

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.003.

张泽琳, 周霞, 周玉玺. 黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性时空耦合及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 412-420, 431.

Zhang Zelin, Zhou Xia, Zhou Yuxi. Spatiotemporal Coupling and Driving Factors of Water Resources Carrying Capacity and Grain Production Resilience in the Lower Reaches of Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 412-420, 431.

黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性 时空耦合及驱动因素

张泽琳, 周霞, 周玉玺

(山东农业大学 经济管理学院, 山东 泰安 271028)

摘要: [目的]探究黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性协同发展水平,为推动水资源保护利用和粮食生产协调发展提供新的政策视角。[方法]基于水资源承载力和粮食生产韧性评价指标体系,采用熵权法测算2010—2021年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性指数,运用耦合协调度模型和核密度估计分析两者协调发展时空演变特征,同时借助地理探测器探究影响两者耦合协调度的主导因子和交互因子。[结果]时间维度上,水资源承载力与粮食生产韧性耦合协调度由0.484 0上升至0.747 6,耦合协调度类型由濒临失调上升至中级协同;空间维度上,两者耦合协调度最高值出现在山东省济南市,最低值集中在河南省境内;年降水量、居民生活用水量、城市绿地面积、耕地面积和财政支农力度5项因子是两者协调发展的主导驱动因子,各主导因子的交互作用解释力表现呈现为双因子增强或非线性增强的特征。[结论]黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度逐年上升并逐渐呈现出“东高西低”的空间分布特征,同时两大系统发展日趋紧密,交互作用逐渐增强。

关键词: 黄河下游; 水资源保护粮食安全; 耦合协调度; 地理探测器

中图分类号: F323.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0412-09

Spatiotemporal Coupling and Driving Factors of Water Resources Carrying Capacity and Grain Production Resilience in the Lower Reaches of Yellow River

Zhang Zelin, Zhou Xia, Zhou Yuxi

(School of Economics and Management, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271028, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the coordinated development level of water resources carrying capacity and grain production resilience in the lower Yellow River, and to provide a new policy perspective for promoting the coordinated development of water resources protection and utilization and grain production. [Methods] Based on the evaluation index system of water resources carrying capacity and grain production toughness, the index of water resources carrying capacity and grain production toughness in the lower reaches of the Yellow River during 2010—2021 was estimated by entropy weight method, and the spatiotemporal evolution characteristics of their coordinated development were analyzed by coupling coordination degree model and kernel density estimation. At the same time, the dominant factors and interaction factors affecting the coupling coordination degree of the two were explored by means of geographic detectors. [Results] In time dimension, the coupling coordination degree between water resources carrying capacity and grain production toughness increased from 0.484 0 to 0.747 6, and the coupling

收稿日期: 2023-07-16

修回日期: 2023-07-25

资助项目: 国家社科资助项目“水资源非农化对粮食生产脆弱性的影响及调控政策研究”(21BJY130); 山东省乡村振兴研究课题(XCZX2023105)

第一作者: 张泽琳(1990—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事农业经济与政策研究。E-mail: 379742550@qq.com

周霞(1971—), 女, 新疆焉耆人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业资源与环境管理研究。E-mail: sofia612@sdaa.edu.cn

通信作者: 周玉玺(1969—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农业资源与环境管理。E-mail: sofia612@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

coordination type increased from near imbalance to intermediate coordination. In terms of spatial dimension, the highest value of the coupling coordination degree between the two was found in Jinan, Shandong Province, and the lowest value concentrated in Henan Province. Annual precipitation, residential water consumption, urban green area, cultivated land area and financial support to agriculture were the main driving factors on the coordinated development of the two, and the explanatory power of the interaction of the leading factors showed the characteristics of double factor enhancement or nonlinear enhancement. [Conclusion] The coupling coordination degree of water resources carrying capacity and grain production toughness in the lower reaches of the Yellow River increased year by year and gradually showed a spatial distribution of high level in the east and low level in the west. At the same time, the development of the two systems was increasingly close, and the interaction was gradually enhanced.

