

水利水电技术(中英文)
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860, CN 10-1746/TV

《水利水电技术(中英文)》网络首发论文

题目: 全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析
作者: 张茵, 王婷, 游进军, 任政
收稿日期: 2022-07-05
网络首发日期: 2022-10-20
引用格式: 张茵, 王婷, 游进军, 任政. 全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20221020.1155.008.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析

张茵^{1,2,3}, 王婷³, 游进军³, 任政^{1,2}

(1.河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2.河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对全国社会经济发展布局与水资源承载力不相匹配, 导致资源与经济的协调发展受到约束等问题。本文以优化全国社会经济的适水发展布局为目标, 剖析 31 个省级行政区现状水资源与社会经济发展水平的协调程度。通过构建水资源-社会经济复合系统耦合协调评价指标体系, 建立耦合协调度模型, 从时间、空间两个维度探究全国水资源与社会经济耦合协调发展关系的时空演变规律, 并借助障碍度函数进一步分析影响二者耦合协调发展的主要障碍因子。结果表明: 2010—2020 年, 全国水资源与社会经济的耦合协调发展水平呈上升趋势, 耦合协调度值由 2010 年的 0.11 提高到 2020 年的 0.69; 各省的耦合协调发展水平总体也呈上升趋势, 31 省耦合协调度的数值范围由 2010 年的 0.10~0.42 变更至 2020 年的 0.46~0.69, 且变化趋势表现为 3 种类型: 26 省为“上升型”, 福建、西藏、浙江 3 省为“平稳型”, 青海和海南 2 省为“波动型”。2020 年, 19 省达到协调发展水平, 12 省仍处于过渡阶段且均为社会经济过快发展型地区; 主要障碍因子有人均水资源量、人均综合用水量与人均 GDP 等, 各省之间存在地区差异。以湖北省为例, 分析新冠疫情前后 (2019—2020 年) 水资源与社会经济耦合协调趋势发生突变的原因, 表明分析结果与实际情况基本相符。研究成果可为优化全国层面社会经济发展布局、促进水资源空间均衡提供参考。

关键词: 水资源; 社会经济; 耦合协调度; 时空演变; 障碍度; 水资源承载能力; 水资源优化配置; 水资源空间均衡

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A



开放科学 (资源服务) 标志码 (OSID):

Analysis on spatio-temporal evolution of national water-socioeconomic coupling coordination and its obstacle factors

ZHANG Yin^{1,2,3}, WANG Ting³, YOU Jinjun³, REN Zheng^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the problem of the mismatch between the national socioeconomic development layout and the carrying capacity of water resources, which leads to that the coordinated development of resources and

economy are constrained. By taking optimizing the national socioeconomic development layout adaptable to water as the target, the coordination degrees between the current water resources and the socioeconomic development levels in 31 provinces are analyzed herein. Through building up the evaluation index system for water resources-socioeconomic composite system and establishing the relevant coupling coordination degree model, the spatio-temporal evolution law of the coordinated development relationship of the coupling between the national water resources and social economy is temporally and spatially explored, while the main obstacle factors affecting the coupling and coordinated development between both of them are further analyzed by means of obstacle degree function. The results show that in the period of 2010~2020, the coordinated development level of the coupling between the national water resources and social economy exhibits a rising trend with the increase of the value of the coupling coordination degree from 0.11 in 2010 to 0.69 in 2020, while the coupling and coordinated developments of all the provinces are also present rising trends with the changes of the numerical values of the coupling coordination degrees of the 31 provinces from 0.10~0.42 in 2010 to 0.46~0.69 in 2020, in which the changing trends show that 26 provinces are characterized by the “rising type”, the provinces of Fujian, Tibet and Zhejiang are characterized by the “smooth type” and the provinces of Qinghai and Hainan are characterized by the “fluctuated type”. In 2020, 19 provinces reach the coordinated development stage, while the other 12 provinces are still in the transitional stage due to excessive socioeconomic development, for which the main obstacle factors are water resources per capita, water consumption per capita and GDP per capita, etc. with the regional differences among all the provinces. Taking Hubei Province as a case, the causations of the sudden change of the coordination trend of the coupling between water resources and social economy before and after the COVID-19 epidemic (2019-2020) are analyzed and the results indicate that the analysis results are basically coincided with those of the actual situations. This study results can provide the relevant references for optimizing the layout of the socioeconomic development at national level and promote the spatial equilibrium of water resources.

Key words: water resources; social economy; coupling coordination degree; spatio-temporal evolution; obstacle degree; water resources carrying capacity; optimal allocation of water resources; spatial balance of water resources

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079143); 国家重点研发计划(2018YFC0407705); 河北省重点研发计划项目(21374201D); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-202215)

作者简介: 张茵(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源方向研究。E-mail: zhangy165@163.com

通信作者: 游进军(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文及水资源方向研究。E-mail: youjj@iwhr.com

任政(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文及水资源方向研究。E-mail: hdrenzheng@126.com

0 引言

水资源作为基础性自然资源和战略性经济资源, 在促进社会经济发展方面发挥着不可替代的作用^[1]。然而, 随着社会经济发展, 全国水资源短缺问题愈加突出, 社会经济发展与水资源相互影响的支撑格局出现了显著变化^[2]。经济发展水平与水资源条件不相适应, 水资源供需矛盾日益突出, 发展受到制约^[3]。因此, 开展水资源与社会经济的协调关系及其影响因子研究, 对于实现人水和谐、引导水资源与社会经济布局发展均衡有着重要意义。

国内外学者在水资源与社会经济协调关系方面开展了大量研究, 大多是从水资源利用效率、水资源承载力与水环境承载力等不同角度, 通过建立指标体系, 利用主成分分析、可变模糊识别模型、灰色关联度和耦合协调度模型等方法对水资源与社会经济的协调程度进行量化^[4-9]。近年来耦合协调度模型应用逐渐增多^[10-12], 盖美等^[13]构建辽宁沿海经济带用水效率与经济发展的评价指标体系, 运用耦合协调度模型进行了评价; CUI 等^[14]将耦合协调度模型应用于昆明市, 研究了其社会经济和水环境之间的耦合协调关系; LIU 等^[15]建立了耦合协调度模型、剪刀差分和基于遗传算法的投影寻踪模型, 研究了南四湖流域的社会经济与水环境耦合协调的时空分布和动态演化机制; 张凤太等^[16]在采用耦合协调度模型的基础上, 借助变异系数方法分析其区域分异程度, 揭示了贵州省水资源与社会经济耦合协调发展的时空分异特征。

可以看出, 基于耦合协调度模型的水资源与社会经济协调发展关系研究已有一定实践应用, 但影响水资源与社会经济耦合协调的障碍因子方面的研究较为薄弱, 且已有的研究主要集中在省域^[1,16]、市

域^[6,13]或流域^[15,17]上, 缺乏全国层面水资源与社会经济耦合协调发展的时空演变规律研究。因此, 本文构建全国尺度耦合协调度模型, 识别全国及省级行政区的水资源与社会经济耦合协调关系时空变化特征, 结合障碍度函数分析影响耦合协调发展的主要障碍因子, 并以典型地区情况进行验证, 为相关决策提供参考。

