

黄河流域典型地区人水关系耦合与调控

王红瑞¹, 丁雨涵¹, 李 敏^{1,2}, 王洪冲¹, 张 力¹, 李一阳¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:选取银川市、西安市、东营市分别作为黄河流域上、中、下游的典型地区, 将人水关系解构为水、城、地、人、产 5 个子系统, 构建了综合评价指标体系, 并结合 Tapio 脱钩模型、LMDI 分解模型、障碍度模型以及 Liang-Kleeman 信息流等方法, 探讨了黄河流域典型地区水资源利用与经济发展之间的脱钩情况及其驱动因素。结果表明: 黄河流域典型地区经济增长已基本实现与水资源增长的脱钩, 但不同地区用水总量的驱动因素存在显著差异; 水子系统是制约黄河流域协调发展的关键因素, 尤其在水资源管理和利用效率方面仍有待提升; 不同地区人水关系矛盾存在着显著差异, 银川市表现为本地水资源匮乏导致高度依赖黄河水、生态用水保障与农业需水竞争突出, 西安市表现为人口与经济的集聚加剧了水资源短缺、地下水超采与生态用水挤占问题并存, 东营市表现为水土资源匹配度低、工业用水需求大的双重压力深刻影响当地人水关系。

关键词:人水关系; 脱钩理论; 障碍度; 驱动因素; 黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0132-10

Coupling and regulation of human-water relationship in typical areas of the Yellow River Basin//WANG Hongrui¹, DING Yuhuan¹, LI Min^{1,2}, WANG Hongchong¹, ZHANG Li¹, LI Yiyang¹ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Yinchuan City, Xi'an City, and Dongying City were selected as typical areas in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin, respectively. The human-water relationship was deconstructed into five subsystems: water, city, land, human, and production. A comprehensive evaluation index system was constructed, and combined with Tapio decoupling model, LMDI decomposition model, obstacle model, and Liang Kleiman information flow methods, the decoupling situation and driving factors between water resource utilization and economic development in typical areas of the Yellow River Basin were explored. The results indicate that the economic growth in typical areas of the Yellow River Basin has basically decoupled from the growth of water resources, but there are significant differences in the driving factors of total water use in different regions. The water subsystem is the key factor restricting the coordinated development of the Yellow River Basin, especially in terms of water resource management and utilization efficiency, which still needs to be improved. There are significant differences in the contradictions of human-water relationship in different regions. Yinchuan City is highly dependent on the Yellow River water caused by lacks local water resources, and the competition between ecological water security and agricultural water demand is prominent. The agglomeration of population and economy in Xi'an City has exacerbated the problems of water scarcity, overexploitation of groundwater, and ecological water use encroachment. Dongying City is deeply affected by the dual pressure of low matching of water and soil resources and high demand for industrial water, which has a profound impact on local human-water relationship.

Key words: human-water relationship; decoupling theory; obstacle degree; driving factor; the Yellow River Basin

目前, 国内外普遍面临人水关系紧张的问题, 这种矛盾在水资源匮乏地区尤为突出^[1-3]。人类活动, 如城市扩张、土地利用变化、产业结构调整等, 直接影响水资源的供需平衡, 而水资源的量与质又制约着社会经济发展模式的选择^[4-5]。因此, 深入探讨人

水关系, 寻找科学合理的协调机制, 已成为实现可持续发展的关键。

人类对水资源的需求表现出强烈的指向性、定量性和区域性特点^[6-7]。具体来说, 人类社会需要稳定且可预测的水资源供应来满足日常生活、农业灌

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279005)
作者简介: 王红瑞(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

溉、工业生产、生态保护等多方面需求。然而,这种对水资源的固定和量化需求与水资源本身的自然流动性和变化性形成了鲜明的对立,从而引发了一系列人水关系的矛盾^[8-11]。近年来,国内外学者围绕人水关系、人水矛盾等问题开展了大量研究。例如:张家诚^[12]回顾了人水关系的历史演变,强调了水资源作为生命之源的重要性;左其亭等^[13]聚焦黄河流域复杂的人水关系作用机理,提出了基于和谐调控理论的方法;王红瑞等^[14]通过对长江经济带水-能-粮流通及压力变化的研究,揭示了区域内资源流动格局与资源配置不协调的问题;Boulay 等^[15]综述了量化水资源稀缺性和用水对人类健康影响的方法,比较了不同模型的关键选择和差异;Bruce 等^[16]从存在复杂关联的人类、社会、生态 3 个方面解释了水并不应该是消费品,而人水关系应该被定义为一个复杂的实体。当前的研究多聚焦于人水关系的单一维度解析,如水资源承载力评估^[17]、用水效率测算^[18]、生态需水保障^[19-20]等,未能充分体现新时期“四水四定”要求的系统性治理思维。这种研究模式导致在应对复合型人水矛盾时,容易面对政策协同性不足、空间适配度欠缺等现实困境。

鉴于此,本文突破传统单维度解析框架,构建多层级评价指标体系,引入 Tapio 脱钩模型、LMDI 分解模型、障碍度模型、Liang-Kleeman 信息流等方法,深入剖析黄河流域人水关系的子系统之间的因果驱动关系,揭示影响黄河流域人水关系的关键因素及其作用机制,从而提出因地制宜的调控路径。

1 研究区选取与数据来源

1.1 研究区选取

为研究黄河流域的人水关系,分析水资源利用与社会经济发展之间的复杂互动机制,从黄河流域上、中、下游分别选取银川市(上游)、西安市(中游)和东营市(下游)作为典型地区,展开人水关系研究,研究区概况见图 1。银川市是宁夏回族自治区省会,全境位于黄河流域上游,多年平均水资源量仅 1.473 亿 m³,高度依赖黄河过境水;西安市是陕西省省会,以占全省 6.14% 的水资源量承载了 32.55% 的人口,人均水资源量不足全国均值的 1/3;东营市位于山东省东北部,作为黄河入海口城市,多年平均水资源量 6.05 亿 m³,占全省 2.06%,南水北调供水利用率不足与生态用水需求增长的矛盾突出。3 个城市分别代表流域上游过境水依赖型、中游高度缺水型及下游河口生态敏感型的人水关系。