Keywords: lower reaches of the Yellow River; water resources protection; food security; coupling coordination degree; geographic detector

保障国家粮食安全是抵御各类风险、稳定国家大局的坚实基础。近年来,中国粮食产量稳定增长,粮食产能基本稳定在 6.5 万 t 以上。但在粮食生产过程中造成的农业面源污染、地下水资源超采等问题使资源环境约束日益趋紧,给中国粮食安全保障带来严峻挑战^[1]。水资源是推动社会经济可持续发展的重要基础,是保障粮食生产的关键要素。现阶段随着水资源的开发利用程度的提高,区域水资源供求矛盾、用水效率低、水环境污染等问题逐渐暴露并成为制约区域可持续发展和粮食产量稳定的重要因素^[2]。因此,厘清粮食生产和农业水资源间适配关系并推动两者协调发展对保障中国粮食安全、实现区域可持续发展具有重要意义。

韧性是社会—生态系统可持续发展的先决条件,早期被应用于工程领域,工程韧性主要强调系统受到外部干扰后恢复原始均衡状态的能力^[3]。随着学界对于系统特征和运行机理认识的不断深入,韧性概念被引入到生态领域。Holling 等^[4]定义了生态系统中韧性,认为其是用来衡量系统持久性、吸收变化以及抗干扰的能力。但在系统变化日益复杂的背景下,生态韧性的认知规范也逐渐显现出说服力不足等问题,在这种背景下演化韧性观点应运而生并受到广泛认可。演化韧性强调系统韧性是系统自身的固有属性,是一种通过调整结构、改变路径实现可持续发展的能力^[5]。以演化韧性为参照基准,Toth 等^[6]将粮食韧性定义为粮食系统抵御冲击及学习和适应内外部条件变化的能力,并对粮食韧性与脆弱性进行了区分,认为韧性更广泛地描述了粮食系统在不断变化条件下生产和分配粮食的能力。Jacobi 等^[7]则根据演化韧性特点提出粮食韧性包括缓冲能力、自组织能力和学习使用能力 3 个维度。Monika 等^[8]则通过梳理过往相关研究,认为应从稳定能力、适应能力和创新能力 3 个方面构建粮食体系韧性。承载力概念起源于

生态学,后被逐步应用于经济学、可持续性科学等多个学科。水资源承载力代表了水资源对区域社会经济发展的约束力,对水资源承载力内涵的认识也随着社会经济的发展而逐步丰富,从水资源利用程度^[9]发展到目前包含规模、人口和生态等的多维度支撑^[10-11]。与此同时,学者们运用包括模糊评价法^[12]、突变级数法^[13]、改进指标赋权法等^[14]不同方法对水资源承载力进行评价。

推动水资源承载力和粮食生产韧性协同发展对保障中国粮食安全、促进黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。然而,通过梳理相关文献不难发现,在粮食生产领域对韧性的研究相对较少,且缺乏对水资源承载力和粮食生产韧性间协调关系的深入探讨。鉴于此,本文以 2010—2021 年作为研究时段,构建水资源承载力和粮食生产韧性指标,借助熵权法、耦合协调度模型、核密度估计、地理探测器等方法,揭示黄河下游水资源承载力、粮食生产韧性和两者耦合协调关系的时空演变特征及其影响因素,以期明晰黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性现状,为推动水资源保护利用和粮食生产协调发展提供新的政策视角,并为黄河流域其他地区生态保护和高质量发展提供借鉴。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究区概况

河南省郑州市桃花峪以下的黄河河段为黄河下游,河段全场 786 km,流域面积约 2.3 万 km²,占全流域面积的 3%,区间增加水量占黄河水量的 3.5%。黄河下游是中国主要粮食产区,同时在黄河流域生态保护和高质量发展国家战略格局中具有重要地位。该区域水资源总量短缺,其水资源仅占全国总量的 2.48%。同时该区域高耗水作物种植比重较大,农业用水始终维持在 60% 以上。水资源总量短缺、承载

力不高严重制约着黄河下游粮食产业可持续发展。因此,本文选择将黄河下游作为研究区域。

黄河下游始自郑州桃花峪,终至东营黄河入海口,自西向东流经河南、山东两省,流经城市较多。考虑到河南省区域社会经济发展和中原城市群建设的统一布局,本文将黄河中游属河南省的三门峡、洛阳和济源纳入到研究区域当中^[15]。因此,本文研究区域包括三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州、新乡、开封、濮阳、菏泽、济宁、泰安、聊城、济南、德州、滨州、淄博和东营 17 个地市。

