SILVA N F, DOS SANTOS M, GOMES C F S, et al. An integrated CRITIC and Grey Relational Analysis approach for investment portfolio selection[J]. Decision Analytics Journal, 2023, 8: 100285.

(责任编辑 王海锋)