1.2 数据来源

本文选取 2000—2021 年为研究时段。社会经

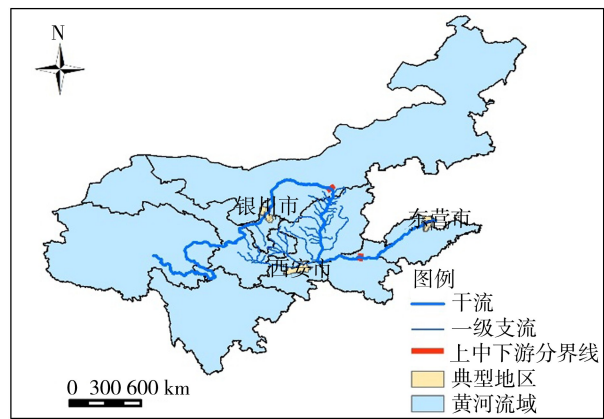


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

济数据主要来自《银川市统计年鉴》《宁夏回族自治区统计年鉴》《西安市统计年鉴》《陕西省统计年鉴》《东营市统计年鉴》《山东省统计年鉴》《中国城市统计年鉴》;水资源利用等数据主要来自各省市的水资源公报。

2 研究方法

将人水关系解构为水、城、地、人、产 5 个子系统,构建综合评价指标体系,结合 Tapio 脱钩模型、LMDI 分解模型、障碍度模型以及 Liang-Kleeman 信息流等方法,探讨黄河流域典型地区水资源利用与经济发展之间的脱钩情况及其驱动因素。研究流程如图 2 所示。

2.1 综合评价指标体系构建

在对银川市、西安市、东营市水资源利用分析的基础上,针对人水关系中涉及的水、城、地、人、产各子系统的特点,参考左其亭等^[21-22]的研究,秉承科学性、可靠性、可操作性的原则,构建黄河流域典型地区人水关系综合评价指标体系,如图 3 所示,图中“+”表示正向指标,“-”表示负向指标。

采用模糊隶属度法对单指标进行量化,将所有指标值都映射到[0,1]上。指标权重对最终评价结果的精准度有很大影响,本文选取层次分析法确定主观权重,熵权法确定客观权重,进而结合确定综合权重。采用多指标综合加权方法计算各准则层得分,根据不同准则层计算结果,对各指标隶属度进行加权,得出最后的人水关系综合评价值。本文认为,水、城、地、人、产 5 个子系统对于人水关系评价重要性相当,因此 5 个准则层的权重均为 1/5。

2.2 Tapio 脱钩模型

基于 Tapio 脱钩理论^[23-24],对黄河流域典型地区水资源利用与经济发展之间脱钩情况进行测算,构建了水资源利用与 GDP 的脱钩弹性表达式:

$$e = \left(\frac{\Delta W}{W} \right) / \left(\frac{\Delta G}{G} \right) \quad (1)$$

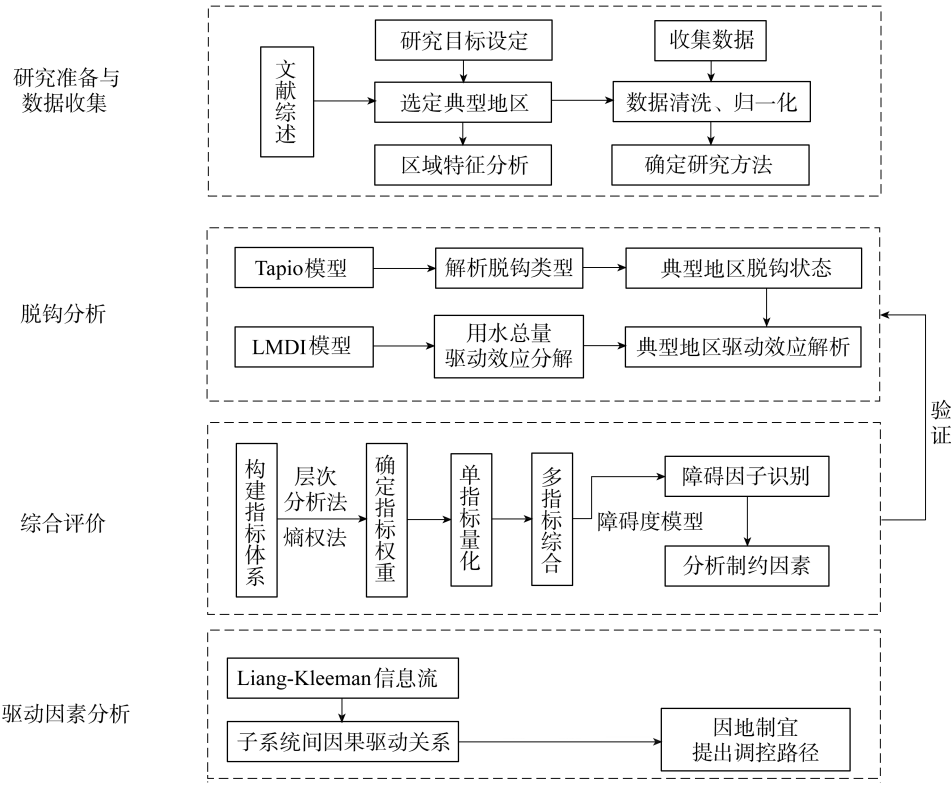


图 2 研究流程
Fig. 2 Research flowchart

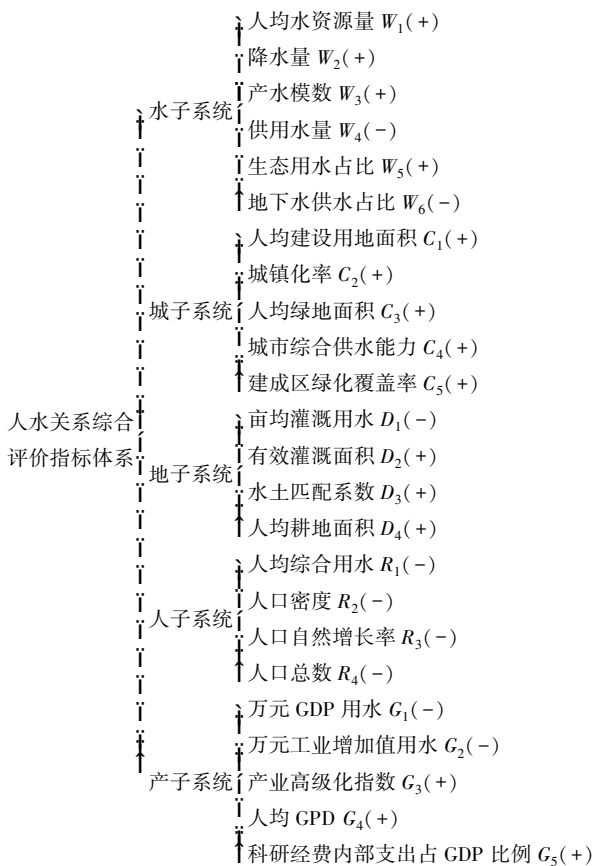


图 3 黄河流域典型地区人水关系综合评价指标体系
Fig. 3 Comprehensive evaluation index system for human-water relationship in typical areas of the Yellow River Basin