1.2 指标体系构建

1.2.1 水资源承载力 水资源承载力是在以保障生态环境良性循环和可持续发展的前提下为实现区域社会经济发展的水资源最大可开发利用规模^[16]。水资源承

载力涵盖水资源禀赋、社会经济系统支撑、生态环境保障等多重因素,学者们从不同角度构建了水资源承载力评价指标,但都强调了水资源对经济、社会和生态等系统的“支撑能力”。因此本文在前文研究的基础上^[17-18],在确保指标体系整体性的原则下,结合黄河下游水资源分布不均、农业用水量占比高等特点,将水资源承载力划分为水资源系统、社会经济系统以及生态环境系统 3 个子系统,并选取 13 项指标构建指标体系。在水资源子系统内,主要选择降雨量、人均水资源量等指标来反映区域水资源禀赋情况;在社会经济子系统内,选择人均 GDP、城镇化水平、万元工业增加值等指标来表示地区社会经济发展水平;在生态环境子系统内,选择绿地面积、生态环境用水率等来表征地区生态环境保护水平。具体内容见表 1。

表 1 水资源承载力和粮食生产韧性指标体系

Table 1 Index system of water resources carrying capacity and grain production toughness

目标层	准则层	指标	计算方法	指标性质
水资源承载力	水资源系统	年降水量(10^8 m^3) A_1	统计数据	+
		人均水资源量($\text{m}^3/\text{人}$) A_2	水资源总量/地区总人口	+
		产水模数($\text{万 m}^3/\text{km}^2$) A_3	水资源总量/地区总面积	+
		水资源开发利用指数(%) A_4	水资源开发利用量/可利用水资源总量	-
		人均 GDP(元/人) A_5	GDP 总量/地区总人口	+
	社会经济系统	城镇化水平(%) A_6	城市人口/总人口	+
		万元工业用水量(万 m^3) A_7	统计数据	-
		居民生活用水量(万 m^3) A_8	统计数据	-
		工业废水排放量(万 m^3) A_9	统计数据	-
		经济密度(元/ km^2) A_{10}	GDP 总量/地区总面积	+
	生态环境系统	城市绿地面积(hm^2) A_{11}	统计数据	+
		生态环境用水率(%) A_{12}	生态环境用水量/用水总量	+
		城市生活污水处理率(%) A_{13}	统计数据	+
		耕地面积(千 hm^2) B_1	统计数据	+
粮食生产韧性	抵抗能力	粮食播种面积占比(%) B_2	粮食播种面积/农作物播种面积	+
		有效灌溉率(%) B_3	有效灌溉面积/农作物播种面积	+
		地均劳动力(人/ hm^2) B_4	农业从业人员/耕地面积	+
		人均粮食产量($\text{kg}/\text{人}$) B_5	粮食总产量/地区总人口	+
		农药施用强度(%) B_6	农药使用量/播种面积	-
	适应能力	化肥施用强度(%) B_7	化肥施用量/播种面积	-
		复种指数(%) B_8	农作物播种面积/耕地面积	+
		农业固定资产投资(亿元) B_9	统计数据	+
	变革能力	粮食单产(kg/hm^2) B_{10}	粮食总产量/粮食播种面积	+
		农林牧渔服务业增加值(亿元) B_{11}	统计数据	+
		农业科研支出(亿元) B_{12}	统计数据	+
		单位面积机械总动力($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{hm}^2$) B_{13}	农业机械总动力/播种面积	+
		财政支农力度(%) B_{14}	农林水事物支出/耕地面积	+

1.2.2 粮食生产韧性 根据上述对粮食韧性定义的理解,借鉴郝爱民等^[19]经验,结合黄河下游粮食生产实际

情况,本文从抵抗能力、适应能力以及创新能力 3 个子系统层面构建粮食生产韧性指标体系,反映粮食生产韧

性的静态特征、动态特征和弹性属性(表 1)。

抵抗能力主要表现在粮食生产过程中在各种外部环境变化的情况下保持稳定的能力,因此该维度选择能够代表粮食主要生产条件的各项指标,主要包括耕地面积、粮食播种面积占比等,以上指标能够有效反映在社会经济发展过程中粮食稳定生产的能力;适应能力主要强调粮食生产在遭遇外部风险时的复原能力,在选择时注重粮食生产过程中的经济和生态弹性等指标。复种指数等指标能够有效刻画粮食生产在遭遇自然风险和市场风险后恢复到原始状态的能力;变革能力主要刻画粮食生产在遭受冲击后自我调整及创新能力,因此在选择时主要考虑外部支持和改进创新等指标。农业研制支出、粮食单产水平等指标能够清晰描述粮食生产改进、技术创新等状况。

