

黄河中游水—能源—粮食纽带系统可持续性的 时空分异及其障碍机制

黄蓉晖¹, 崔思梦¹, 王小军^{2,3}, 黄萱^{1,4}, 操信春^{1,4}

(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 210098; 2.南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室,南京 210029;

3.水利部应对气候变化研究中心,南京 210029; 4.河海大学水土保持学院,南京 210098)

摘要: [目的] 为揭示黄河流域中游地区水—能源—粮食系统协同演变规律及其障碍因素。[方法] 通过构建水—能源—粮食纽带关系评价指标体系,运用熵权法计算指标权重,解析2010—2021年系统协同演变特征,结合障碍度诊断模型识别关键制约因素。[结果] 研究区水—能源—粮食纽带关系的时序演变呈3个典型阶段,2017年成为关键转折点,可持续指数由此前的稳步增长转为快速提升,区域最高值从0.56上升至0.74;空间格局从2010年的“凹”形分布演变为2020年的“凸”形分布,区域发展呈“陕西优势突出、山西稳中有升、内蒙古相对滞后”的特征,其中,宝鸡市可持续指数增幅达117.60%,而太原、包头等传统工业城市呈负增长;障碍因素呈显著的区域差异和动态演变特征,内蒙古自治区由工业化学需氧量排放(9.64%)转变为农业灌溉用水和能源消费的双重制约,陕西省工业化学需氧量排放的障碍度显著降低(从11.71%降至0.26%),但能源消费量的制约作用上升(10.13%),山西省工业化学需氧量排放的障碍度大幅下降(从13.90%降至0.15%)。[结论] 水—能源—粮食系统协同发展受资源利用效率与产业结构的动态调控,研究提出的区域差异化障碍因子识别方法可为黄河流域生态保护与资源优化配置提供决策依据。

关键词: 水—能源—粮食纽带关系; 可持续发展; 时空演变; 障碍因素; 黄河中游地区

中图分类号: X24.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0369-11

Spatio-Temporal Differentiation and Obstacle Mechanism of Sustainability of the Water-Energy-Food Nexus System in the Middle Reaches of the Yellow River

HUANG Ronghui¹, CUI Simeng¹, WANG Xiaojun^{2,3}, HUANG Xuan^{1,4}, CAO Xinchun^{1,4}

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.National Key Laboratory of

Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3.Research Center for

Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4.College of Soil and Water Conservation,

Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] To reveal the coordinated evolution patterns and obstacle factors of the water-energy-food (WEF) nexus in the middle reaches of the Yellow River basin. [Methods] An evaluation index system for the WEF nexus was established. The entropy weight method was used to calculate the weights of the indicators, and the coordinated evolution characteristics of the system from 2010 to 2021 were analyzed. A diagnostic model of obstacle degree was applied to identify the key constraining factors. [Results] The temporal evolution of the WEF nexus in the study area exhibited three typical stages, with 2017 identified as a key turning point. The sustainability index shifted from steady growth to rapid improvement, with the regional maximum increasing from 0.56 to 0.74. The spatial pattern transformed from a "concave" distribution in 2010 to a "convex" one in 2020, reflecting a regional development trend of "prominent advantages in Shaanxi, steady improvement in Shanxi, and

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-03-14

录用日期: 2025-04-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(52479038, 52309049); 国家重点研发计划项目(2023YFC3206503, 2023YFC3206504)

第一作者: 黄蓉晖(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用与保护研究。E-mail: hrhsfree@163.com

通信作者: 操信春(1986—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用与保护研究。E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

relative lag in Inner Mongolia". Baoji City, in particular, achieved a remarkable 117.60% increase in its sustainability index, whereas traditional industrial cities such as Taiyuan and Baotou experienced negative growth. Obstacle factors demonstrated significant regional disparities and dynamic variations. In Inner Mongolia, the primary constraints shifted from industrial chemical oxygen demand (COD) emissions (9.64%) to dual limitations of agricultural irrigation water use and energy consumption. In Shaanxi, the obstacle degree of industrial COD emissions significantly decreased (from 11.71% to 0.26%), while the constraint posed by energy consumption increased (10.13%). In Shanxi, the obstacle degree of industrial COD emissions sharply dropped (from 13.90% to 0.15%). [Conclusion] The coordinated development of the WEF nexus is dynamically regulated by resource use efficiency and industrial structure. The proposed method for identifying region-specific obstacle factors can provide decision-making support for ecological conservation and optimized resource allocation in the Yellow River Basin.

Keywords: water-energy-food nexus; sustainable development; spatiotemporal evolution; obstacle factors; the middle reaches of the Yellow River basin

Received: 2025-02-25

Revised: 2025-03-14

Accepted: 2025-04-30

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

水、能源和粮食是维系人类社会生存与发展的三大核心资源,在农业生产、经济发展和生态保护中扮演着不可或缺的角色。联合国可持续发展目标中多项内容均涉及水、能源和粮食系统的高效管理与协同发展^[1]。然而,在全球气候变化和经济快速发展的双重压力下,资源供需矛盾日益突出,尤其在资源短缺与高耗能生产模式并存的区域,问题更为严峻^[2]。

黄河流域是中国重要的生态屏障和农业生产基地,横跨9个省份,在国家粮食安全和能源供应中发挥着关键作用^[3]。其中,中游地区是黄河流域重要的资源供给区。该区域耕地资源相对有限,但粮食产出能力显著,在全国农业格局中占有重要地位,同时蕴藏着丰富的煤炭、天然气等矿产资源,是全国重要的能源输出基地^[4]。然而,区域发展面临严峻挑战,随着城市化和工业化进程加快,水资源短缺、生态环境脆弱、能源消耗高企等问题日益突出^[5],能源开发与生态保护的矛盾持续加剧,复杂的资源禀赋格局对区域可持续发展提出严峻挑战^[6]。

水—能源—粮食纽带(water-energy-food nexus, WEF Nexus)概念自2011年德国波恩会议提出后,迅速成为国际研究热点^[7]。该概念强调三大资源系统的紧密联系,为解决资源利用效率问题提供系统视角。目前,学术界围绕水—能源—粮食纽带的研究主要集中在3个方面:一是构建系统动力学模型、投入产出分析等定量评估框架^[8];二是量化资源关系,评估政策干预效应^[9];三是结合区域特点开展建模分析^[10]。然而,现有研究多关注流域或国家尺度,对市级尺度的资源关系研究相对不足。市级尺度的精细化分析不仅能深入揭示区域内资源利用效率的空间异质性,还能因地制宜制定管理策略提供更具有针对性的依据。同