式中: e 为脱钩指数; W 为计算时段初的用水总量; ΔW 为计算时段内的水资源总量变化值; G 为计算时段初的 GDP 总值; ΔG 为计算时段内的 GDP 变化值。根据脱钩指数的大小、水资源总量以及 GDP 变化的正负情况对脱钩状态进行分类,如图 4 所示。

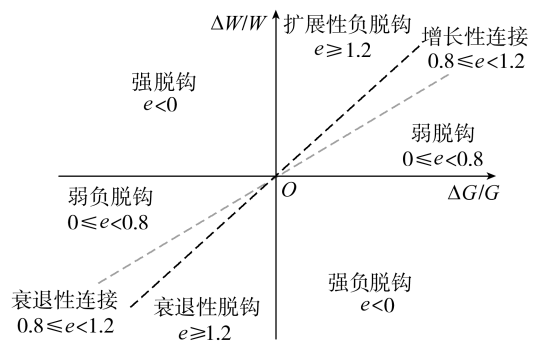


图 4 脱钩类型判断示意图

Fig. 4 Judgment schematic diagram of decoupling types

2.3 LMDI 分解模型

仅依赖脱钩分析并不能全面揭示影响黄河流域典型地区水资源总量变化的复杂因素。为了更深入地探讨限制研究区水资源总量的关键驱动因素,引入 LMDI 分解模型,具体表达式为

$$W_r = \sum_i W_i = \sum_i Q_i S_i CLBP \quad (2)$$

式中: W_r 为水资源总量; W_i 为产业 i 的水资源量; Q_i 为产业 i 用水量指标; S_i 为产业 i 产值占 GDP 的比

例指标; C 为地区单位面积耕地产值指标; L 为土地利用结构指标; B 为人均建设用地指标; P 为地区人口指标。

2.4 障碍度模型

为量化识别不同评价指标对黄河流域典型地区人水关系耦合协调发展水平的影响程度,引入障碍度模型。障碍度能够衡量各评价指标对系统耦合协调发展水平的影响程度,若某项指标的障碍度越小,表明耦合协调度发展水平受该项指标的阻碍作用越弱,障碍度越大,表明耦合协调发展水平受该项指标的阻碍作用越强^[25-26],计算公式为

$$Z_j = \frac{R_j w_j}{\sum_{j=1}^m R_j w_j} \times 100\% \tag{3}$$

其中 $R_j = 1 - r_j$
式中: Z_j 为指标 j 的障碍度; R_j 为指标 j 的偏离度; r_j 为指标 j 标准化后的值; w_j 为指标 j 的权重; m 为指标数量。

2.5 Liang-Kleeman 信息流

Liang-Kleeman 信息流能够以定量的方式分析变量之间的因果驱动机制^[27]。针对两个时间序列 X_1 和 X_2 ,经过量化的因果驱动机制能够确定 X_1 与 X_2 之间的信息交换量,给出因果驱动机制的方向,得到从 X_2 向 X_1 传输的信息流的最大似然估计^[28-29],计算公式为

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11} C_{12} C_{d21} - C_{12}^2 C_{d11}}{C_{11}^2 C_{22} - C_{11} C_{12}^2} \tag{4}$$

式中: $T_{2 \rightarrow 1}$ 为 X_2 向 X_1 传输的信息流; C_{12} 为 X_1 与 X_2 的方差; C_{d12} 为 X_1 与 X_2 的协方差。理论上, $T_{2 \rightarrow 1} = 0$ 表明 X_2 不能引起 X_1 ,即 X_2 不是 X_1 的因, X_1 的发展独立于 X_2 ;否则表明 X_2 有作用于 X_1 ,即 X_2 是 X_1 的因^[30]。计算过程中信息流为负值表明物理意义尚未明确,而因果分析中只需要判断信息流的数值大小,因此本文取其绝对值进行分析。

3 结果与分析

3.1 用水总量与 GDP 脱钩分析

图 5 为 2000—2021 年黄河流域典型地区 GDP 和用水总量,可见 2000—2021 年银川市、西安市、东营市经济发展均呈现稳定增长的趋势。图 6 为黄河流域典型地区脱钩类型判断结果,可见 2000—2021 年银川市、西安市、东营市用水总量与经济发展之间基本处于强脱钩、弱脱钩两种状态,占比达 85%以上,说明三市水资源利用与经济发展之间基本属于协调的关系。结合图 5 与图 6 可以发现,银川市的用水总量整体呈现波动下降的趋势,脱钩指

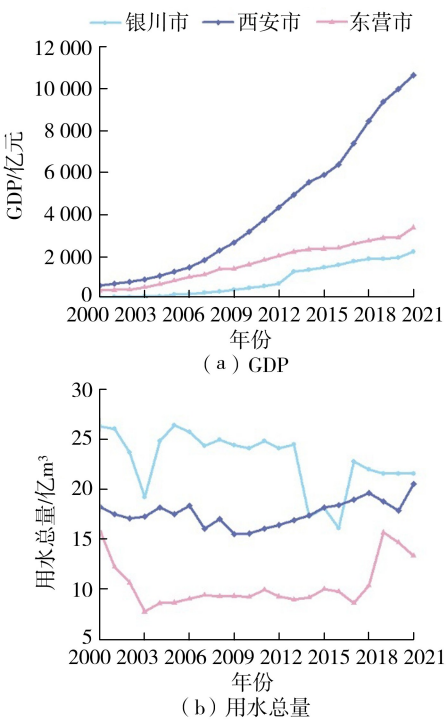


图 5 2000—2021 年黄河流域典型地区 GDP 和用水总量
Fig. 5 GDP and total water consumption of typical areas in the Yellow River Basin from 2000 to 2021

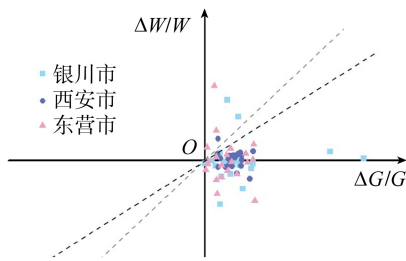


图 6 黄河流域典型地区脱钩类型判断结果
Fig. 6 Judgment results of decoupling types in typical areas of the Yellow River Basin