1.3 研究方法

1.3.1 熵权法 本文运用熵权法对黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性进行综合测算,在进行测算前为消除指标量纲所产生的影响,首先对通过极值法根据指标正向和负向进行不同的标准化处理:

正向指标:

$$y_{kij} = [x_{kij} - \min(x_{kij})] / [\max(x_{kij}) - \min(x_{kij})]$$
(1)

负向指标:

$$y_{kij} = [\max(x_{kij}) - x_{kij}] / [\max(x_{kij}) - \min(x_{kij})]$$
(2)

式中: x_{kij} 为原始数值; y_{kij} 为标准化后数值; $\max(x_{kij})$ 和 $\min(x_{kij})$ 分别为该指标的最大值和最小值。经过标准化处理后所有数值均在[0,1]范围内。

其次采用客观赋权法来确定各指标权重。

$$P_{kij} = y_{kij} / \sum_{k=1}^m y_{kij}, e_{kj} = [-1 / \ln(m)] \sum_{i=1}^m p_{kij} \ln p_{kij}$$
(3)

$$w_j = (1 - e_{kj}) / \sum_{i=1}^m (1 - e_{ki})$$
(4)

1.3.2 耦合协调度模型 促进水资源承载力和粮食生产韧性匹配与协调是保障中国粮食安全,实现中国农业可持续发展的重要内容。为此,本文运用耦合协调度模型计算两个系统的耦合协调度,以表示其协同发展程度。具体计算公式为:

$$C = \sqrt{(WG) / [(W+G) / 2]^2}$$
(5)

$$T = \alpha W + \beta G$$
(6)

$$D = \sqrt{CT}$$
(7)

式中: W 和 G 分别为水资源承载力和粮食生产韧性系数; C 为耦合度; T 为协同系数; D 为耦合协调度; α 和 β 为协同系数,且满足 $\alpha + \beta = 1$,本文认为水资源承载力与粮食生产韧性同等重要,因此令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

此外,为直观反映黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性的协调性,借鉴廖重斌的研究成果,本文将耦合协调度划分为 10 个等级^[20],具体见表 2。

1.3.3 核密度估计 核密度估计能够通过连续的密度函数描述随机变量的分布状态、分布差异和演变特征,是在概率论用来估计未知的一种非参数检验方法。本文采用 epanechnikov 核函数绘制 2010—2021 年黄河下游十七地市水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度的核密度曲线,并根据曲线位置、形态、走势等信息描绘并判断两者耦合协调度的时序特征。

1.3.4 地理探测器 地理探测器是一种广泛应用于因子驱动力研究的统计学方法,能够有效探测地理要素的空间分异性及其背后驱动力。本文为探寻黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性耦合协调发展的驱动影响因素,并探究其主导因子和交互因子,因此利用地理探测器中的因子探测器和交互探测器进行相关研究。

表 2 耦合协调等级分类

Table 2 Classification of coupling coordination levels			
协同意度范围	协同意度等级	协同意度范围	协同意度等级
[0,0.1]	极度失调	(0.5,0.6]	勉强协同
(0.1,0.2]	严重失调	(0.6,0.7]	初级协同
(0.2,0.3]	中度失调	(0.7,0.8]	中度协同
(0.3,0.4]	轻度失调	(0.8,0.9]	良好协同
(0.4,0.5]	濒临失调	(0.9,1]	优质协同

(1) 因子探测器。因子探测器能够解释单因子的影响力程度,同时该方法能有效免疫多重共线性,因此符合从多个指标中寻找关键影响因素的要求。本文将黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性各子系统的指标作为影响因子以寻找两者耦合协调发展的主导因子。同时,在进行探测前利用 SPSS 22.0 软件中的 K-means 聚类方法将各影响因素转变为离散型变量,具体模型为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$$
(9)