时,该微观尺度的研究有助于准确把握各地区在资源禀赋、开发模式和环境压力等方面的差异性特征,从而更好地支撑区域协同发展决策。

黄河中游地区作为资源环境矛盾的集中区,既是粮食生产基地,又是能源开发核心区^[11],同时肩负着上下游水资源调控与生态屏障的双重使命。在此背景下,以市级尺度开展水—能源—粮食纽带系统的精细化分析,不仅可深入揭示区域资源利用效率的空间异质性,还能为制定差异化管理策略提供科学依据。鉴于此,本研究选取黄河中游地区作为研究对象,构建水—能源—粮食纽带可持续性评价指标体系,运用熵权法确定指标权重,分析2010—2021年系统的时空演变特征,并通过障碍因素诊断模型识别制约系统可持续发展的关键因素。研究重点探讨区域水—能源—粮食纽带关系的时序演变规律及其阶段性特征,系统可持续性的空间分异格局及其动态变化,以及不同区域发展的主要障碍因素及其演变机制。本研究不仅在市级尺度上系统揭示水—能源—粮食纽带关系的可持续性演变特征,为类似区域的资源系统评价提供新的分析视角,同时对推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

考虑区域水资源、能源产需和粮食生产特征,本研究选取黄河中游及其毗邻的24个地级市为研究区涉及内蒙古自治区、山西省和陕西省的黄河流域及影响区域(图1)。研究区总面积约816 000 km²,地形以黄土高原为主,海拔为200~2 000 m,地势西北高、东南低^[12]。区域年平均气温8~14℃,年降水量300~

600 mm,降水时空分布不均,多集中在7—9月^[13]。研究区土地利用类型以耕地和草地为主^[14],区域内矿产资源丰富,煤炭、天然气等能源矿产储量居全国前列,是国家重要的能源基地^[15]。2023年,研究区生产总值达到7万亿元,常住人口7 600万,城镇化率67%。

1.2 分析框架

构建一个系统化的分析框架,用于评估黄河中游地区水—能源—粮食纽带系统的可持续发展水平(图2)。首先,基于研究目标和区域特点,从水资源、能源和粮食3个子系统构建多维评价指标体系,全面反映系统发展状况。其次,运用熵权法确定指标权重,计算各子系统的可持续发展指数(sustainability index,SI),量化系统整体的可持续性水平。在此基础上,运用障碍度模型识别制约系统可持续发展的关键因素,通过障碍度的定量分析,揭示不同指标对系统发展的影响

程度。研究框架的设计充分考虑区域资源禀赋特征和发展需求,既能客观评估当前系统可持续发展状况,又可为制定差异化管理策略提供科学依据。

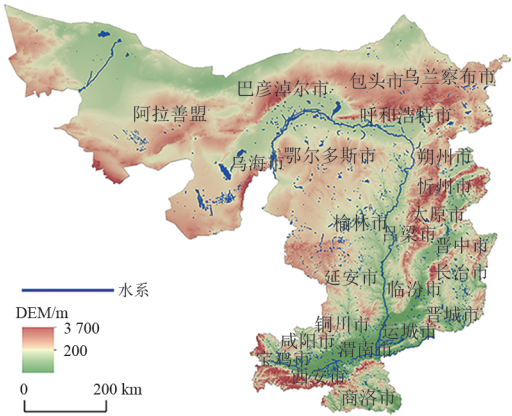


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

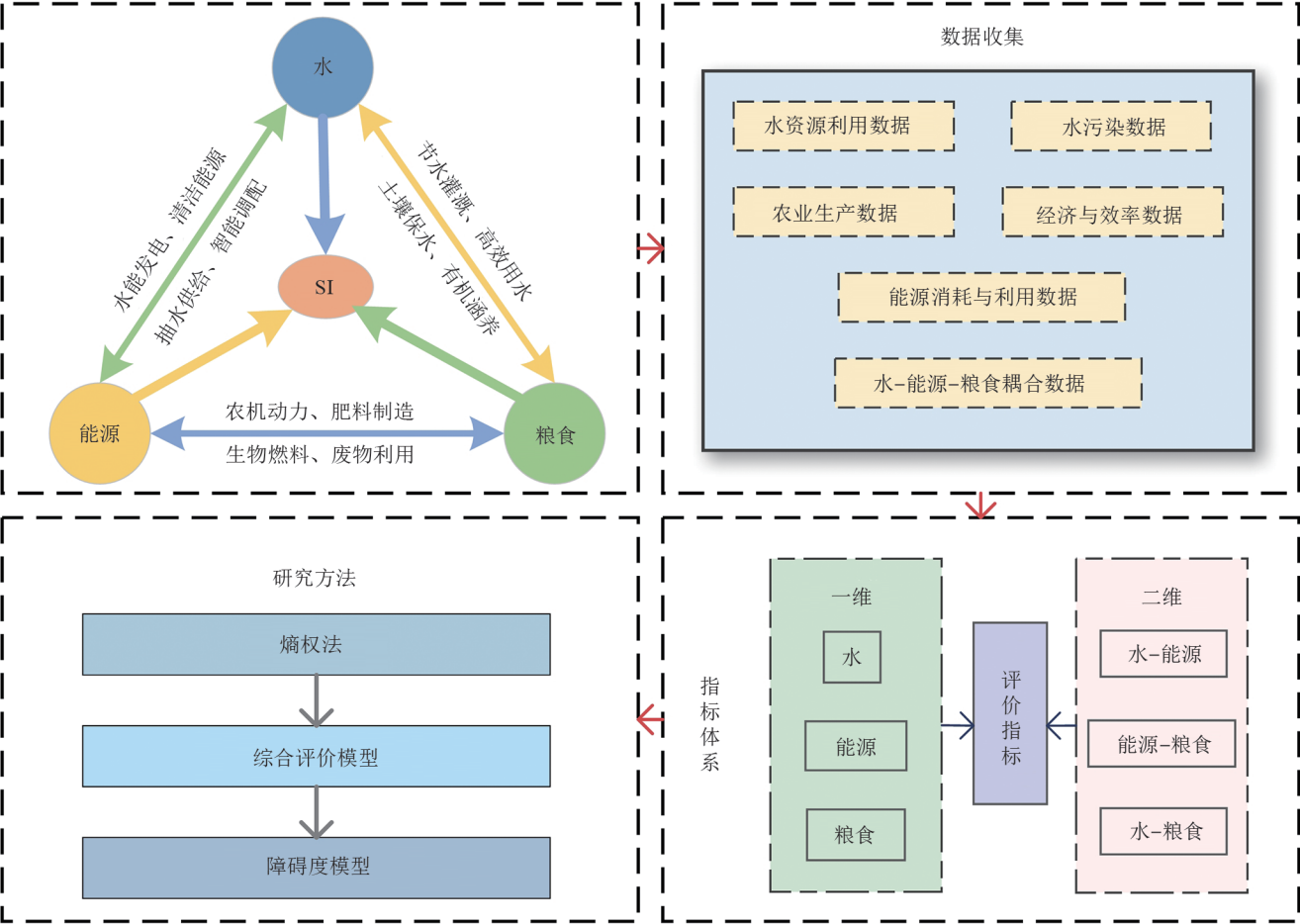


图 2 水—能源—粮食纽带系统可持续性评价框架

Fig. 2 Sustainability evaluation framework of WEF nexus system

1.3 综合评价模型

1.3.1 评价指标选取 构建科学合理的评价指标体系是研究水—能源—粮食纽带可持续发展水平的基础。本研究基于系统性原则,并参考已有研究^[16],从单一子系统和系统耦合2个层次构建指标体系。在单一子系统层面,从一维角度为水、能源、粮食3个系统