数也呈现波动变化,基本处于强脱钩状态与弱脱钩状态之间不断转化,仅在 2004 年、2017 年呈现扩展性负脱钩,即经济发展依赖于水资源的消耗;究其原因,发现 2004 年、2017 年银川市水资源利用量较上年有突增,暂时打破了经济增长与水资源利用之间良性的脱钩模式;但银川市展现出了较好的韧性和适应能力,能够较快地调整并恢复到正常状态。西安市用水总量整体呈现“U 形”变化,脱钩指数除 2021 年外基本处于强脱钩状态与弱脱钩状态之间不断转化,弱脱钩年份占比达 60%;这种模式说明西安市在经济持续增长的同时,成功实现了对水资源消耗的有效控制,避免了经济增长过度依赖于水资源的增加,属于水资源利用与经济发展相对协调的区域。东营市用水总量整体也呈“U 形”变化,但变化幅度相较于西安市更剧烈;脱钩指数方面,除 2015 年、2018 年、2019 年呈现扩展性负脱钩外,基

本处于强脱钩状态与弱脱钩状态之间不断转化;在经历了一段时期的用水总量减少后,东营市的用水需求开始回升,这期间的变化幅度较大,显示出当地在面临经济增长时水资源管理面临的挑战;在2015年、2018年、2019年,由于工业扩张、农业灌溉需求激增等因素导致了短期内对水资源的高需求,使得经济发展暂时重新依赖于水资源的消耗;整体上看,东营市在大多数年份中保持了相对稳定的脱钩状态。总体而言,黄河流域典型地区的水资源利用与经济发展已基本实现相对脱钩,表明经济增长不再过度依赖水资源的消耗,然而在水资源保障和利用效率方面,仍有着一定的提升空间。

3.2 用水总量驱动效应分解

图7为黄河流域典型地区用水总量的驱动效应分解。可以看出,2000—2021年黄河流域典型地区用水总量驱动效应中用水强度效应、产业结构效应、用地结构效应整体呈现负效应,而耕地规模效应、城市规模效应及人口效应呈现显著的正效应。具体到各市,2000—2021年银川市用水总量各驱动效应贡献率呈现波动变化,用水强度效应是主要的负效应,对用水总量减少起着关键作用;产业结构效应、用地结构效应、耕地规模效应是主要的正效应,提升水资源利用效率以及控制耕地规模将是银川市控制用水总量的主要方向。2000—2021年西安市用水总量各驱动效应均呈现波动变化,产业结构效应、人口效应变化相对平稳,其余效应对总效应变化的贡献均较大,其中用水强度效应与用地结构效应是主要的负效应,耕地规模效应是主要的正效应;提升水资源利用率、优化用地结构以及控制耕地规模是西安市控制用水总量的主要方向。2000—2021年东营市用水总量各驱动效应中,用水强度效应呈现“U”形变化,但整体上仍是最主要的负效应,耕地规模效应是东营市用水量增加的主要因素;对于东营市而言,未来应继续提升水资源利用效率,同时需要更加注重调控耕地规模,探索更有效的农业节水模式。

3.3 人水关系综合评价与驱动因素分析

3.3.1 人水关系综合评价

图8为2000—2021年黄河流域典型地区人水关系综合评价值。由图8可见,黄河流域典型地区人水关系综合评价值整体呈增长趋势,反映地区水资源利用与社会发展协调程度不断改善,但仍有一定的优化空间。具体到各市,综合评价值呈现西安市与东营市相当、均大于银川市的格局。2000—2003年银川市的综合评价值提升较快,随后进入波动变化的时期,2014年较2013年有显著提升之后,进入平稳增长阶段;西安市的综合评价值在2004年

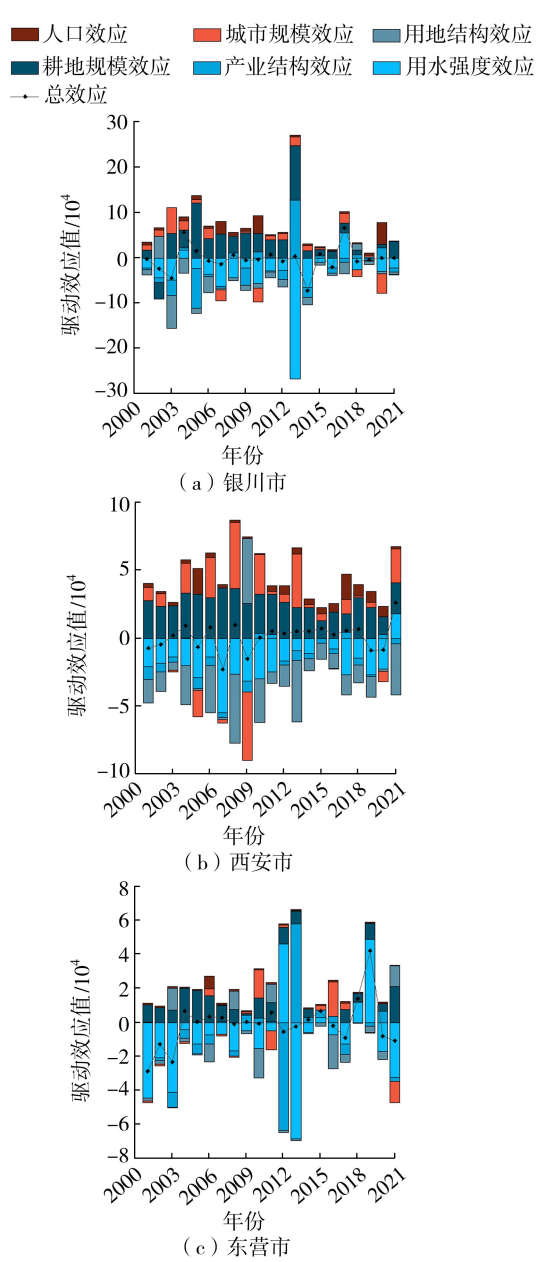


图7 黄河流域典型地区用水总量的驱动效应分解
Fig.7 Decomposition of driving effect for total water consumption in typical areas of the Yellow River Basin

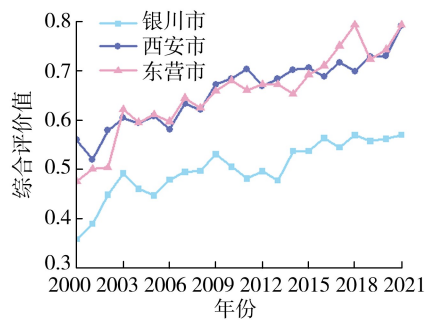


图8 2000—2021年黄河流域典型地区人水关系综合评价值
Fig.8 Comprehensive evaluation value of human-water relationship in typical areas of the Yellow River Basin from 2000 to 2021