1 社会经济发展规模受可用水量制约的适应性变化关系

水资源与社会经济之间存在着既相互促进又相互制约的关系。一方面, 丰沛的水源、良好的水环境能为社会经济发展提供必要的保障, 同时经济增长、社会发展又为水资源开发能力和利用效率提升提供更多的资金和技术支持, 二者表现为相互促进。另一方面, 经济与人口迅速增长、工业化与城镇化进程加快会引起水资源需求量的增加, 容易造成水资源过度开发, 从而引起水源枯竭、水环境破坏, 给生产生活和区域发展带来不利影响^[18-19], 形成二者相互制约的关系。因此, 必须对水资源与社会经济进行合理调控, 在保障社会经济发展的同时注重水资源开发与管理, 维护水循环的稳定健康, 才能实现水资源与社会经济的协调可持续发展^[20]。二者协调发展的基础是水资源开发必须约束在一定范围内, 不能超过维持水循环稳定健康的合理阈值, 水资源开发利用也不能超过其承载力。

区域水资源利用受水资源刚性约束和工程能力双重影响。实际管理中, 可用水量的上限依据江河流域水量分配指标、地下水取水总量指标及外调水量指标而定。总结水资源对社会经济发展规模的支撑与制约作用, 发现社会经济发展规模随着可用水量的增加可能呈现三种类型: 社会经济过快发展型(曲线*ADE*)、社会经济过慢发展型(曲线*AFG*)、水资源-社会经济协调发展型(曲线*ABC*), 如图1所示。由于资源的有限性和稀缺性, 在一定技术条件下, 能支撑的社会经济发展规模存在上限(直线*I*)。当水资源开发能力较低, 可用水量较少时, 水资源在某种程度上是制约社会经济发展的主要因素。然而, 水资源并不是社会经济发展的唯一约束条件, 当可用水量提高到一定水平时(*H*点), 制约社会经济发展的主要因素会发生变化, 此时水资源不再是主要影响因素, 若其它因素(如土地资源等)不变, 如果仅仅增加可用水量, 难以提升社会经济发展水平。

(1) 社会经济过快发展型(曲线*ADE*): 区域经济与人口迅速增长、工业化与城镇化进程加快, 导致水资源需求超过当地水资源承载力, 水资源压力增大, 社会经济发展受到水资源条件制约, 发展质量受到影响。北京市是此类型的代表, 由于社会经济发展过快导致水资源需求超过当地水资源承载力。近年来, 北京市持续调整产业结构, 搬迁耗水型企业, 疏散非首都功能产业, 大大减少了服务业和生活用水, 加上南水北调工程的调水支撑, 使得社会经济发展规模控制在了水资源承载力以内。

(2) 社会经济过慢发展型(曲线*AFG*): 区域水资源丰沛, 但水资源时空分布不均、工程能力不足以及配置不合理等因素, 使得水资源未被充分利用, 社会经济发展受到影响。西南地区是此类型的代表, 天然水资源相对丰富, 但经济发展布局与水资源的分布不相匹配, 坝区人多水少, 山区人少地多, 同时受其他资源以及交通等条件限制, 社会经济发展相对缓慢, 低于水资源可承载水平。

(3) 水资源-社会经济协调发展型(曲线*ABC*): 社会经济对水资源的开发利用满足水循环的良性维持, 水资源的合理开发又能为流域社会经济的发展提供足够支撑, 水资源与社会经济实现可持续发展。此类型能够维持水资源与社会经济的动态平衡, 是水资源与社会经济的合理协调发展方向。

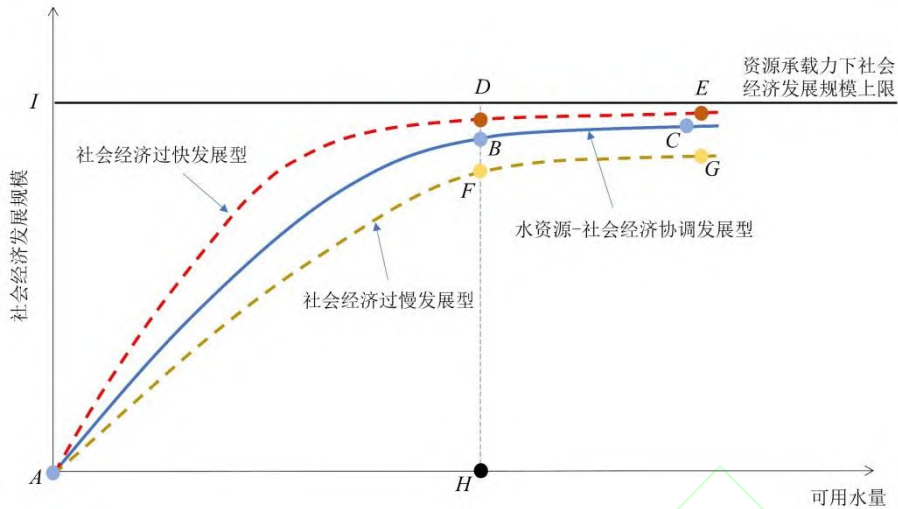


图 1 社会经济发展规模与可用水量关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between social economic development scale and available water resources

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

耦合指两个或两个以上体系、事物或系统之间通过各种相互作用而彼此影响的现象；协调是系统间和谐一致、配合得当，向良性发展的表现^[5]。水资源与社会经济耦合协调发展的内涵是指：在满足水资源承载力条件下，社会经济可以实现最大化的可持续发展，技术与手段得以提升，从而提高水资源开发利用效率，使得二者相互协调促进^[21]。本文以水资源-社会经济（Water Resources-Social Economy，以下简称 WRSE）复合系统为研究对象，从整体角度出发构建耦合协调度模型并求解，判别系统中水资源子系统与社会经济子系统的耦合协调程度；结合障碍度函数，识别影响耦合协调发展的障碍因子。WRSE 复合系统耦合协调度评价技术框架如图 2 所示。

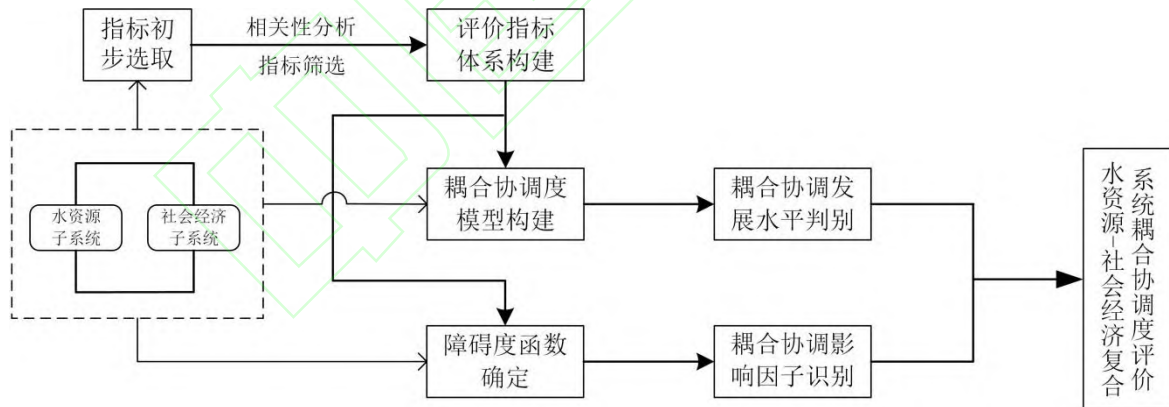


图 2 水资源-社会经济复合系统耦合协调度评价框架

Fig. 2 Evaluation framework of coupling coordination degree of WRSE composite system