分别构建4个评价指标,共构建12个评价指标(表1)。在系统耦合层面,从二维角度,水—粮食、水—能源、能源—粮食3对关联关系出发,选取3个交互指标,以反映子系统间的相互影响,最终形成包含15个指标的综合评价体系(表1),全面反映研究区域水—能源—粮食系统的发展特征及其相互作用关系。

表 1 水—能源—粮食纽带综合评价指标体系
Table 1 Comprehensive evaluation index system of WEF nexus

维度	系统	指标	编号	数据来源	单位	方向
一维	水	人均水资源量	x1	水资源公报	m ³ /人	+
		万元 GDP 用水量	x2	水资源公报	m ³ /万元	+
		农业用水占比	x3	水资源公报		+
		人均废水排放量	x4	统计年鉴	t/人	—
	能源	人均能源消耗量	x5	统计年鉴	tce/人	—
		水力发电占比	x6	统计年鉴		+
		一次能源占比	x7	统计年鉴		—
		单位 GDP 能源消耗	x8	统计年鉴	tce/万元	+
	粮食	粮食单产	x9	统计年鉴	kg/hm ²	+
		单位面积机械动力	x10	统计年鉴	kW/hm ²	+
		单位面积化肥施用量	x11	统计年鉴	t/hm ²	—
		人均粮食产量	x12	统计年鉴	t/人	+
二维	水—粮食	亩均灌溉用水量	x13	水资源公报	m ³ /hm ²	+
	水—能源	工业化学需氧量排放量	x14	统计年鉴	t	—
	能源—粮食	单位质量粮食能耗量	x15	统计年鉴	kWh/kg	—

1.3.2 指标归一化处理 为确保不同量纲指标的可比性,本研究采用极差标准化方法对水—能源—粮食系统的评价指标进行无量纲化处理。根据指标性质的不同,分别采用标准化公式测算。

对于正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{x_j}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

对于负向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max_{x_j} - x_{ij}}{\max_{x_j} - \min_{x_j}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: x'_{ij} 为标准化后的指标值; x_{ij} 为原始指标值; $\max_{x_j}$ 和 $\min_{x_j}$ 分别为第 j 个指标在研究期内的最大值和最小值; $i = 1, 2, \dots, m$ 为年份; $j = 1, 2, \dots, n$ 为指标。

1.3.3 熵权法 熵权法是基于信息熵理论的客观赋权方法,通过计算指标信息的有序程度来确定权重。在信息论中,熵值反映数据的离散程度,熵值越大,表明指标提供的有效信息量越少,其在评价体系中的权重应相应降低。该方法因其客观性和可操作性强的特点,已广泛应用于水资源管理、能源系统评价等多个领域。

采用熵权法确定各评价指标的权重,并据此计算黄河流域中游地区水—能源—粮食纽带的综合评价指数^[17]。

首先,计算第 j 个指标的信息熵,具体计算公式为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m x'_{ij} \ln x'_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其次,计算第 j 个指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (4)$$

最后,计算综合评价指数(SI):

$$SI = \sum_{j=1}^n (x'_{ij} \times w_j) \quad (5)$$

式中: x'_{ij} 为标准化后的指标值; m 为年份数; n 为指标数; E_j 为第 j 个指标的熵值; w_j 为第 j 个指标的权重。

参考已有研究^[18],将可持续指数(SI)划分为差可持续 $[0, 0.30)$ 、中可持续 $[0.30, 0.45)$ 、良可持续 $[0.45, 0.60)$ 和优可持续 $[0.60, 1]$ 4个等级^[19]。

1.4 障碍因素诊断模型

障碍因素诊断模型是基于综合评价模型发展而来的分析工具,主要用于识别和量化制约系统发展的关键因素^[20]。该模型通过定量分析各指标对水—能源—粮食纽带系统的影响程度^[21],有助于准确把握制约系统协同发展的瓶颈所在。

模型的计算首先,对原始数据进行归一化处理,消除不同指标间的量纲差异;其次,结合指标权重计算障碍度,具体计算公式为:

$$O_{ij} = x_{ij} \times w_j \quad (6)$$

式中: O_{ij} 第 i 年第 j 个指标的障碍度,反映该指标对系统发展的阻碍程度; x_{ij} 第 i 年第 j 个指标经归一化处理后的值; w_j 为第 j 个指标的权重。

1.5 数据来源

选取2010—2021年为研究期,系统评估黄河流域中游地区水—能源—粮食纽带关系的协调性与可持续发展水平。社会经济数据来自2010—2021年《中国统计年鉴》^[22],包括人口、经济和环境指标;能

源数据采用 2010—2021 年《中国能源统计年鉴》^[23]; 粮食数据引自 2010—2021 年《中国农村统计年鉴》^[24]; 水资源数据来自 2010—2021 年《中国水资源公报》^[25]和《黄河水资源公报》^[26]; 同时参考研究期内内蒙古、山西和陕西 3 省统计年鉴的相关数据。对于研究期内个别缺失数据,采用线性插值法进行估算。该方法基于时间序列数据的连续性特征,能够较好地保持数据的趋势性和合理性。通过数据标准化处理和一致性检验,确保数据的可靠性和可比性,为后续定量分析提供科学的数据基础。

2 结果与分析

2.1 水—能源—粮食子系统可持续指数的时序演变特征

2010—2021 年,黄河流域中游地区水—能源—

粮食系统呈显著的时空异质性,三大子系统的可持续指数表现出明显的阶段性演变特征和区域分异规律(图 3)。水资源子系统表现出明显的波动特征,区域内部差异显著。内蒙古乌海市水子系统指数在 2010—2013 年由 0.26 降至 0.10,随后于 2016 年回升至 0.24,该波动主要源于工业用水需求变化和水资源管理政策调整。巴彦淖尔市则从 2010 年的 0.29 波动下降,2011—2017 年在 0.12~0.19 波动,2018 年回升至 0.24,反映农业灌溉技术改进和水资源调配优化的成效。陕西榆林市从 2010 年的 0.19 降至 2015 年的 0.08,后于 2021 年升至 0.24,体现能源开发活动对水资源系统的显著影响。山西晋城市则呈稳步上升趋势,从 2010 年的 0.16 增长至 2021 年的 0.33,与当地水利工程建设和水资源保护政策的有效实施密切相关。