式中: h 为因子 X 的分层; N 和 σ^2 研究区样本数和 Y 值的方差; N_h 和 σ_h^2 为探测区样本数和 Y 值的方差; q 为因子探测的值,取值范围为[-1,1], q 值越大表明影响因子 X 的解释力越强。

(2) 交互探测器。交互探测器用以探测不同影响因子间的交互作用,判别方式如表 3 所示。

1.4 数据来源

研究时段为 2010—2021 年,因此本文研究所有数据来自于 2011—2022 年《中国城市统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《河南统计年鉴》《山东统计年鉴》《山东水资源公报》《河南水资源公报》以及各地市统

计年鉴及水资源公报,部分缺失值利用线性拟合和周围近似值替代的方式进行处理。

表 3 交互因子分类

Table 3 Classification of interaction factors

判断依据	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性水平的时序演变特征

根据所构建的指标体系,计算出 2010—2021 年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性的系数,结果如图 1 所示。综合来看,在研究期内,黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性呈逐步上升态势,水资源承载力由 2010 年的 0.396 上升至 2021 年的 0.526,粮食生产韧性同期由 0.271 上升至 0.389,年均分别上涨 0.012,0.011。同时,根据两者的动态走势,可分别将其划分为 3 个和 2 个阶段。

从黄河下游水资源承载力上看,可将其划分为平台波动期(2010—2014 年)、波动上升期(2015—2018 年)和快速上升期(2019—2021 年)。第一阶段,水资源承载力系数处于[0.390,0.414]间波动,位于一个相对稳定的阶段。在该时期内,政府出台多项水利改革措施以促进水资源可持续发展,但伴随着中国工业的快速发展,水污染及利用率水平低等问题不断出现,一定程度上制约了水资源承载力的上升;第二阶段,水资源承载力由 2015 年的 0.42 波动上升至 2018 年的 0.469。在该阶段,中国推行了水资源开发利用总量控制,用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”,不断提高水资源利用效率,加强水资源保护,为提升黄河下游水资源承载力起到重要推动作用,但这一时期各地区间相关水资源可持续发展政策落实存在不平衡等问题也在一定程度上制约了水资源承载力的提高;第三阶段,水资源承载力由 2019 年的 0.455 上升至 2021 年的 0.526。在这一时期,中国不断完善生态保护补偿市场体系。同时,黄河下游不断加强落实各项深度节水控水举措,加快推进建设节水型社会,水资源承载力步入快速提升阶段。

从黄河下游粮食生产韧性上看,可划分为缓慢上升期(2010—2015 年)和快速上升期(2016—2021

年)。在第一阶段,粮食生产韧性从 0.271 逐步上涨至 0.304。黄河下游作为中国主要粮食产区正在该时期正处于农业发展的“黄金期”^[21],现代农业装备水平不断提高,农业发展方式发生转变,粮食生产韧性也随之逐步上升,但在粮食产业发展的同时,生产要素的低效利用对黄河下游资源环境造成一定负面影响,粮食安全结构性问题、抵御风险能力不足及现代农业发展过程中深层次矛盾也在一定程度上抑制了粮食生产韧性的提高^[22];在第二阶段,中国将粮食安全问题放在突出问题。粮食产业结构不断升级调整,农业机械化、数字化和智能化的逐步升级助推着中国粮食产业抵抗风险能力的增强。同时在这一时期,生态文明建设上升为国家战略,黄河下游各地生态文明水平不断提高,粮食生产韧性也随着绿色农业、生态农业的推进而提升。

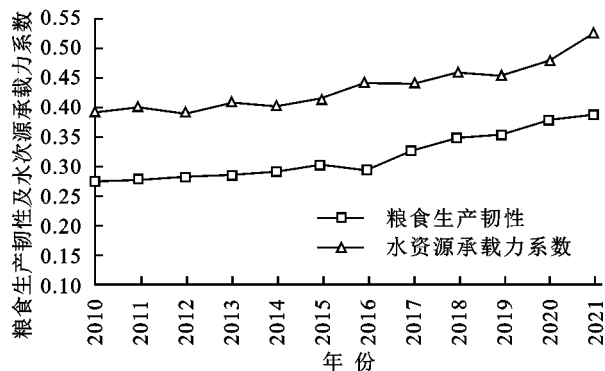


图 1 2010—2021 年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性系数动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of water resources carrying capacity and grain production toughness coefficient in the lower Yellow River from 2010 to 2021