2.1.1 水资源-社会经济复合系统耦合协调评价指标体系构建

评价指标体系是 WRSE 复合系统耦合协调度量化的基础，水资源与社会经济两子系统既相互促进又相互制约，本文提出的 WRSE 复合系统耦合协调度评价主要包括两方面：一是反映水资源对社会经济发展的支撑程度，主要通过社会经济子系统的发展规模、发展速度等来体现；二是反映社会经济发展对于水资源利用水平提升的支撑程度，主要通过提高科技水平、加强节水宣传后各行业用水效率的提升情况来体现。同时，为避免同一指标关联两个子系统会造成计算结果的偏差，参考水资源和社会经济评价指标相关研究^[13,22-24]，遵循全面性、科学性、层次性、可获得性等原则，从水资源和社

会经济两个子系统分别考虑两类准则进行指标选择，初步确定 16 项备选指标。其中，水资源子系统考虑水资源禀赋和水资源利用两项准则，社会经济子系统考虑社会发展和经济水平两项准则。

考虑到指标间可能存在相关性，利用 31 个省级行政区 2010—2020 年的数据，采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对 16 项指标进行皮尔逊相关性分析。根据指标体系的重复性、可替代性原则，相关系数大于 0.82 视为高度相关^[25]，筛除 3 项指标：年降雨量(mm)、万元 GDP 用水量(m^3)、耕地面积(hm^2)。在此基础上，建立包含目标层、系统层、准则层和指标层在内的 WRSE 复合系统耦合协调评价指标体系，如表 1 所列。

对指标层中的原始数据采用极差标准化法进行去量纲正向化处理。为保留决策者的评价意向并尽可能利用指标的数据信息，使赋权更加可靠，本文采取极差最大化组合赋权法^[26]。其中，主观赋权采用改进的 9/9~9/1 标度法式^[27]的 AHP 法，客观赋权采用熵值法^[28]。

表 1 水资源-社会经济复合系统耦合协调评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of coupling coordination of WRSE composite system

目标层	系统层	准则层	指标层	计算方法	表征含义	单位	属性
水资源-社会经济耦合协调发展	水资源子系统	水资源禀赋	人均水资源量 W_1	水资源总量/人口	水资源对人口的承载能力	$m^3/人$	+
			年径流深 W_2	中国水资源公报附表统计数据	区域水资源丰枯状况	mm	+
		水资源利用	水资源开发利用率 W_3	用水总量/水资源总量	区域水资源开发利用程度	%	-
			人均综合用水量 W_4	中国水资源公报统计数据	区域人均综合用水水平	$m^3/人$	*
			城镇供水管网漏损率 W_5	城镇漏损水量/供水总量	城镇供水系统供水效率	%	-
			灌溉水有效利用系数 W_6	中国水资源公报统计数据	农业用水效率	-	+
	社会经济子系统	社会发展	城镇化率 S_1	中国统计年鉴统计数据	区域城镇化水平	%	+
			人口密度 S_2	人口/面积	区域人口密集程度	人/ km^2	+
			科技经费投入强度 S_3	全国科技经费投入统计公报统计数据	区域科技创新发展水平	%	+
		经济水平	人均绿地面积 S_4	城市建设统计年鉴统计数据	区域居民生活环境质量水平	m^2	+
			人均 GDP S_5	中国统计年鉴统计数据	区域整体经济发展状况	万元	+
			人均粮食产量 S_6	粮食产量/人口	区域农业生产水平	公斤	+
			第三产业产值占比 S_7	中国统计年鉴统计数据	区域社会经济发展阶段	%	+

注：指标属性为“+”，为正向指标；指标属性为“-”，为负向指标。其中属性为“*”的指标 W_4 ，该指标以三条红线中用水总量控制红线的 90%为适宜值，若指标值大于适宜值则为负向指标，若指标值小于适宜值则为正向指标

2.1.2 水资源-社会经济复合系统耦合协调度模型构建

本研究以衡量 WRSE 复合系统的协调发展水平为目的，选用耦合协调度模型^[13,29]评价其耦合协调程度。该模型易于计算、结果直观，适用于不同尺度、不同区域的环境、生态、经济、社会等多系统间耦合协调发展水平的实证研究。其基本原理是通过构建两个子系统的综合评价函数 $U_1(x)$ 、 $U_2(y)$ ，如式（1）所示，计算二者间的相对离差系数，系数值越小说明二者间的耦合度越高，再利用相对离差系数推求两子系统间的耦合度计算公式，如式（2）所示。但耦合度仅反映水资源子系统与社会经济子系统之间相互作用的大小，无法反映相互作用协调水平的高低，因此引入耦合协调度对整个系统的协调水平进行综合评价，如式（3）、（4）所示。耦合协调度是对水资源子系统与社会经济子系统耦合协调发展状况的定量测度，既能反映两子系统之间相互支撑、相互制约的关系紧密程度，也能评判 WRSE 复合系统良性发展程度。

$$\begin{cases} U_1(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \times X_j \\ U_2(y) = \sum_{j=1}^n \beta_j \times Y_j \end{cases} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{\frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2}} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C * T} \quad (3)$$

$$T = (\alpha U_1 + \beta U_2) \quad (4)$$

式中， $U_1(x)$ 、 $U_2(y)$ 分别表示水资源、社会经济子系统的综合评分，即表示各子系统的综合发展水平， α_j 、 β_j 分别表示各项指标在子系统内的权重， X_i 、 Y_i 分别表示各评价指标的标准值， $U_1(x)$ 值越大表明水资源水平相对较高， $U_2(y)$ 值越大表明社会经济水平相对较高； C 表示耦合度； D 表示耦合协调度，值介于 0~1 之间，当耦合协调度的值越趋近于 1 时，表明水资源足以支撑当地的社会经济发展，社会经济发展也对水资源状况的改善起到了促进作用，二者实现协调发展； T 表示 WRSE 复合系统综合评分； α 、 β 分别为水资源子系统与社会经济子系统的权重，本研究认为两子系统对 WRSE 复合系统协调发展具有同等重要的作用，均取 0.5。