较之前有显著提升,随后进入相对快速增长阶段,2019 年有所回落,但整体呈现积极增长的趋势;2000—2021 年东营市的综合评价价值整体呈现稳步增长的趋势,波动幅度较小,水资源利用与社会发展协调性持续向好发展。

图 9 为 2000—2021 年黄河流域典型地区各子系统评价价值。由图 9 可见,银川市各子系统评价价值呈现城>产>人>水>地的格局,其中城子系统在 2009 年有较为显著的提升,随后进入稳步增长的阶段,产子系统整体呈现增长的趋势,在 2014 年提升较为显著,其余人、水、地子系统整体上处于平稳波动变化的状态;银川市未来发展中应注重增强水资源管理效能和土地使用效率,同时持续优化人口构成,可促进各子系统的协调发展和整体进步。西安

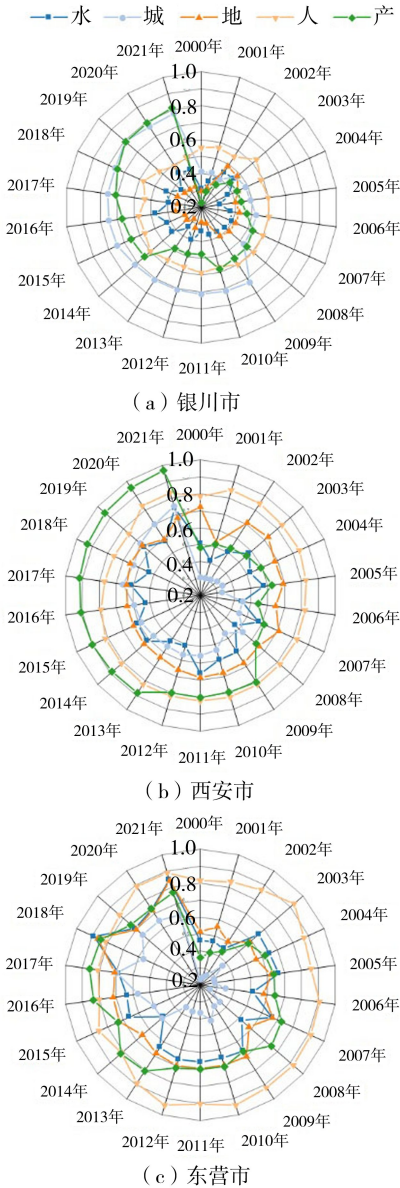


图 9 2000—2021 年黄河流域典型地区各子系统评价价值
Fig. 9 Evaluation values of various subsystems in typical areas of the Yellow River Basin from 2000 to 2021

市各子系统评价价值呈现产>人>地>水≈城的格局,除产子系统呈现增长的趋势外,其他子系统均处于波动变化的状态,这反映出西安市在不同发展阶段面临的多重挑战与机遇,产业子系统的稳步上升彰显了经济发展的强劲势头,而其他子系统的波动则表明在水资源管理、人口结构优化、土地利用以及城市化进程方面,仍需进一步加强协调和优化。东营市各子系统评价价值呈现人>产>地>水>城的格局,各子系统均处于波动变化的状态,城、地、产 3 个子系统评价价值整体属于波动上升的趋势,水子系统波动程度最大;东营市子系统大多呈现向好态势,但稳定性较差,未来应着力增强各子系统的稳定性和协调性,特别是通过优化水资源管理和提升城市规划水平,确保经济社会发展的持续性和韧性。

3.3.2 障碍度分析

图 10 为 2000—2021 年黄河流域典型地区各子系统障碍度热图。由图 10 可见,银川市、西安市和东营市的水子系统障碍度的多年平均值分别为 32.37%、34.56% 和 31.24%,水子系统是制约黄河流域典型地区水资源利用与经济社会协调发展的主要因素。这与用水总量驱动效应分解的结果相呼应,表明尽管经济增长已基本实现与水资源增长的脱钩,但水子系统的管理效率和利用水平仍需进一步提升,以确保其他子系统的协同发展和进步。此外,优化水资源配置和提高用水效率将是未来改善人水关系的关键所在。从时间尺度看,银川市与西

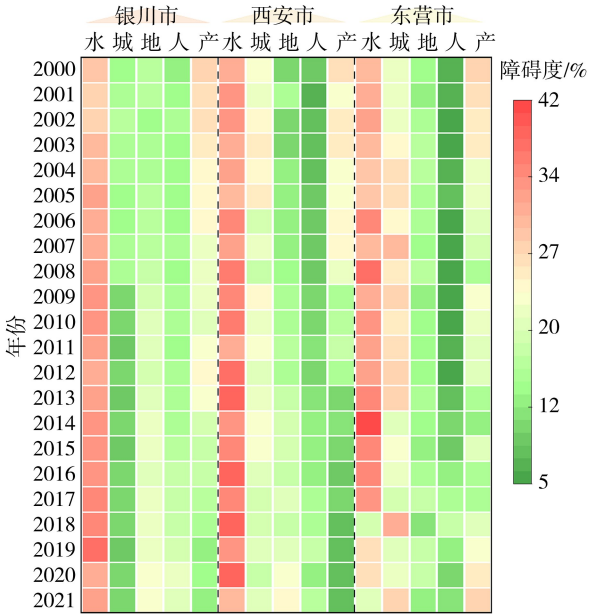


图 10 2000—2021 年黄河流域典型地区各子系统障碍度热图

Fig. 10 Heat map of obstacle degree of various subsystems in typical areas of the Yellow River Basin from 2000 to 2021

安市水、地、人3个子系统障碍度均呈现波动增长的趋势,城、产两个子系统则呈波动下降趋势;东营市各子系统障碍度变化差异较大,水、城、产子系统障碍度呈现“倒U”形变化,地、人子系统呈现波动增长的态势。至2021年,银川市各子系统障碍度呈现水>产>地>人>城的格局,除了水资源外,制约地区人水关系综合评价的主要因素是经济发展及土地利用。而对于经济发展相对较好的西安市,各子系统障碍度则呈现水>城>产≈地>人的格局,城市建设用地、规划是次于水资源的制约因素。东营市与西安市类似,但其产业、经济发展对人水关系综合评价的制约程度较西安市更大,各子系统障碍度呈现水>城>产>地>人的格局。