2.2 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调的时序演化特征

首先测算黄河下游十七地市 2010—2021 年水资源承载力、粮食生产韧性、耦合度、耦合协调度。其次,为更直观反映各项指标的时间演化特征,将黄河下游各城市视为一个整体,逐年 17 地市指标数据求算术平均值,详细结果见表 4。其中, T_w 代表水资源承载力得分, T_g 代表粮食生产韧性得分。

在 2010—2021 年区间内,黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度从 0.48 逐步上升至 0.75,增幅约为 54.46%,耦合协调度等级由濒临失调上升至中度协同,耦合协调关系趋于强化。为动态展示黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调关系的时间演化特征,本文借助 Stata 15.0 软件对 2010 年、2014 年、2018 年、2021 年 4 年的水资源承载

力和粮食生产韧性的核密度分布进行了分析,2010—2021 年的核密度曲线存在逐渐“右移”的趋势,其曲线区间由[0.2,0.7]逐步移动至[0.4,0.9]。表明黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度随时间推移呈现出不断上升的特征。同时,从曲线形态上看,曲线的右尾逐渐拉长,波峰高度逐渐降低,由尖峰形态向宽峰形态演进,在一定程度上呈现出分布延展性存在拓宽趋势,表明在黄河下游这一区域内各地市间的耦合协调度差异性在逐步加大。

2.3 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调的空间差异特征

为进一步探究黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性协同发展的地区差异状况,本文选取 2010 年、2014 年、2018 年、2021 年 4 个年份,运用 ArcGIS 10.8 软件绘制出黄河下游 17 地的水资源承载力和粮食生产韧性协同发展状况的空间格局,具体见图 2。

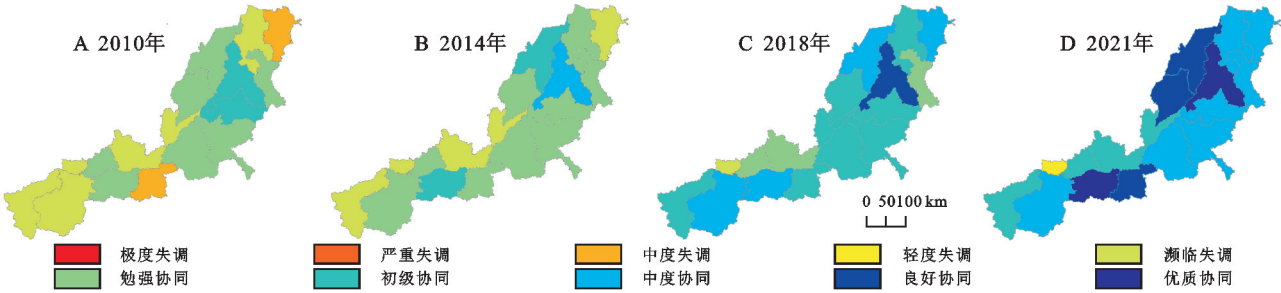


图 2 黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性耦合协调情况的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of coupling coordination between water resources carrying capacity and grain production toughness in the lower Yellow River

2010 年耦合协调值空间分布缺乏规律性,其中最低值 0.245 出现在河南省开封市,最高值 0.685 出现在山东省济南市。其中,处于中度失调区间的包括开封市和东营市,处于濒临失调和勉强协同的地区分别有 7 个和 6 个。在这一时期,黄河下游的耦合协调程度总体较低,一个重要的原因是粮食生产要素利用效率低。为保证粮食产量,化肥等化学物质的过量投入对生态环境造成一定负面冲击。同时,由于水利基础设施的不完备以及农户缺乏节水意识,水资源粗放利用和水污染问题严重阻碍了水资源承载力与粮食生产韧性协同发展。