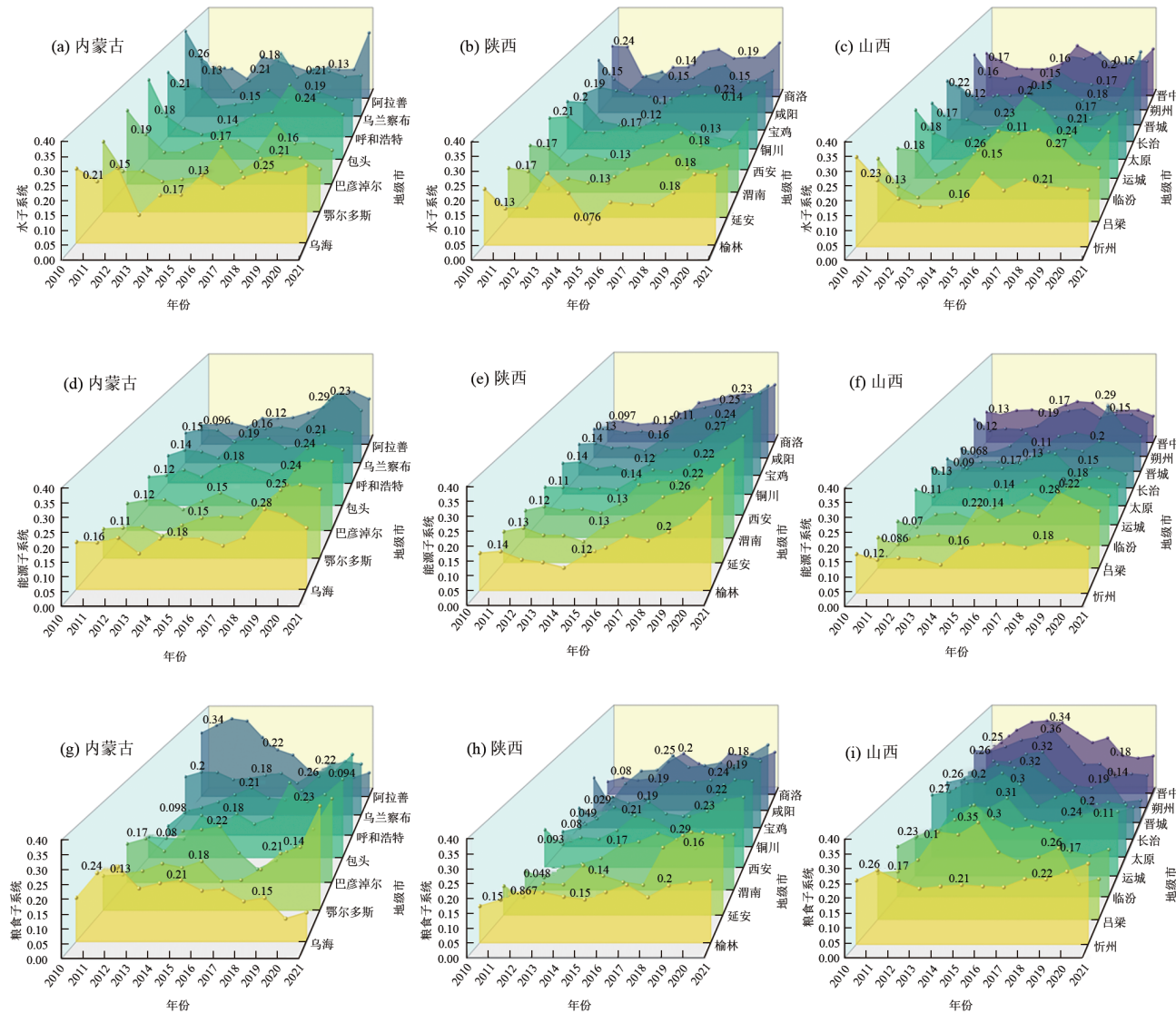


图 3 2010—2021 年黄河流域中游地区三大子系统可持续指数时序变化

Fig. 3 Temporal variations in sustainability index of three subsystems in the middle reaches of the Yellow River basin from 2010 to 2021

能源子系统整体呈上升趋势,但区域发展不均衡。内蒙古自治区7个城市在2012年、2016年和2020年均出现同步下降,其他年份则保持上升态势。其中,巴彦淖尔市能源子系统指数从2010年的0.11提升至2021年的0.27,体现能源产业结构优化和技术升级的成效;包头市则从2010年的0.12稳步提升,2017—2021年呈加速增长趋势,2021年达到0.23,反映新能源项目推进和能源结构调整的积极成果。陕西省能源子系统表现最为突出,8个城市在2014—2021年均呈良好增长态势。以渭南市为例,2014—2021年指数从0.09增长至0.30,得益于能源资源的高效开发利用和清洁能源的推广应用。山西省则呈现相对平稳的增长态势,如长治市2011—2021年从0.12上升至0.15,反映传统能源大省在能源转型过程中的稳健发展特征。

粮食子系统表现出较强的区域差异性和周期性波动特征。内蒙古巴彦淖尔市粮食子系统指数从2012年的0.12提升至2021年的0.33,其间经历2018年的低谷(0.09),随后快速回升,此变化轨迹体现农业现代化进程中的阶段性特征。陕西渭南市则从2010年的0.07增长至2017年的0.22,2021年维持在0.21的水平,反映农业结构优化和科技应用的积极效果。山西运城城市指数则呈波动上升趋势,从2010年的0.15上升至2015年的0.31,2021年略有回落至0.25,该变化与耕地保护政策实施、农业补贴措施调整及农业生产条件改善密切相关。

研究区水—能源—粮食系统的综合评价指数呈波动上升趋势,2010—2021年由0.17上升至0.23(图4)。分系统来看,水资源子系统在2013年呈显著下降(0.14)后逐步回升;能源子系统自2013年的低点(0.11)开始稳步上升,2019—2021年维持在0.23~0.24的较高水平;粮食子系统则在2010—2014年快速增长(0.16升至0.22),此后波动趋稳。然而,区域发展呈显著的空间异质性,以宝鸡市增长最为显著,可持续指数在研究期内增长117.6%(0.34升至0.74);商洛、咸阳、铜川等城市也保持快速增长态势。相比之下,晋中市增长率仅为1%,朔州市、巴彦淖尔市等城市发展相对缓慢,太原市和包头市指数甚至出现1%的下降,反映出传统工业城市转型过程中面临的结构性挑战。该区域分异特征表明,水—能源—粮食系统的协同发展水平虽整体提升,但区域均衡发展仍面临较大压力。