根据耦合协调度 D 的取值，设置水资源与社会经济耦合协调发展的分级判别标准^[1,30]，如表 2 所示。针对二者未实现协调或低度耦合协调的情况，即处于失调阶段和过渡阶段时，结合水资源与社会经济的相对发展关系，将其进一步划分为社会经济过快发展型（ $U_1 < U_2$ ）和社会经济过慢发展型（ $U_1 > U_2$ ）。

表 2 水资源与社会经济耦合协调关系判别标准

Table 2 Discrimination standard of coupling coordination relationship between water resources and social economy

阶段	耦合协调度 D	协调类型	水资源与社会经济相对发展关系
失调阶段	$D \in [0, 0.2)$	严重失调衰退	$U_1 < U_2$: 社会经济过快发展型 $U_1 > U_2$: 社会经济过慢发展型
	$D \in [0.2, 0.4)$	轻度失调衰退	
过渡阶段	$D \in [0.4, 0.6)$	低度耦合协调	
协调阶段	$D \in [0.6, 0.8)$	高度耦合协调	水资源-社会经济协调发展型
	$D \in [0.8, 1]$	极度耦合协调	

2.1.3 基于障碍度函数的耦合协调发展障碍因子识别

为量化识别不同评价指标对 WRSE 复合系统耦合协调发展的影响程度，便于制定针对性政策，引入障碍度函数测算各项指标的障碍度，判断主要障碍因子^[30]。障碍度函数采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度 3 个指标进行分析诊断^[31]。障碍度 H_j 表示各评价指标对 WRSE 复合系统耦合协调度的影响程度，根据各个评价指标的因子贡献度和指标偏离度来推求其障碍度值，如式（7）所示。其中因子贡献度 F_i 指各评价指标对 WRSE 复合系统耦合协调度评价的重要程度，即各评价指标的权重，如式（5）所示；指标偏离度 I_i 指各评价指标实际值与最优值之间的差距，即各评价指标标准化值与 1 之差，如式（6）所示。若某项指标的障碍度越小，表明耦合协调度受该项指标的阻碍作用越弱；障碍度越大，表明耦合协调度受该项指标的阻碍作用越强。

$$F_i = \omega_j \times \alpha_{ij} \quad (5)$$

$$I_i = (1 - X_i) \quad (6)$$

$$H_j = \frac{F_i \times I_i}{\sum_{j=1}^n F_i \times I_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中， F_i 为因子贡献度； ω_j 为 WRSE 复合系统中第 j 个子系统的权重； α_{ij} 为第 j 个子系统中的第 i 个指标的权重； I_i 为指标偏离度； X_j 为经标准化后第 j 项指标的值，即前文极差标准化后的指标值； k 为评价指标个数； H_j 为障碍度。

2.2 数据来源

本文研究对象为全国及 31 个省级行政区（以下简称省，不含港澳台地区），指标数据来源于《中国水资源公报》、《全国水利统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》和各省《统计年鉴》，数据系列为 2010—2020 年，个别缺失指标值采用插补法进行了补充。

3 结果与分析

3.1 全国水资源-社会经济复合系统耦合协调度时空演变规律分析

3.1.1 时间维度：全国耦合协调度结果分析

为探索全国 WRSE 复合系统耦合协调发展的时序变化特征，采用全国 2010—2020 年指标数据计算耦合协调度 D ，绘制趋势图（见图 3）。

在 2010—2020 年间，WRSE 复合系统耦合协调度 D 总体呈现出上升趋势，期间略有波动，2017 年、2018 年出现一定幅度的下降，此后又恢复增长态势，耦合协调水平由 2010 年的严重失调衰退逐步提升至 2020 年的高度耦合协调。同时，2010 年、2012 年、2013 年、2016 年为社会经济过慢发展期，即水资源未得到充分利用，影响社会经济发展速度；2011 年、2014 年、2015 年、2017 年、2018 年为社会经济过快发展期，即相较于水资源子系统，社会经济子系统发展过快，二者失调；2019 年、2020 年为水资源-社会经济协调发展期。进一步分析发现，2017 年、2018 年全国降水量较 2016 年有所降低，可用水量下降，造成耦合协调水平较 2016 年有一定幅度的下降。

总体来看，全国 WRSE 复合系统的耦合协调水平在不断提升，表明社会经济发展水平与水资源条件适应性提高，政策调控起到了积极作用。然而，全国水资源子系统与社会经济子系统尚未达到最优耦合协调水平，未来还有上升空间，仍需结合水资源时空差异特性，增强调控进一步提升 WRSE 复合系统耦合协调度。

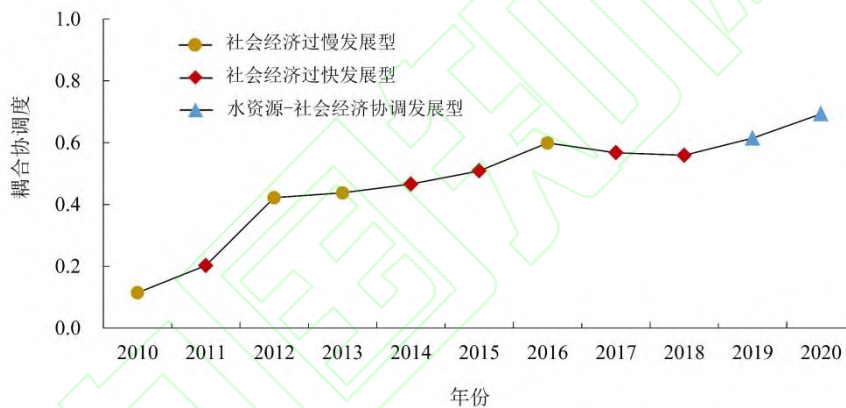


图 3 全国 2010—2020 年水资源-社会经济复合系统耦合协调度

Fig. 3 Coupling coordination degree of WRSE composite system in China from 2010 to 2020

3.1.2 空间维度：分省耦合协调度结果分析

为揭示全国水资源与社会经济耦合协调发展的空间变化特征，进一步分析了各省的 WRSE 耦合协调度。由于数据量较大，选择 2010 年、2015 年和 2020 年 3 个典型年份进行分析和分类，绘制耦合协调度空间分布图，如图 4 所示。

2010 年，各省耦合协调度值介于 0.10~0.42 之间。处于失调阶段的省份有 26 个，其中河北、河南、江苏、山东、天津和云南 6 省为严重失调衰退，黑龙江、重庆等 20 省为轻度失调衰退；处于过渡阶段（低度耦合协调）的省份有 5 个，包括福建、海南、青海、西藏和浙江。总体而言，2010 年各省均未达到协调阶段，其中重庆和西藏属于社会经济过快发展型，其他省份均属于社会经济过慢发展型。

2015 年，各省耦合协调度值介于 0.30~0.57 之间。处于失调阶段的省份有 3 个，且均为轻度失调衰退，包括海南、青海和四川；处于过渡阶段（低度耦合协调）的省份有 28 个，包括北京、山东和浙江等。总体而言，2015 年全国水资源与社会经济的耦合协调水平有一定程度的上升，大多数省份到达过渡阶段，但均未达到协调阶段，其中河北、贵州等 11 省属于社会经济过慢发展型，北京、天津等 20 省属于社会经济过快发展型。