图11为黄河流域典型地区各指标障碍度箱型图。由图11可见,制约银川市人水关系协调发展前5位的因素分别为生态用水占比(障碍度为9.52%)、人口总数(7.74%)、产水模数(7.58%)、水土匹配系数(7.50%)、城市综合供水能力(5.99%)。制约因素反映了银川市存在着高度依赖黄河过境水、本地水资源匮乏等现状,这导致生态用水需求与有限的水资源供给之间存在矛盾,同时人口增长加剧了水资源压力,影响城市的可持续发展。

制约西安市人水关系协调发展前5位的因素分别为地下水供水占比(10.16%)、生态用水占比(8.64%)、人口密度(8.31%)、人均绿地面积(8.22%)、人均耕地面积(8.00%)。西安市作为人口密集的大都市,高人口密度和快速的城市化进程增加了对地下水资源的依赖,而生态用水需求的增长进一步挤占了有限的水资源,导致水资源管理面临较大挑战。制约东营市人水关系协调发展前5位的因素分别为生态用水占比(10.10%)、水土匹配系数(9.87%)、产水模数(9.77%)、城市综合供水能力(7.74%)、产业高级化指数(7.57%)。东营市地处黄河入海口,虽然拥有一定的水资源,但其水土资源匹配不佳,且产业结构偏重工业,对水资源的需求量大,这使得生态用水和城市供水之间的平衡难以维持,制约了城市的高质量发展。

3.3.3 驱动因素分析

分别以水、城、地、人、产子系统评价价值作为 X_1 、 X_2 序列,利用Liang-Kleeman信息流分析各子系统之间的因果驱动关系,计算结果见表1,因果驱动关系见图12,图中箭头颜色越深表示影响程度越大。由表1和图12可见,银川市用水矛盾核心是过境水依赖下的耕地扩张与生态用水挤占。银川市的城市

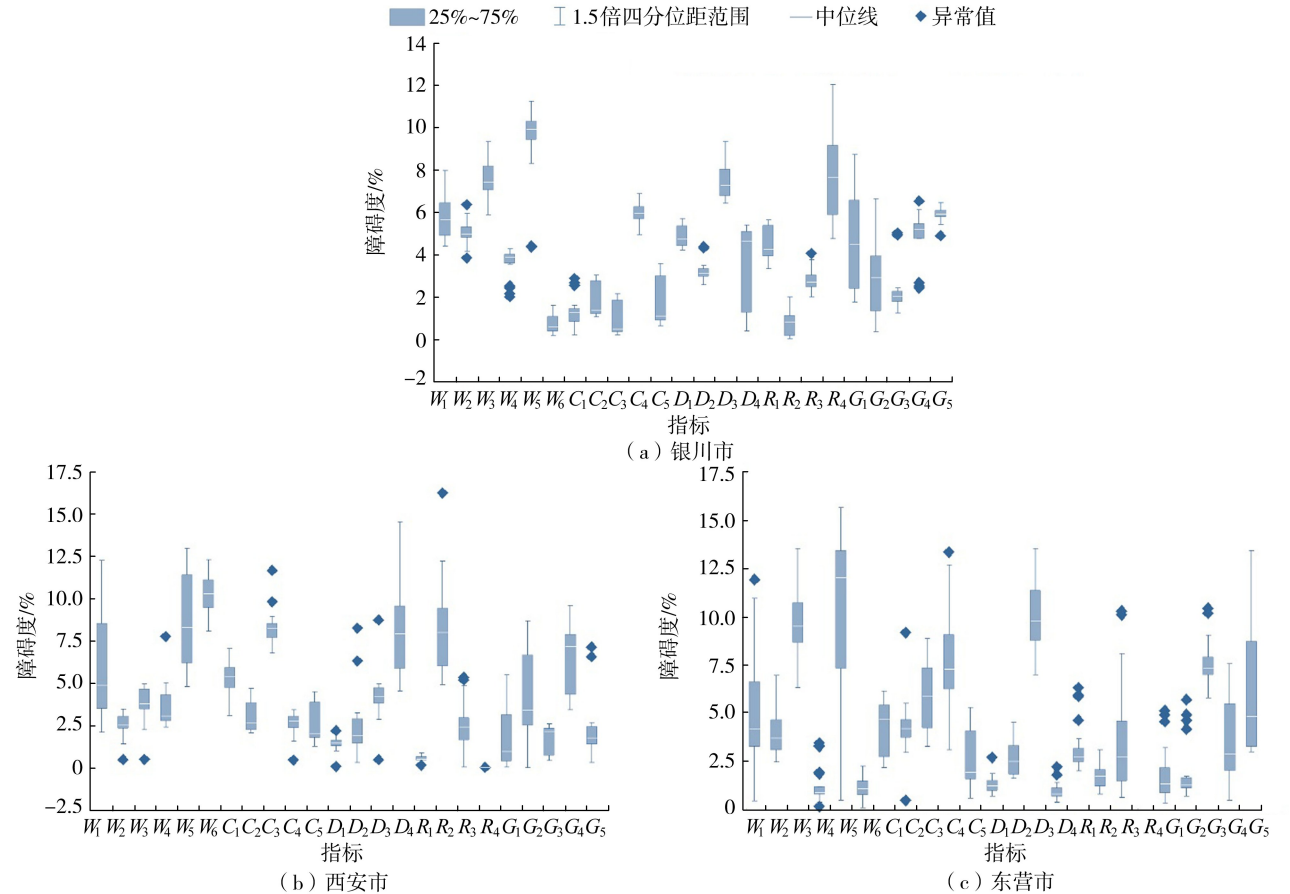


图11 黄河流域典型地区各指标障碍度箱型图

Fig. 11 Boxplots of obstacle degrees for each index in typical areas of the Yellow River Basin

表 1 黄河流域典型地区各子系统信息流关系

Table 1 Information flow relationships between subsystems in typical areas of the Yellow River Basin