2.2 水—能源—粮食系统可持续指数的市域时空分异特征

基于2010—2021年黄河流域中游地区市域尺度数据分析表明,水—能源—粮食系统可持续指数呈

显著的阶段性演变特征和空间分异规律,区域整体发展水平稳步提升,但不均衡性日益凸显(图5)。研究期内,可持续指数的演变大致可分为初期缓慢增长期(2010—2016年)、快速发展期(2017—2019年)和稳定提升期(2020—2021年)3个阶段。在初期缓慢增长阶段,区域整体可持续指数普遍较低,多数城市指数为0.30~0.40,反映出该阶段资源管理体系和环境保护机制尚不完善。2017年成为区域发展的重要转折点,可持续指数开始快速提升,区域最高值从0.56上升至0.74,区域平均值达到0.46,标志着系统协同管理进入新阶段。2020—2021年,发展态势趋于平稳,大部分城市的可持续指数维持在0.45以上,表明区域整体已进入相对稳定的发展阶段。

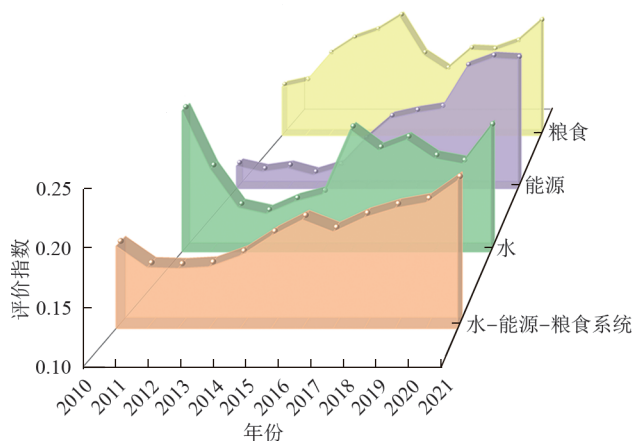


图4 2010—2021年黄河流域中游地区水—能源—粮食系统评价指数时序变化

Fig. 4 Temporal variations in WEF system evaluation index in the middle reaches of the Yellow River basin from 2010 to 2021

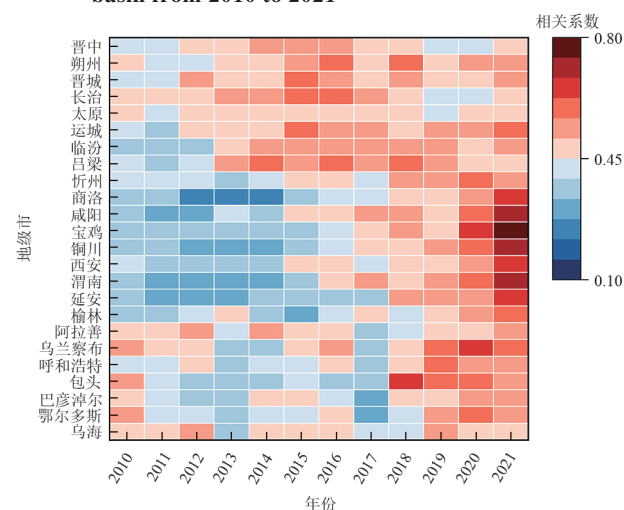


图5 2010—2021年黄河流域中游地区各市水—能源—粮食系统可持续指数演变趋势

Fig. 5 Evolution trends of WEF system sustainability index in the middle reaches of the Yellow River basin from 2010 to 2021

市域尺度分析表明,黄河流域中游地区水—能源—粮食系统可持续发展呈显著的区域分异特征。陕西省的城市群表现最为突出,以宝鸡市为代表,其可持续指数从2010年的0.34快速增长至2021年的0.74,增幅达117.6%。商洛、咸阳、铜川、西安、渭南等城市也呈相似的快速增长态势,形成区域发展的高值区。快速增长得益于该城市在产业结构优化、资源利用效率提升及环境治理等方面的积极举措。相比之下,山西省的部分城市发展相对滞后。晋中市仅实现1%的增长率,朔州市的发展也较为缓慢。更值得关注的是,区域重要工业城市太原和包头出现1%的负增长,反映出传统工业城市在转型发展过程中面临的结构性挑战。内蒙古自治区的巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、乌海市同样呈现出发展缓慢的特征,表明资源型地区在可持续发展转型过程中普遍面临较大压力。

从空间分布格局来看,研究区水—能源—粮食系统在2010—2020年经历显著的结构转变,总体呈“东西高、中部低”向“中部突出、两翼低”的演化趋

势(图6)。2010年,区域呈典型的“凹”形分布格局,内蒙古西部的乌兰察布、包头和鄂尔多斯凭借丰富的能源资源禀赋和完善的产业体系,形成可持续指数超过0.54的高值区(图6a)。而陕西东部的宝鸡、铜川、渭南和商洛等城市则普遍处于0.35以下的低值水平,反映出资源综合利用效率和系统协调性的明显短板。2015年成为空间格局转型的关键节点(图6b)。山西省以晋城为代表,可持续指数达到0.58,较2010年增长34.88%,展现出资源整合和产业升级的积极成效。然而,内蒙古地区出现明显下滑,典型如包头市指数从0.54降至0.40,降幅达25.9%,凸显资源型地区转型发展的结构性挑战。到2020年,空间格局演化为典型的全角下“凸”形分布,中部地区跃升为区域发展高地(图6c)。区域内大多数城市的可持续指数突破0.52,其中,宝鸡市以0.74的指数值领先全区,彰显产业转型升级和资源高效利用的显著成效。相比之下,晋中市(0.45)等传统工业城市的发展仍面临较大挑战。空间格局的动态演变反映区域发展重心的转移和产业布局的优化调整过程。