2020 年，各省耦合协调度值介于 0.46~0.69 之间，全部脱离失调阶段。处于过渡阶段（低度耦合协

调)的省份有 12 个,且均属于社会经济过快发展型,包括北京、天津等。达到协调阶段的省份有 19 个,均为高度耦合协调,包括黑龙江、山东和安徽等。总体来看,2020 年全国多数省份的水资源与社会经济的耦合协调水平达到了协调阶段,当地水资源与社会经济之间实现相互支撑、共同发展。

根据 2010—2020 年 31 省耦合协调度值,对其变化趋势进行组群分类,如表 3 所列。全国多数省份耦合协调水平变化趋势为“上升型”,其中安徽、甘肃、广西等 18 省达到了协调阶段,北京、天津、河北等 8 省耦合协调水平虽有所提升,但仅处于过渡阶段,原因在于北京、天津、河北等省份水资源禀赋条件差,导致水资源无法支撑当地大规模高强度的工业化和城镇化发展;福建、西藏、浙江 3 省为“平稳型”,一直处于低度耦合协调的过渡阶段;青海、海南为“波动型”,由过渡阶段退到失调阶段,随后海南又回到低度耦合协调,青海则达到高度耦合协调。虽然多数省份的耦合协调水平有所提升,但均未达到极度耦合协调水平,说明目前全国各省份水资源与社会经济布局均未达到最优匹配状态,未来仍有进一步优化提升空间。

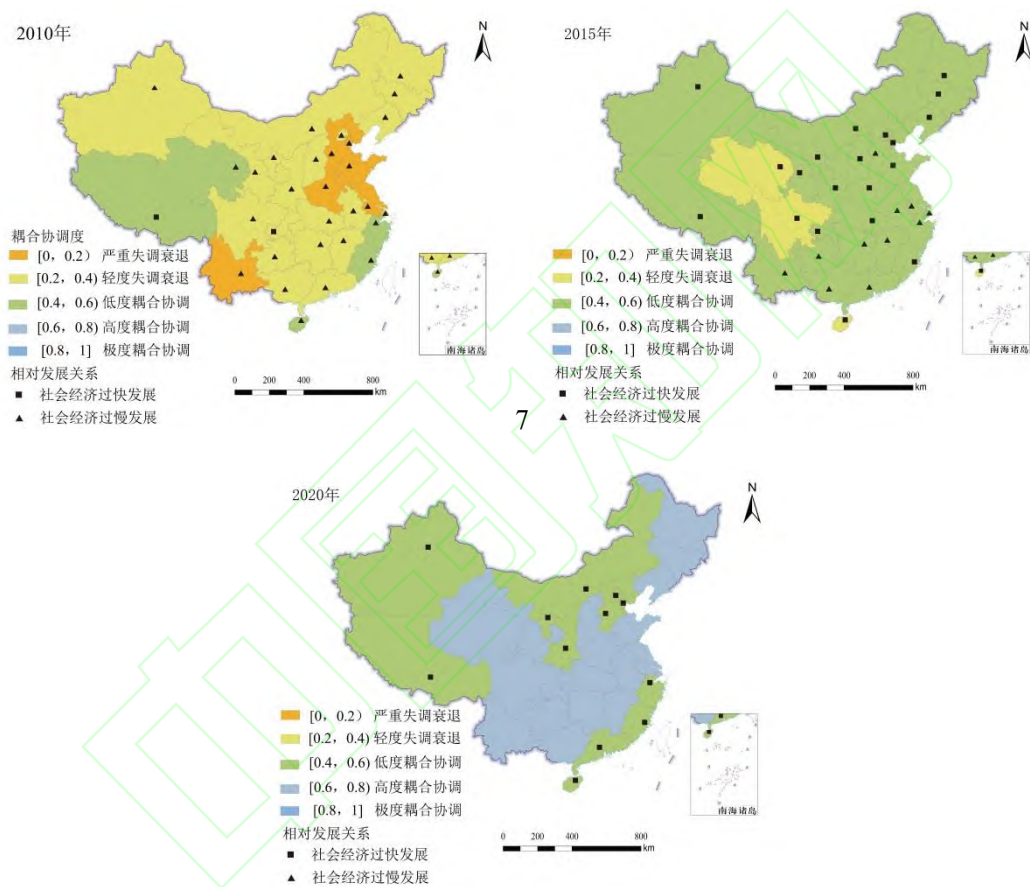


图 4 水资源-社会经济复合系统耦合协调发展空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of coupling coordination development of WRSE composite system

表 3 2010—2020 年 31 省份水资源-社会经济复合系统耦合协调水平变化趋势类型

Table. 3 Change trend types of coupling coordination level of WRSE composite system in 31 provinces from 2010 to 2020

变化趋势类型	省级行政区
上升型 (失调-协调)	安徽、甘肃、广西、贵州、河南、黑龙江、湖北、湖南、吉林、江苏、江西、辽宁、山东、山西、上海、云南、重庆、四川
上升型 (失调-过渡)	北京、天津、河北、广东、内蒙古、宁夏、陕西、新疆
平稳型	福建、西藏、浙江
波动型	青海、海南

3.2 全国水资源-社会经济复合系统耦合协调发展障碍因子分析

3.2.1 时间维度：全国耦合协调发展障碍因子分析

利用障碍度公式计算得到 2010—2020 年 13 项指标的障碍度，取 11 年均值，并列出了障碍度排名前 5 位的障碍因子，如图 5 所示。

可以看出，人均水资源量 (W_1) 为全国水资源与社会经济耦合协调发展的主要障碍因子，障碍度达 15%，第二为人均综合用水量 (W_4)，障碍度达 11%，其后依次为人均 GDP (S_5)、年径流深 (W_2) 和人口密度 (S_2)，其障碍度分别为 10%、9% 和 8%。在水资源子系统中，由于人均水资源量与年径流深两项指标属于天然禀赋条件且具有不确定性特征，不易管控，因此未来应以改善人均综合用水量为调控重点，结合人口条件将用水总量控制在适宜范围；在社会经济子系统中，人均 GDP 与人口密度为主要障碍因子，未来应将提高 GDP 与合理控制人口作为推动水资源与社会经济耦合协调发展的首要任务。

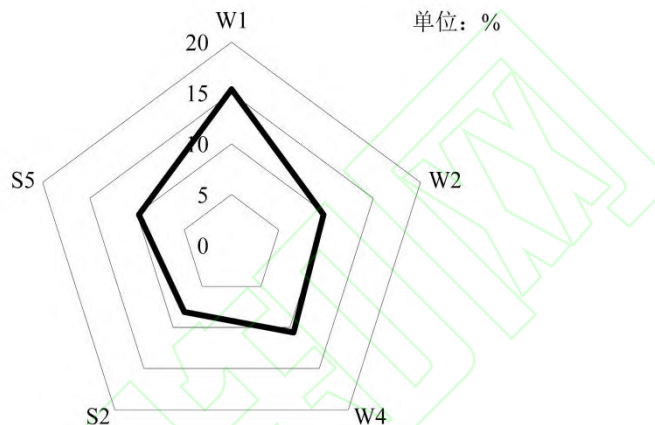


图 5 全国水资源-社会经济复合系统耦合协调发展障碍因子及其障碍度

Fig. 5 Factors and degrees of obstacles to the coordinated development of WRSE composite system in China