2014 年的耦合协调水平有一定程度提升,该阶段最低值 0.473 出现于河南省新乡市,最高值 0.705 出现在山东省济南市。开封和东营在该时段已脱离中度失调区间,位于濒临失调和勉强协调区间的地区分别有 5 个和 9 个。在这一时期,黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性逐步呈现出“东高西低”的特点,山东 9 市耦合协调均值 0.573 明显高于河南 8 市的

表 4 2010—2021 年黄河下游水资源承载力与粮食生产韧性耦合协调指标均值
Table 4 Mean value of the coupling coordination index of water resources carrying capacity and grain production toughness in the lower Yellow River from 2010 to 2021

年份	T_w	T_g	耦合协调度	耦合协调度类型
2010	0.3955	0.2711	0.4840	濒临失调
2011	0.4001	0.2786	0.5157	勉强协同
2012	0.3899	0.2840	0.5037	勉强协同
2013	0.4138	0.2860	0.5430	勉强协同
2014	0.4030	0.2941	0.5457	勉强协同
2015	0.4195	0.3045	0.5737	勉强协同
2016	0.4407	0.2961	0.5832	勉强协同
2017	0.4401	0.3254	0.6133	初级协同
2018	0.4685	0.3452	0.6585	初级协同
2019	0.4545	0.3588	0.6591	初级协同
2020	0.4755	0.3756	0.6928	初级协同
2021	0.5262	0.3891	0.7476	中度协同

0.516,这可能与地区所处位置有关。山东 9 市地处华北平原,农业水资源丰富,水资源承载力水平和其与粮食生产韧性协同性较好,同时地势平缓,农业生产条件较好,灌溉效率高,这一定程度上提升了水资源承载力与粮食生产韧性间的协调水平。

2018 年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调水平进一步提升,最低值 0.420 和最高值 0.857 分别出现在河南省济源和山东省济南。济源地处豫西黄土高原过渡区,区域内山地众多,农业生产条件差,灌溉效率低,这也导致了其水资源承载力与粮食生产韧性协调性较差。处于濒临失调和勉强协同的地区分别为 3 个和 8 个,河南省郑州市、洛阳市以及山东省济南市、东营市和德州市均已位于中度协同以上程度。在该时段“东高西低”的空间分布特征依然存在,山东 9 市的耦合协调度均值 0.695 显著高于河南 8 市的 0.617。

2021 年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协同水平提升较快且“东高西低”分布特点显著

性加强,耦合协调最低值 0.364 和最高值 0.937 分别出现在河南省济源市和山东省济南市,除河南省济源市外其他区域均已位于初级协同以上水平,且位于中度协同以上程度的城市由 5 个增加值 12 个。主要原因在于在该阶段黄河下游农业生产科技水平迅速发展,粮食生产条件稳定,抵抗风险能力逐步加强,粮食产业迅速发展的同时不再以破坏包括水资源在内的资源环境为前提条件。同时,中国对于农业和水资源可持续发展重视程度不断增强,陆续出台了《乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》《水利部关于实施黄河流域深度节水控水行动的意见》等一系列政策。很大程度上推动了黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性的系统发展水平。

2.4 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调的驱动因子分析

为进一步探讨黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调关系的驱动影响因素,本文借助 GeoDetector 2 018 计算各项主导因子和交互因子的 q 值,结果如表 5 所示。

(1) 主导因子分析。对 2010—2021 年黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协同的驱动因子进行探测后发现,年降水量(A_1)、居民生活用水量(A_8)、城市绿地面积(A_{11})、耕地面积(B_1)和财政支

农力度(B_{14})5 项因子出现频率超过 75%,可以确定以上 5 项因子为影响水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度的主导驱动因子,表明在黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性协同发展主要受到粮食生产条件、政策支持和生态环保治理等因素的影响。

从时间维度上看,首先,在 2010 年粮食生产韧性系统层中有 4 个因子在 10 个主导因子中,且解释力靠后。而到 2021 年粮食生产韧性和水资源承载力系统层均有 5 个因子在主导因子当中,同时两系统层解释力程度相当,表明在水资源和粮食生产的协同发展当中,粮食体系各项指标贡献与水资源各指标贡献日趋均衡,对两者协同发展均具有重要作用。其次,政策支持对于黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性协同发展存在长久推动力。具体表现为在所选 4 个时间段内财政支农力度(B_{14})持续存在于 10 项主导因子当中,解释力稳定在 0.4 以上并逐步增强。这说明在推动黄河下游粮食产业和水资源可持续发展中重视相关政策的制定和落实能够为两者的协同发展起到关键作用。同时,生态环保措施是两者协同发展的重要保障。自 2014 年起,城市绿地面积(A_{11})一直位于主导因子中且其解释力稳定保持在 0.45 以上,说明适宜的生态环保措施能有效促进水资源承载力和粮食生产韧性协同发展。