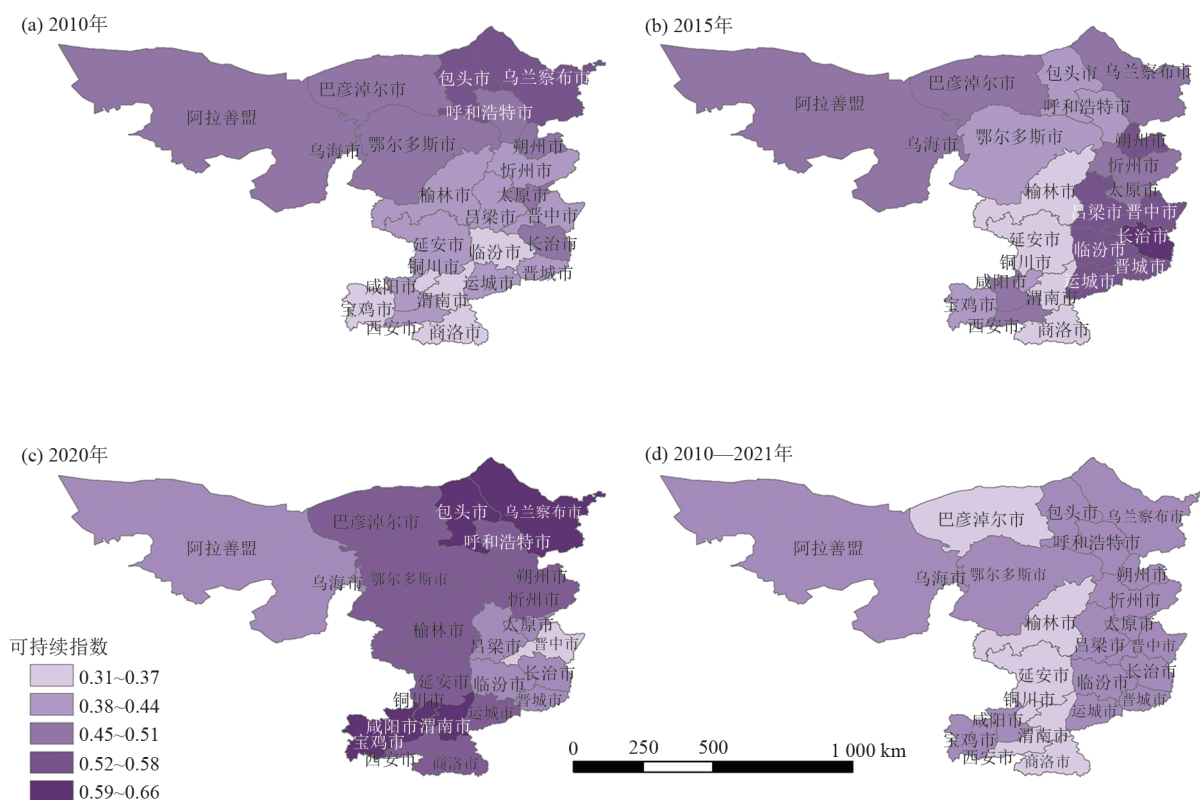


图6 黄河流域中游地区水—能源—粮食系统可持续指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of WEF system sustainability index in the middle reaches of the Yellow River basin

2.3 障碍因素分析

基于障碍度诊断模型,本研究对2010—2021年黄河流域中游地区水—能源—粮食系统可持续发展

的制约因素进行定量识别表明,各省区障碍因素呈显著的时序演变特征和区域差异性(图7)。内蒙古自治区的障碍因素经历明显的结构性转变(图7a)。

2010—2015年,工业化学需氧量排放量(x14)构成首要制约,平均障碍度达9.64%,人均水资源量(x1)次之,2012年障碍度攀升至7.46%。2015—2021年期间,人均粮食产量(x12)和单位粮食能源消费量(x15)逐渐成为主导性制约因素,2021年障碍度分别达到10.92%和7.27%。此转变与内蒙古煤炭资源开发及农业现代化带来的产出提升进程密切相关。2015年后,鄂尔多斯市煤制气项目等能源产业扩张推高能源消费量,而河套灌区节水技术推广引发的地下水超采加剧农业灌溉用水压力。值得注意的是,人均水资源量(x1)虽呈下降趋势,但持续发挥显著制约作用,反映出该区域水资源密集型产业发展模式的结构性矛盾。陕西省障碍因素呈显著的阶段性特征(图7b)。2010年,工业化学需氧量排放量(x14)、水资源开发利用效率(x2)和能源生产总量(x8)构成主要制约,障碍度分别为12.24%、9.35%、8.41%。2016年后,工业化学需氧量排放量(x14)的

制约作用骤降(从11.71%降至0.26%),而单位粮食能源消费量(x15)逐步上升为首要障碍因素,2021年障碍度达10.13%,该矛盾凸显陕西省对化石能源的路径依赖。榆林市原煤产量在全省占比较高,支撑经济增长的同时推高能源消费量,然而,新能源装机容量虽增长较快,但火电仍占据主导地位,反映出能源结构转型滞后。山西省则表现出水资源与能源资源的双重约束特征(图7c)。2010—2015年,工业化学需氧量排放量(x14)、单位面积机械动力(x10)和单位粮食能源消费量(x15)构成主要制约,平均障碍度分别为10.81%、7.61%、5.2%。特别是工业化学需氧量排放量(x14)的障碍度呈显著下降趋势(从13.9%降至0.15%),该成效源于焦化行业绿色转型。2017年山西省焦化产业污染防治方案强制淘汰落后产能,以及干熄焦技术的广泛推广,大幅削减COD排放量(x14),但存量高耗能设备仍拖累能源消费量。

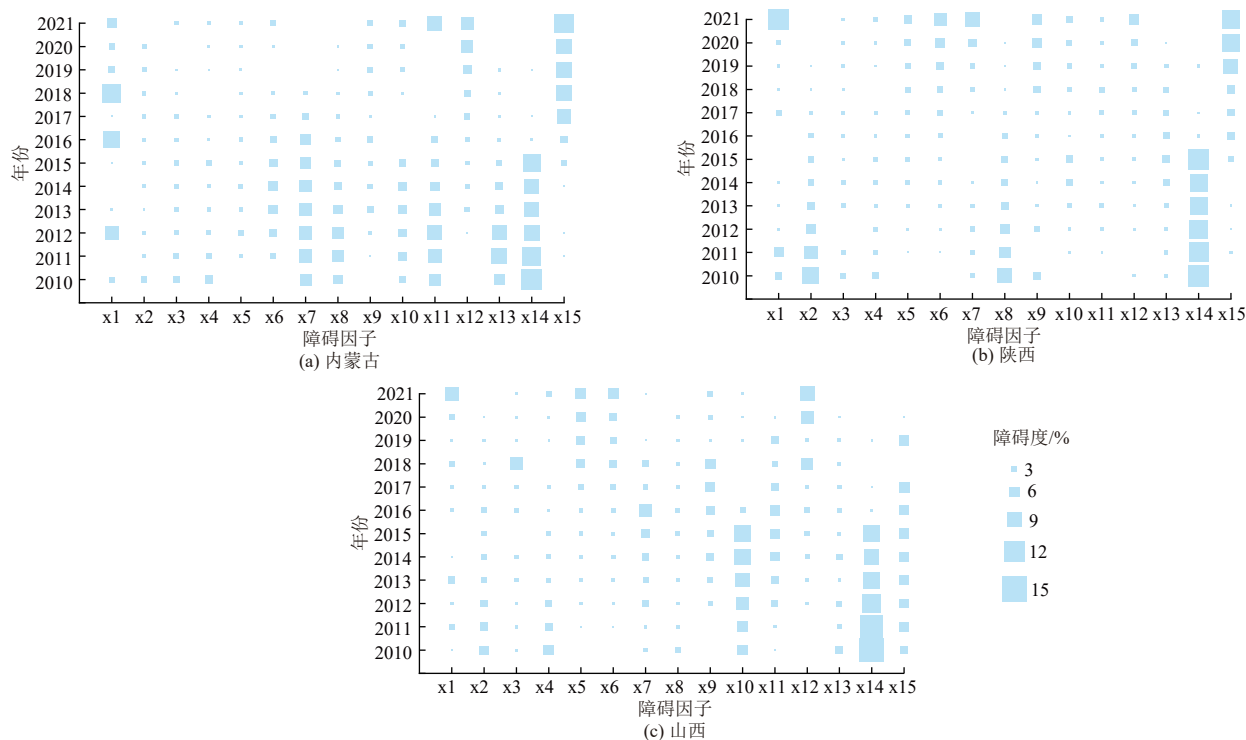


图7 2010—2021年黄河流域中游地区水—能源—粮食系统发展的主要障碍因素

Fig. 7 Major obstacle factors for WEF system development in the middle reaches of the Yellow River basin from 2010 to 2021