3.2.2 空间维度：31 省耦合协调发展障碍因子分析

为进一步分析影响 31 省 WRSE 复合系统耦合协调发展的障碍因子，依据各省 2010—2020 年障碍度均值分别得出排名前 3 位的障碍因子，如图 6 所示。

第一障碍因子：31 省中有 26 省（占比 84%）的第一障碍因子分布在水资源子系统，其中 20 省为人均水资源量 (W_1)，6 省为人均综合用水量 (W_4)；有 5 省的第一障碍因子分布在社会经济子系统，其中安徽、浙江为人口密度 (S_2)，吉林、江西与山西分别为第三产业产值占比 (S_7)、科技经费投入强度 (S_3)、人均 GDP (S_5)。

第二障碍因子：31 省中有 24 省（占比 77%）的第二障碍因子分布在水资源子系统，其中 7 省为人均水资源量 (W_1)，14 省为年径流深 (W_2)，其它 3 省则各有不同；有 7 省的第二障碍因子分布在社会经济子系统，其中 3 省为人均 GDP (S_5)，其它 4 省则各有不同。

第三障碍因子：31 省中有 14 省（占比 45%）的第三障碍因子分布在水资源子系统，有 17 省的第三障碍因子分布在社会经济子系统，其中 6 省均为第三产业产值占比 (S_7)。

在 31 省中排名前 3 位的障碍因子出现频次最高的指标为人均水资源量 (W_1)，出现 28 次；频次排名第二、第三的指标分别为年径流深 (W_2) 和人均综合用水量 (W_4)，分别出现 20 次、10 次；其余为第三产业产值占比 (S_7) 8 次、人均 GDP (S_5) 7 次与人口密度 (S_2) 6 次。可以看出，障碍因子分布空间差异性明显，北方地区受水资源子系统影响更为显著，南方地区则更易受社会经济子系统影响。

总体来看，影响全国 WRSE 复合系统耦合协调发展的障碍因子在水资源子系统中出现频次更高，其中北方地区更为显著，其次是社会经济子系统中的第三产业产值占比 (S_7)、人均 GDP (S_5) 与人口密度 (S_2)。因此，未来全国应优先调整用水结构，提升节水技术，注重水资源管理；其次，第三

产业产值占比与人均 GDP 的提高以及人口密度的调整也十分重要。

基于全国水资源与社会经济可持续发展的目标，发现无论“社会经济过慢发展型”还是“社会经济过快发展型”，均不利于复合系统的良性发展。例如，云南作为社会经济发展过慢但水资源丰沛的典型地区，其 2010、2015、2020 年耦合协调度值分别为 0.11、0.50、0.60，可以看出其水资源与社会经济的耦合协调水平并不高；北京作为社会经济发展过快但水资源短缺的典型地区，其 2010、2020、2015 年耦合协调度值分别为 0.31、0.49、0.51，其耦合协调水平同样较低。因此，需针对不同类型地区制定不同调控措施，维持水资源与社会经济的动态平衡，才能使水资源与社会经济实现可持续协调发展。

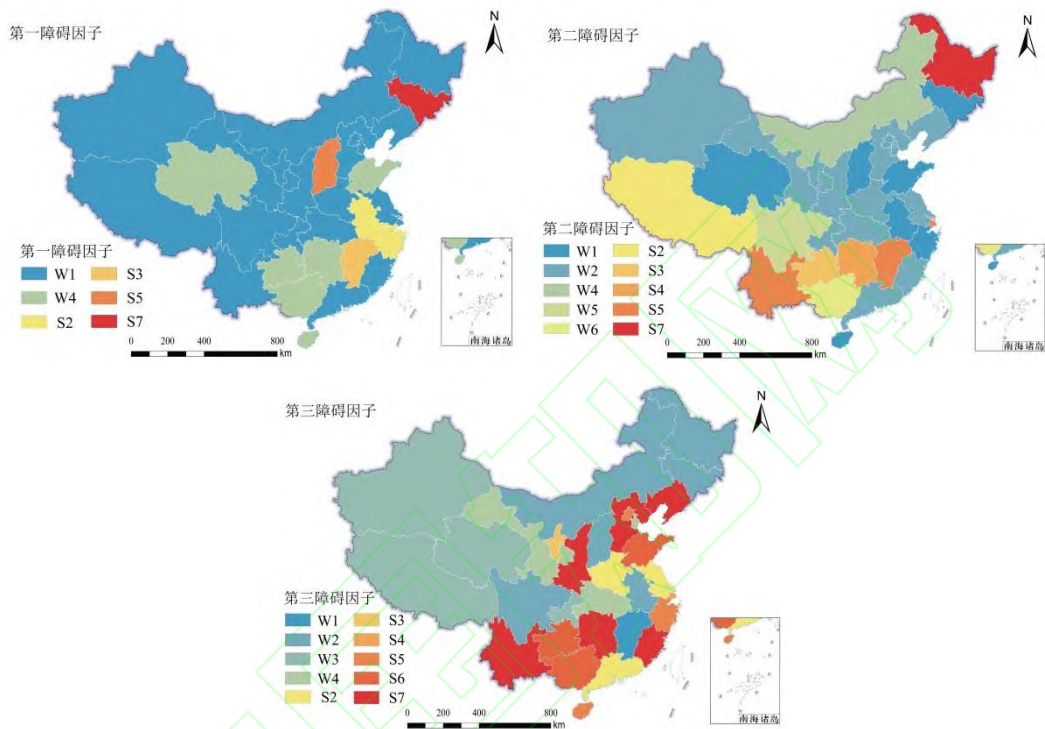


图 6 全国 31 省水资源-社会经济复合系统耦合协调发展障碍因子

Fig. 6 Obstacle factors of Coordinated development of WRSE composite system in 31 provinces of China

3.3 典型区域结果验证

选择湖北省作为典型区域，对其水资源与社会经济的耦合协调水平进行分析，如图 7 所示。2010—2020 年湖北省 WRSE 复合系统耦合协调度 D 总体呈现上升趋势，耦合协调度值 D 由 2010 年的 0.21 提高到 2020 年的 0.64，期间 2017—2019 年呈现一定幅度下降，2019—2020 年又恢复上升趋势。