类型	银川市				西安市				东营市			
	$T_{1\rightarrow2}$	$T_{2\rightarrow1}$	$\tau_{1\rightarrow2}/\%$	$\tau_{2\rightarrow1}/\%$	$T_{1\rightarrow2}$	$T_{2\rightarrow1}$	$\tau_{1\rightarrow2}/\%$	$\tau_{2\rightarrow1}/\%$	$T_{1\rightarrow2}$	$T_{2\rightarrow1}$	$\tau_{1\rightarrow2}/\%$	$\tau_{2\rightarrow1}/\%$
水-城	0.3372	0.5251	9.12	1.89	0.6385	3.8905	33.13	17.34	8.3807	54.7118	19.47	27.93
水-地	1.0594	1.8648	8.30	7.12	0.7237	1.5559	4.19	9.61	31.3500	27.2750	41.18	16.27
水-人	0.0639	0.1759	0.39	0.68	0.1474	0.0095	1.92	0.05	0.3479	0.1810	0.46	0.16
水-产	0.0871	1.5309	3.25	5.17	0.9073	5.6469	63.83	21.94	1.3976	32.8080	3.85	18.98
城-地	7.0158	1.2585	28.46	42.02	1.2539	0.1489	6.40	20.81	69.2500	24.2462	35.38	33.25
城-人	4.0530	0.4450	18.11	14.62	2.1380	0.0837	19.02	9.41	9.1725	8.1839	9.82	19.55
城-产	0.4541	4.3509	12.66	37.45	5.0559	3.8852	46.03	46.40	1.7954	15.2481	4.84	27.00
地-人	3.2944	0.5287	14.76	4.08	0.0053	0.0211	0.07	0.14	2.8951	0.6516	3.59	0.83
地-产	0.1302	1.6833	4.43	10.99	0.1164	1.3004	8.95	6.64	3.3152	64.0946	8.27	32.72
人-产	0.5475	4.3546	14.64	18.96	0.1379	2.3755	10.24	20.64	0.7371	1.5972	2.24	2.06

注： τ 为信息比， τ 值越大说明两者因果关系越强。

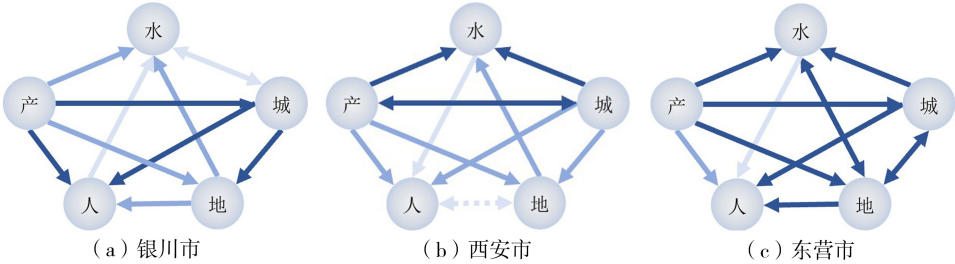


图 12 黄河流域典型地区各子系统间的因果驱动关系

Fig. 12 Causal driving relationships between subsystems in typical areas of the Yellow River Basin

化水平显著影响土地利用模式（城-地）和人口分布（城-人），显示出城市扩张对农业用地减少及人口聚集的双重作用。产业结构调整与城市发展相互促进（产-城），同时，产业布局优化也影响着人口流动（产-人）。土地利用模式对人口分布和产业布局的影响相对较小（地-人、地-产），而水资源状况对城市发展有中等程度的影响（水-城），但对人口和产业结构的影响相对较弱（地-水）。西安市的核心矛盾是人口密集与城市化导致的地下水超采和用水效率偏低。西安市的产业结构和城市化进程对水资源都具有较强的驱动作用（产-水、城-水），表明经济活动仍然在一定程度上依赖于水资源的有效配置。此外，城市化水平显著影响产业结构（城-产），这有助于提升城市综合竞争力。相比来说，土地利用与水资源管理之间的关联性较弱（地-水），对人口分布的影响不大（城-人）。东营市的核心矛盾是生态用水保障与水土资源不匹配。东营市的城、产子系统对其他子系统的影响较大，是人水关系中较为核心的两个子系统，尤其是产业结构调整对水资源需求和土地利用结构产生显著影响（产-水、产-城、产-地）。水资源状况不仅直接影响土地利用模式（水-地），还制约着城市的生态用水需求（城-水）。城市规模对人口分布和土地利用均有显著影响（城-人、城-地）。水子系统作为敏感部分，被其他子系统的变动所影响，显示出几个子系统之间紧密的互动关系（地-水、

地-城、地-人）。综上所述，通过对黄河流域典型地区各子系统之间因果驱动关系的分析，可知研究区的人水关系存在显著差异，不同地区应根据各自的特点寻找最优调控路径。黄河流域上游需优化城市规划与土地利用，提升水资源管理效能；中游应加强对水资源配置的科学规划，缓解资源不均的压力；下游则需强化水资源管理长效机制，确保生态用水需求。通过协调水、城、地、人、产 5 个子系统的匹配关系，可以实现水资源的可持续利用，促进黄河流域经济社会的高质量发展，从而达到人水和谐共存的目标。

4 结 论

a. 2000—2021 年黄河流域典型地区人水关系与经济发展已经基本实现了脱钩。尽管经济增长对水资源的需求仍在增加，但这种需求的增长速度显著放缓，显示出水资源利用效率有所提高，经济结构逐渐向低耗水、高附加值的方向转型。银川市、西安市、东营市用水总量的驱动效应存在明显差异。银川市的主要驱动因素为生态用水占比和人口总数，西安市则受地下水供水占比、生态用水占比和人口密度的影响较大，东营市的主要驱动因素包括生态用水占比、水土匹配系数和产水模数。

b. 2000—2021 年黄河流域典型地区的水子系统评价值均呈现波动变化，表明水系统仍然是制约

地区人水关系协调发展较为关键的因素。障碍度分析的结果也印证了这一结论,可见水资源管理在促进各子系统的协同发展方面仍面临诸多挑战。

c. 在黄河流域典型地区水、城、地、人、产 5 个子系统的相互作用中,银川市、西安市、东营市存在一定差异性。银川市应着力提升水资源管理效能,尤其是在高度依赖黄河过境水的背景下,并推动“特色农业-节水技术-生态补偿”的发展模式;西安市需加强水资源配置的科学规划,缓解水资源不均衡的压力,特别是在生态用水和城市化进程中的水资源高效利用;东营市则应强化水资源管理的长效机制,确保生态用水需求,同时设立工业用水再生利用率硬性指标,将节水绩效纳入开发区的综合考核体系,确保经济社会可持续发展的可持续性和韧性。

参考文献:

[1] 靳润芳,张竞予,左其享. 人水关系博弈论研究进展与研究思路探讨 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11 (6): 138-143. (JIN Runfang, ZHANG Jingyu, ZUO Qiting. Research progress and ideas of game theory in human-water relationship [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11 (6): 138-143. (in Chinese))

[2] 刘昌明,刘璇,杨亚锋,等. 水文地理研究发展若干问题商榷 [J]. 地理学报, 2022, 77 (1): 3-15. (LIU Changming, LIU Xuan, YANG Yafeng, et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research [J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 77 (1): 3-15. (in Chinese))

[3] 姜文来. 我国水资源集约安全利用的战略路径 [J]. 中国水利, 2021 (6): 58-59. (JIANG Wenlai. Strategic path of intensive and safe utilization of water resources in China [J]. China Water Resources, 2021 (6): 58-59. (in Chinese))

[4] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 130-136. (in Chinese))

[5] ZHANG L, WANG H, WANG F, et al. Construction and application of urban water resources spatial equilibrium model: a case study of Ulanqab City [J]. Water Policy, 2024, 26 (5): 524-542.