3 讨论

3.1 水—能源—粮食纽带关系的时空演变特征解析

黄河流域中游地区水—能源—粮食纽带关系可持续性表现出明显的时空分异特征,具体体现在时序变化和空间分布2个维度。从时序演变来看,2010—2021年研究区可持续性水平整体呈上升态势,其中2017年是关键转折点。区域可持续指数由此前的稳步增长转为快速提升,与国家生态文明建设战略的深

入实施密切相关^[27]。特别是宝鸡市可持续指数从2010年的0.34增长至2021年的0.74,增幅达117.6%,充分反映产业结构优化对系统可持续性的积极影响。此显著提升得益于该市在节水农业推广、清洁能源利用和农业科技创新等方面的综合施策^[28]。

空间分布格局呈显著的区域差异,总体表现为“陕西优势突出、山西稳中有升、内蒙古相对滞后”的特征。陕西关中地区城市群的快速发展得益于装备

制造业转型升级和农业现代化的协同推进,尤其是在水资源高效利用、节能技术推广和粮食生产效率提升方面取得显著成效。相比之下,晋中等传统资源型城市增长率仅为1%,反映出产业转型升级面临的结构性挑战。发展滞缓主要源于资源依赖型产业结构的路径锁定效应,以及转型过程中面临的技术、资金和人才等多重约束。值得注意的是,太原和包头出现负增长,说明传统重工业城市在转型过程中面临更为严峻的资源环境约束,特别是在能源结构调整和工业污染治理方面的压力持续加大^[29]。

区域发展的不平衡性进一步加剧城市间的分化趋势。快速发展型城市(如宝鸡、商洛等)通过产业结构优化和技术创新实现跨越式发展;而资源型城市(如晋中、朔州等)受制于传统发展路径依赖,转型动力不足。该分化格局的形成与各地区资源禀赋、产业基础、创新能力和政策支持力度等因素密切相关^[30]。

3.2 障碍因素的作用机制分析

基于障碍因素诊断模型的分析结果,研究区各省份在发展过程中面临不同的制约因素,且该类因素随时间呈显著的演变特征。内蒙古自治区的障碍因素经历明显的转变过程。2010—2015年主要受工业化学需氧量排放(x14)制约,平均障碍度达9.64%;2015—2021年则转变为人均粮食产量(x12)和单位粮食能源消费量(x15)的双重压力,反映出区域在工业化和农业现代化带来的产出提升进程中面临的资源环境压力持续加大^[31]。此转变说明该地区在环境治理方面取得一定进展,但资源利用效率仍有待提升。

陕西省展现出障碍因素的动态演变特征。工业化学需氧量排放(x14)的制约作用从2016年的11.71%降至0.26%,表明环境治理成效显著。该改善得益于该省严格的环境监管政策和清洁生产技术的推广应用。然而,单位粮食能源消费量(x15)的障碍度上升至10.13%,凸显经济快速发展过程中能源需求攀升的结构性矛盾。此矛盾反映传统发展模式向绿色低碳转型过程中的阵痛。

山西省的障碍因素变化突显环境治理的成效与资源利用的矛盾。工业化学需氧量排放(x14)的障碍度从13.9%降至0.15%,降幅最大,印证环境治理措施的有效性。显著改善源于该省近年来在工业污染治理、清洁生产改造等方面的持续投入^[32]。但单位面积机械动力(x10)和单位粮食能源消费量(x15)的持续制约,反映出传统工业省份在转型发展面临的资源效率瓶颈。该情况说明,虽然末端治理取得成效,但资源利用方式的根本转变仍需时日。

通过对障碍因素的系统分析,揭示区域发展面

临的共性和个性问题。共性问题主要表现为能源消费强度高、资源利用效率低等方面;个性问题则体现在不同地区因产业结构和发展阶段差异而面临的特定制约^[33]。复杂的障碍格局要求在制定发展策略时,既要注重区域协同,又要突出地方特色。

4 结论

1) 区域水—能源—粮食纽带系统呈显著的时序演进规律和空间分异特征。在研究期内,区域可持续发展经历初期缓慢增长(2010—2016年)、快速发展(2017—2019年)和稳定提升(2020—2021年)3个典型阶段。2017年成为区域发展的关键转折点,在生态文明政策驱动下,可持续指数突破性增长,区域最高值从0.56跃升至0.74,政策调控与生态治理协同效应显著。

2) 空间格局由“凹”形(2010年)向“凸”形(2020年)重构,中部新兴高值区崛起。陕西省宝鸡市通过产业与技术革新实现指数跃升117.6%,而太原、包头等重工业城市受转型滞缓拖累,分别下降6.3%与4.8%,区域发展极化凸显产业升级与路径依赖的结构性冲突。

3) 障碍因素诊断结果揭示内蒙古主导障碍由工业化学需氧量排放(障碍度9.64%)转为农业用水与能源消费双重制约;陕西省能源消费障碍度攀升至10.13%,工业污染约束锐减(从11.71%降至0.26%);山西省工业废水控制成效显著(从13.9%降至0.15%),但工业用水与能源效率仍为核心瓶颈,揭示区域资源利用模式转型的差异化挑战。

参考文献:

- [1] LEE B X, KJAERULF F, TURNER S, et al. Transforming our world: Implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators[J]. *Journal of Public Health Policy*, 2016, 37(S1): 13-31.
- [2] 高建刚,刘津滢,徐凯,等.黄河流域水—能源—粮食纽带系统效率研究[J]. *人民黄河*, 2024, 46(10): 67-71.
GAO J G, LIU J H, XU K, et al. Study on the efficiency of water-energy-food linkage system in the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 2024, 46(10): 67-71.
- [3] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水—能源—粮食耦合机理及协调发展时空演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(12): 2526-2537.
XU H, WANG Y W, ZHANG Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River basin[J]. *Resources Science*, 2021, 43(12): 2526-2537.
- [4] LI W, JIANG S, ZHAO Y, et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-