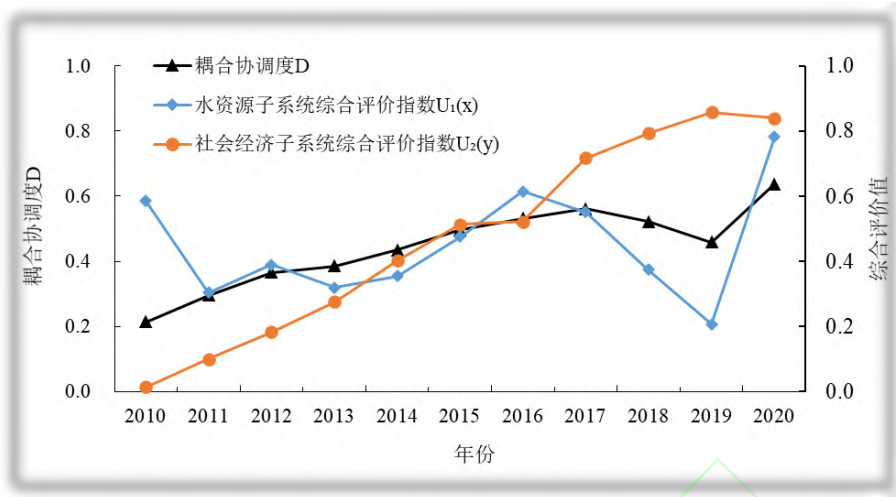


图 7 湖北省 2010—2020 年水资源和社会经济水平趋势及其耦合协调度

Fig. 7 Trends of water resources and socio-economic levels and their coupling coordination in Hubei Province from 2010 to 2020

分析 2017—2019 年湖北省 WRSE 复合系统耦合协调度下降的原因，发现其 2018 年、2019 年均属于偏枯年份，分别比多年平均偏少 17.3%和 40.8%。由于水资源量减少导致 2018 年、2019 年全省水资源开发利用增大，因此 2018 年、2019 年水资源水平较 2017 年大幅下降。而此期间，全省社会经济水平仍保持上升的态势，水资源水平降低社会经济水平提高，导致水资源与社会经济的耦合协调水平较之前有所减弱，因此耦合协调度值出现下降。

在此基础上进一步分析 2019—2020 年的变化趋势。2020 年湖北省作为中国国内受新冠疫情影响时间最长、程度最大的区域，生产、收入、消费、投资、外贸等各个方面都受到了巨大影响，GDP 增速由正转负，社会经济水平不增反降。同时，2020 年全省水资源总量比多年平均偏多 73.6%，属于丰水年份，在新冠疫情影响下全省用水总量有所减少，使得水资源水平较 2019 年有所提升。由于 2020 年之前两年湖北省水资源与社会经济协调性较差，虽然 2020 年社会经济水平下降，但水资源水平提升反而使水资源与社会经济两子系统间差距不断减小，使得二者协调性有所提高，因此 2020 年耦合协调度值出现上升，达到 0.64。

通过分析湖北省水资源与社会经济耦合协调发展水平变化趋势，揭示了水资源与社会经济耦合协调变化的内在原因，对二者的协调调控具有参考意义。

4 结论

本文通过构建耦合协调评价指标体系及耦合协调度模型，评价了全国及 31 省 WRSE 复合系统的耦合协调关系，并通过障碍度函数分析了影响水资源与社会经济耦合协调发展的主要障碍因子，主要结论如下：

(1) 全国 WRSE 复合系统的耦合协调度整体呈现出波动上升趋势，2020 年达到高度耦合协调水平，但仍具有提升空间，未来可通过调控使得水资源与社会经济的耦合协调水平进一步提升；

(2) 2010—2020 年全国各省耦合协调度总体呈现上升趋势，其变化趋势表现为“上升型、平稳型、波动型”三种不同类型；2020 年，全国多数省份水资源与社会经济的耦合协调水平达到了协调阶段，当地水资源与社会经济之间实现相互支撑、共同发展。

(3) 水资源与社会经济两个子系统均存在影响耦合协调发展的障碍因子，水资源子系统主要是人均水资源量、年径流深以及人均综合用水量，社会经济子系统主要为第三产业产值占比、人口密度与人均 GDP；主要障碍因子存在明显的空间差异性，北方受水资源子系统的影响更为显著，需针对不同地区制定不同调控措施，为全国层面社会经济发展布局及适水发展调控提供科学依据。

水资源与社会经济的耦合协调关系研究尚处于探索阶段，本文表明通过选择具有较好代表性和适

用性的评价指标可以建立简便有效的评价方法，为区域水资源与社会经济的耦合协调关系研究和决策调控提供参考。但耦合协调度模型在使用中仍存在一些不足，例如构建指标时存在主观性，不同研究者之间结果的不可比性，以及当研究区域或时间序列发生变化时导致的结果的波动性等。耦合协调模型的构建和应用涉及多方面的因素，指标选择、评价方法、合理阈值设定以及数据可获取性等方面均有较大影响，仍有待深入研究，如指标选择和赋权方法可以结合评价区域实际情况进一步优化；其次，应进一步分析水文随机性以及水资源可利用条件（如过境水、外调水）等影响，通过合理分析界定，使结果更加科学。此外，受资料限制，本文仅在全国和省级尺度上开展了研究，未来可以针对更大和更小的尺度进行评价，通过国家间对比分析全国协调程度水平，通过市县层面分析区域内部均衡性，为提高区域水资源与社会经济发展协调性提供全面支撑。