[6] 陈何铠,丁志宏,刘海瑞,等. “四水四定”的概念内涵、逻辑框架与实践体系研究 [J]. 水利规划与设计, 2024 (3): 1-6. (CHEN Hekai, DING Zhihong, LIU Hairui, et al. Research on the conceptual connotation, logical

framework and practical system of defining scopes of city, land, population and production with water [J]. Water Resources Planning and Design , 2024 (3): 1-6. (in Chinese))

[7] 洪思扬,方伟,王佳友,等. 广东省水资源能源粮食的省际流动与风险传递 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (4): 18-27. (HONG Siyang, FANG Wei, WANG Jiayou, et al. Inter-provincial water, energy, and food flow and risk transfer in Guangdong Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (4): 18-27. (in Chinese))

[8] 杨亚锋,李欣瑞,王红瑞,等. 基于“四水四定”的京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 107-113. (YANG Yafeng, LI Xinrui, WANG Hongrui, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium and dynamic evolution of water resources distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on “Basing Four Aspects on Water Resources” [J]. Water resources protection, 2025, 41 (1): 107-113. (in Chinese))

[9] 游进军,贾玲,杨朝晖,等. 协调公平与效率的“四水四定”研究 I :方法与模型 [J]. 水利学报, 2024, 55 (2): 158-166. (YOU Jinjun, JIA Ling, YANG Zhaozhui, et al. Study on “water dominates development” based on equity and efficiency I : methodology and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2024, 55 (2): 158-166. (in Chinese))

[10] 魏豪杉,王红瑞,郝鹏鑫,等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 71-77. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 71-77. (in Chinese))

[11] 左其享. 人水关系学的基本方程及模型构建 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 1-12. (ZUO Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 1-12. (in Chinese))

[12] 张家诚. 人水关系的历史回顾 [J]. 水科学进展, 2006, 17 (4): 581-584. (ZHANG Jiacheng. Water-man relationship through history [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (4): 581-584. (in Chinese))

[13] 左其享,李佳伟,于磊. 黄河流域人水关系作用机理及和谐调控 [J]. 水力发电学报, 2022, 41 (2): 1-8. (ZUO Qiting, LI Jiawei, YU Lei. Mechanism and harmony regulation of human-water relationship in Yellow River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering , 2022, 41 (2): 1-8. (in Chinese))

- [14] 王红瑞,王洪冲,赵伟静,等. 长江经济带水-能-粮流通及压力变化特征分析[J]. 人民长江, 2023, 54(5): 2-11. (WANG Hongrui, WANG Hongchong, ZHAO Weijing, et al. Analysis on characteristics of water-energy-food circulation and pressure changes in the Changjiang River Economic Belt [J]. Yangtze River, 2023, 54(5): 2-11. (in Chinese))
- [15] BOULAY A M, MOTOSHITA M, PFISTER S, et al. Analysis of water use impact assessment methods (part A): evaluation of modeling choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20: 139-160.
- [16] BRUCE S, ROBERT W, VLADIMIR D. Living on the edge: a complexity-informed exploration of the human-water relationship [J]. World Futures, 2007, 63(3/4): 275-285.
- [17] 邱国玉, 张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 640-649. (QIU Guoyu, ZHANG Xiaonan. China's urbanization and its ecological environment challenges in the 21st Century [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 640-649. (in Chinese))
- [18] 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. (ZHU Lijuan, LU Qiuyu. The use efficiency of cultivated land and irrigation water and the spatial correlation analysis of its coupling coordination in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(3): 297-308. (in Chinese))
- [19] 姚鹏, 梁琼云, 杜曙光. 水资源与产业高质量发展: 政策演进、互动机理及发展路径 [J]. 学习与实践, 2023(8): 86-95. (YAO Peng, LIANG Qiongyun, DU Shuguang. Water resources and high-quality industrial development: policy evolution, interaction mechanism and development path [J]. Study and Practice, 2023(8): 86-95. (in Chinese))
- [20] 刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003(5): 635-644. (LIU Changming, WANG Hongrui. An analysis of the relationship between water resources and population-economy-society-environment [J]. Journal of Natural Resources, 2003(5): 635-644. (in Chinese))
- [21] 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. (ZUO Qiting, YANG Zhenlong, CAO Hongbin, et al. Evaluation and analysis of water ecological security in the Yellow River basin based on SMI-P method [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science), 2022, 50(3): 10-19. (in Chinese))
- [22] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2700-2708. (LI Shuai, WEI Hong, NI Xilu, et al. Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(9): 2700-2708. (in Chinese))
- [23] 丁宝根, 赵玉, 邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 1-11. (DING Baogen, ZHAO Yu, DENG Junhong. Calculation, decoupling effects and driving factors of carbon emission from planting industry in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(5): 1-11. (in Chinese))
- [24] 陆钟武, 王鹤鸣, 岳强. 脱钩指数: 资源消耗、废物排放与经济增长的定量表达[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 2-9. (LU Zhongwu, WANG Heming, YUE Qiang. Decoupling indicators: quantitative relationships between resource use, waste emission and economic growth [J]. Resources Science, 2011, 33(1): 2-9. (in Chinese))
- [25] 张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 945-951. (ZHANG Rui, LIU Youzhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and diagnosis of its obstacle indicators in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(7): 945-951. (in Chinese))
- [26] 雷勋平, QIU Ronbin. 基于熵权 TOPSIS 模型的中国粮食安全评价及障碍因子诊断[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 1-14. (LEI Xunping, QIU Ronbin. Evaluation of food security in China based on entropy TOPSIS model and the diagnosis of its obstacle factors [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12): 1-14. (in Chinese))
- [27] LIANG X S, KLEEMAN R. Information transfer between dynamical system components [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(24): 244101.
- [28] LIANG X S. The Liang-Kleeman information flow: theory and applications[J]. Entropy, 2013, 15(1): 327-360.
- [29] LIANG X S. Information flow and causality as rigorous notions abinitio[M]. Ithaca: Cornell University Library, 2015.
- [30] LIANG X S. Causation and information flow with respect to relative entropy[J]. Chaos, 2018, 28(7): 75311. (收稿日期: 2025-05-29 编辑: 王芳)