- energy-food nexus[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: e159236.
- [5] ZHANG L, JIANG X H, LI Y H, et al. Analysis of coupling coordination structural characteristics of water-energy-food-ecosystems based on SNA model: A case study in the nine provinces along the Yellow River, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2024, 135: e103654.
- [6] 孙小兵, 王海滨. 黄河水利工程建设与生态环境保护可持续发展探讨[J]. *中国水土保持*, 2025(1): 16-17.
- SUN X B, WANG H B. Construction of Yellow River water conservancy projects and sustainable development of ecological environment protection[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(1): 16-17.
- [7] HOFF H. Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn 2011 Nexus Conference: The water energy security nexus[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [8] SI Y, LI X, YIN D Q, et al. Revealing the water-energy-food nexus in the Upper Yellow River basin through multi-objective optimization for reservoir system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 1-18.
- [9] SADEGHI S H, MOGHADAM E S, DELAVAR M, et al. Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 233: e106071.
- [10] DE VITO R, PORTOGHESE I, PAGANO A, et al. An index-based approach for the sustainability assessment of irrigation practice based on the water-energy-food nexus framework[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 110: 423-436.
- [11] 姜珊, 王建华, 刘合, 等. 黄河上中游地区水—粮食—能源协同发展策略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 180-190.
- JIANG S, WANG J H, LIU H, et al. Coordinated development of water, food, and energy in upper and middle reaches of the Yellow River[J]. *Strategic Study of Cae*, 2023, 25(4): 180-190.
- [12] 杨志鹏. 黄河流域水—能源—粮食—经济系统耦合协调及其影响因素分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- YANG Z P. Coupling and coordination of water-energy-food-economy system in the Yellow River basin and its influencing factors[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [13] 赵良仕, 刘思佳. 黄河流域地级市水—能源—粮食系统耦合及空间关联研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(4): 14-23.
- ZHAO L S, LIU S J. Coupling and spatial correlation of water-energy-food system of prefecture-level cities in the Yellow River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(4): 14-23.
- [14] 吴艳霞, 邱乐. 黄河流域土地生态安全时空演化分析及预测[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 258-265.
- WU Y X, QIU L. Analysis and prediction of temporal and spatial evolution of land ecological security in Yellow River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 258-265.
- [15] 孙才志, 段兴杰. 黄河流域水资源—能源—粮食系统生态可持续发展能力评价[J]. *人民黄河*, 2023, 45(2): 85-90.
- SUN C Z, DUAN X J. Ecological sustainable development capacity assessment of water-energy-food system in the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 2023, 45(2): 85-90.
- [16] CUI S M, WU M Y, HUANG X, et al. Sustainability and assessment of factors driving the water-energy-food nexus in pumped irrigation systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 272: e107846.
- [17] WANG L, YUAN M K, LI H L, et al. Exploring the coupling coordination of urban ecological resilience and new-type urbanization: The case of China's Chengdu-Chongqing Economic Circle[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2023, 32: e103372.
- [18] WANG S S, YANG J Y, WANG A L, et al. Coordinated analysis and evaluation of water-energy-food coupling: A case study of the Yellow River basin in Shandong Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: e110138.
- [19] YANG C, ZENG W, YANG X. Coupling coordination evaluation and sustainable development pattern of geo-ecological environment and urbanization in Chongqing municipality, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: e102271.
- [20] LV Y X, LI Y, ZHANG Z X, et al. Spatio-temporal evolution pattern and obstacle factors of water-energy-food nexus coupling coordination in the Yangtze River economic belt[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 444: e141229.
- [21] WANG D, SHEN Y, ZHAO Y Y, et al. Integrated assessment and obstacle factor diagnosis of China's scientific coal production capacity based on the PSR sustainability framework[J]. *Resources Policy*, 2020, 68: e101794.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010—2021.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010—2021.
- [23] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010—2021.
- National Bureau of Statistics. China energy statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010—2021.
- [24] 国家统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010—2021.
- National Bureau of Statistics. China rural statistical year-

- book[M].Beijing: China Statistics Press,2010—2021.
- [25] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报[R].北京:水利水电出版社,2010—2021.
- People's Republic of China Ministry of water resources. China water resources bulletin [R]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press,2010—2021.
- [26] 水利部黄河水利委员会.黄河水资源公报[R].郑州:黄河水利出版社出版,2010—2021.
- Yellow River Water Conservancy Commission of Ministry of Water Resources. Bulletin of Yellow River water resources [R].Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press Publishing,2010—2021.
- [27] 赵含,李占玲,王红瑞,等.黄河中游地区水-能-粮-碳纽带关系模拟与韧性调控[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(6):9-19.
- ZHAO H, LI Z L, WANG H R, et al. Simulation and resilience regulation of water-energy-food-carbon nexus in the middle reaches of the Yellow River[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(6):9-19.
- [28] 熊华文,谭琦璐,田磊,等.黄河流域“水-能-粮”协调发展评价及优化对策[J].宏观经济管理,2024(7):25-33.
- XIONG H W, TAN Q L, TIAN L, et al. Evaluation and optimization of the “water-energy-food” coordinated development strategy in the Yellow River basin[J].Macroeconomic Management,2024(7):25-33.
- [29] 田贵良,孙泽辰,景晓栋,等.高质量发展背景下黄河流域“水-能-粮-碳”系统韧性提升策略研究[J].中国农村水利水电,2024(11):1-11.
- TIAN G L, SUN Z C, JING X D, et al. Research on strategies for enhancing the resilience of the "water energy grain carbon" system in the Yellow River basin under the background of high quality development [J]. China Rural Water and Hydropower,2024(11):1-11.
- [30] 尹登玉.面向水-能-粮和生态系统服务的黄河流域土地利用转型调控研究[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2023.
- YIN D Y. Study on land use transformation and regulation in the Yellow River basin for water-energy-grain and ecosystem services [D].Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology,2023.
- [31] 王锐,祝笑笑,彭艳艳,等.2000—2020年黄河流域水-能源-粮食系统耦合协调时空演变特征[J].水土保持研究,2024,31(1):354-362.
- WANG R, ZHU X X, PENG Y Y, et al. SpatioTemporal characteristics of water-energy-food coupling coordination in the Yellow River basin in the period from 2000 to 2020 [J].Research of Soil and Water Conservation,2024,31(1):354-362.
- [32] 王怡睿.空间均衡视角下黄河流域水-能源-粮食系统的时空演变及其影响因素[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2023.
- WANG Y R. Spatio-temporal evolution of water-energy-grain system in the Yellow River basin and its influencing factors from the perspective of spatial equilibrium [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences,2023.
- [33] 黄若鹏.黄河中下游水-能源-粮食系统安全韧性及提升路径研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2023.
- HUANG R P. Study on safety, resilience and promotion path of water-energy-grain system in the middle and lower Yellow River [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing,2023.