参考文献：

- [1] 喻笑勇,张利平,陈心池,等.湖北省水资源与社会经济耦合协调发展分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):809-817.
YU Xiaoyong, ZHANG Liping, CHEN Xinchu, et al. Analysis of Coupling and Coordinated Development Between Water Resources and Social Economy in Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4): 809-817.
- [2] 张吉辉,李健,唐燕.中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析[J].资源科学,2012,34(8):1546-1555.
ZHANG Jihui, LI Jian, TANG Yan. Analysis of the Spatio-Temporal Matching of Water Resource and Economic Development Factors in China[J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1546-1555.
- [3] 邵嘉羽,唐莲,张静,等.基于TOPSIS法的银川市水资源可持续利用评价[J].宁夏工程技术,2017,16(3):281-285.
SHAO Jiayu, TANG Lian, ZHANG Jing, et al. Assessment system of water resource sustainable utilization in Yinchuan based on TOPSIS model[J]. Ningxia Engineering Technology, 2017, 16(3): 281-285.
- [4] 吕王勇,陈美香,王波,等.基于主成分的区域水资源与社会经济的协调度评价[J].水资源与水工程学报,2011,22(1):122-125.
LYU Wangyong, CHEN Meixiang, WANG Bo, et al. Coordination evaluation between regional water resources and socio-economic Based on principal component[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(1): 122-125.
- [5] 盖美,李伟红.基于可变模糊识别模型的大连市水资源与社会经济协调发展研究[J].资源科学,2008(8):1141-1146.
GAI Mei, LI Weihong. Variable Fuzzy Recognition Applied to Dalian Water Resources and Coordinated Socio-Economic Development[J]. Resources Science, 2008(8): 1141-1146.
- [6] 周校培,陈建明.南京市水资源与社会经济耦合协调发展研究[J].水利经济,2016,34(4):26-30.
ZHOU Xiaopei, CHEN Jianming. Coupling coordination development of water resources and social economy in Nanjing City[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(4): 26-30.
- [7] 刘浩锋,吴金凤,陈璇璇,等.水资源系统与社会经济系统的灰色关联度分析[J].热带地貌,2020,41(1):31-36.
LIU Haofeng, WU Jinfeng, CHEN Xuanxuan, et al. Analysis of Grey Correlation Degree between Water Resources System and Socio-economic System[J]. Tropical Geomorphology, 2020, 41(1): 31-36.
- [8] 李想,郭丹红,刘家宏,等.京津冀协同发展背景下的县域水资源安全诊断[J].水利水电技术(中英文),2021,52(10):59-71.
LI Xiang, GUO Danhong, LIU Jiahong, et al. Assessing water resource security in the Beijing-Tianjin-Hebei region at county level in the context of regional synergistic development[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(10): 59-71.
- [9] ZHU H, ZHU J, ZOU Q. Comprehensive analysis of coordination relationship between water resources environment and high-quality economic development in urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River[J]. Water, 2020, 12(5): 1301.
- [10] FAN Y, FANG C, ZHANG Q. Coupling coordinated development between social economy and ecological environment in Chinese provincial capital cities—assessment and policy implications[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 289-298.
- [11] SHI T, YANG S, ZHANG W, et al. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment: Empirical evidence from tropical and subtropical regions of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118739.
- [12] ZHANG K, SHEN J, He R, et al. Dynamic analysis of the coupling coordination relationship between urbanization and water resource security and its obstacle factor[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4765.
- [13] 盖美,王宇飞,马国栋,等.辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价[J].自然资源学报,2013,28(12):2081-2094.
GAI Mei, WANG Yufei, MA Guodong, et al. Evaluation of the Coupling Coordination Development between Water Use Efficiency and Economy in Liaoning Coastal Economic Belt[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2081-2094.
- [14] CUI D, CHEN X, XUE Y, et al. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale—A case study of Kunming[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 234: 189-199.
- [15] LIU Y, YANG L Y, JIANG W. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality—a case study from Nansi Lake Catchment, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 119(Dec): 106870.1-106870.13.
- [16] 张凤太,苏维钧.水资源与经济社会系统耦合协调时空分异研究——以贵州省为例[J].人民长江,2016,47(10):25-30.
ZHANG Fengtai, SU Weric. Spatial-temporal difference of coupling and coordination of water resources with economic and social systems in Guizhou Province[J]. Yangtze River, 2016, 47(10): 25-30.
- [17] 杜湘红.水资源环境与社会经济系统耦合建模和仿真测度——基于洞庭湖流域的研究[J].经济地理,2014,34(8):151-155.
DU Xianghong. The Coupling Modeling and Simulation Measure Between Water Resource & Environment and Socio-Economic System Based on Dongting Lake Basin[J]. Economic Geography, 2014, 34(8): 151-155.
- [18] 申晓晶.基于协同论的水资源配置模型及应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2018.
SHEN Xiaojing. Research on Synergetics Theory-based Water Resources Allocation Model and Its Application[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018.
- [19] 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(3):4-7.
ZHONG Linjuan, FANG Guohua, GUO Yanheng, Researches on the relationship among water resources, social economy and ecological environment[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2007(3): 4-7.
- [20] 李爱花,李原园,郦建强.水资源与经济社会及生态环境系统协同发展初探[J].人民长江,2011,42(18):117-121.
LI Aihua, LI Yuanyuan, LI Jianqiang. Preliminary discussion on synergetic development between water resources and social economy and eco-environment[J]. Yangtze River, 2011, 42(18): 117-121.
- [21] 郑江丽,李兴拼.基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J].水资源保护,2021,37(5):30-35.
ZHENG Jiangli, LI Xingpin. Evaluation model of regional water resources carrying capacity based on coordination[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 30-35.
- [22] 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 Pei, WANG Jinyu, HUA Wei, 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.
- [23] 回晓莹,汪党献,龙爱华,等.水资源复合系统协调性指标体系构建与调控措施研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2011,9(3):188-194.
HUI Xiaoying, WANG Dangxian, LONG Aihua, Discussion on factors influencing the economy of long-term compensation for resettlement of reservoirs[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011,9(3):188-194.
- [24] 王晓宇,袁汝华.长江经济带水资源开发利用与社会经济协调发展协调演进分析[J].软科学,2021,35(11):106-114.
WANG Xiaoyu, YUAN Ruhua. Research on the Coordinated Evolution Between the Development and Utilization of Water Resources and the Comprehensive Development of Society and Economy in the Yangtze River Economic Zone[J]. Soft Science, 2021, 35(11): 106-114.
- [25] 张辉,赵秋红.基于主成分分析基本原理的经济指标的筛选方法[J].山东财政学院学报,2013(2):52-61.
ZHANG Hui, ZHAO QiuHong. An Economic indicator Screening Method Based on Fundamental Principle of Principal Components Analysis[J]. Journal of Shandong University of Finance and Economics, 2013(2):52-61.
- [26] 谢纪强,游进军,姜纪沂.基于级差最大化组合赋权法的地下水功能评价[J].水资源保护,2021,37(6):54-59.
XIE Jiqiang, YOU Jinjun, JIANG Jiyi. Using level difference maximization method to calculate combined weights for groundwater function evaluation[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 54-59.
- [27] 苏为华.多指标综合评价理论与方法问题研究[D].厦门:厦门大学,2000.
SU Weihua. Research on the theory and method of multi-index comprehensive evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- [28] 田培,韩昊廷,李佳,等.农业经济系统与水资源环境系统耦合协调关系研究:以湖南省为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2022,56(2):311-322.
TIAN Pei, HAN Haoting, LI Jia, et al. Research on the coupling coordinating relationship between agricultural economy system and water resources environment system: a case study of Hunan Province[J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2022, 56(2): 311-322.
- [29] 邢霞,修长百,刘玉春.黄河流域水资源利用效率与经济协调关系的耦合协调关系研究[J].软科学,2020,34(8):44-50.
XING Xia, XIU Changbai, LIU Yuchun. Research on Coupling and Coordination Relationship between Water Resources Utilization Efficiency and Economic Development[J]. Soft Science, 2020,34(8):44-50.
- [30] 伏吉芮,瓦哈甫·哈力克,姚一平.吐鲁番地区水资源-经济-生态耦合协调发展分析[J].节水灌溉,2016(12):94-98.
FU Jirui, WA Hafuhalike, YAO Yiping. Analysis of coupling coordinated development of water resources-economic-ecological system in Turpan area[J]. Water Saving Irrigation, 2016(12):94-98+102.
- [31] 彭焕智,周国华,崔树强,等.湘江流域土地利用多功能性评价及障碍因子识别[J].水土保持研究,2022,29(4):1-8.
PENG Huanzhi, ZHOU Guohua, CUI Shuqiang, et al. Evaluation and obstacle factor identification of multifunctionality of land use in Xiangjiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 1-8.