表 5 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性协同发展的主导因子

Table 5 Leading factors of the coordinated development of water resources carrying capacity and grain production resilience in the lower Yellow River

2010 年		2014 年		2018 年		2021 年	
主导因子	q 值	主导因子	q 值	主导因子	q 值	主导因子	q 值
A_8	0.5238	A_{11}	0.7233	B_{14}	0.6945	B_{14}	0.7322
A_5	0.4729	A_8	0.7128	B_3	0.5951	A_{11}	0.6609
B_{12}	0.4364	B_{12}	0.6370	B_1	0.4765	B_1	0.6473
B_4	0.4300	B_8	0.5477	A_1	0.4589	B_3	0.6189
A_1	0.4196	A_1	0.5205	A_{11}	0.4523	A_{12}	0.5823
B_{14}	0.4185	A_7	0.4958	A_2	0.4279	A_8	0.5684
B_2	0.4066	A_4	0.4078	A_6	0.3875	A_2	0.5566
A_6	0.3349	B_1	0.4020	A_7	0.3487	B_4	0.4928
A_3	0.3247	B_{14}	0.4005	B_{11}	0.3445	A_3	0.4685
A_{10}	0.2510	B_7	0.3648	B_8	0.3337	B_6	0.4451

(2) 交互因子分析。为进一步探究不同驱动因子间发生交互作用后对黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调程度的解释力变化情况,本文参考前人研究^[23],选取从因子探测器中筛选出现频率超过 75%的 5 项主导因子,分析其交互作用的时序变化特征,并识别其交互类型,具体结果如表 6 所示。

综合来看,各主导因子间联系较为紧密,双因子间的交互作用的解释力明显强于单驱动因子的解释力。

具体来看,各驱动因子交互项解释力呈现出三点特征:在 2010—2021 年,降雨量与居民生活用水量的交互项($A_1 \cap A_8$)解释力由 2010 年的 0.957 9 下降至 2021 年的 0.756 9,与城市绿地面积的交互项($A_1 \cap A_{11}$)解释力由 0.834 5 下降至 0.799 4,居民生活用水量与城市绿地面积($A_8 \cap A_{11}$)的交互项解释力由 0.955 7 下降至 0.919 3,这表明水资源承载力内部驱动因子间的交互作用在逐步下降;在同一时期,耕地面积与财政支农力度的交互项

$(B_1 \cap B_{14})$ 解释力由 0.816 2 上升至 0.865 8,粮食生产韧性内部驱动因子交互作用在逐步增强,进一步验证了保证粮食生产要素的合理投入和相应的政策支持能有效推动水资源承载力与粮食生产韧性的协同发展;水资源承载力系统层内的驱动因子和粮食生产韧性系统层内的驱动因子交互项($A_1 \cap B_1, A_1 \cap B_{14}, A_8 \cap B_1, A_{11} \cap B_1, A_{11} \cap B_{14}$)解释力在逐步增强,这表明两大系统发展日趋紧密,协调程度不断增强。

表 6 黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协同的交互因子

Table 6 Interaction factors of coupled synergistic interaction between water resources carrying capacity and grain production toughness in the lower Yellow River

交互因子	2010 年		2014 年		2018 年		2021 年	
	q 值	交互类型	q 值	交互类型	q 值	交互类型	q 值	交互类型
$A_1 \cap A_8$	0.9579	双因子增强	0.7652	双因子增强	0.7010	双因子增强	0.7569	双因子增强
$A_1 \cap A_{11}$	0.8345	非线性增强	0.7233	双因子增强	0.7091	双因子增强	0.7994	双因子增强
$A_1 \cap B_1$	0.7865	非线性增强	0.7427	双因子增强	0.8548	双因子增强	0.8931	双因子增强
$A_1 \cap B_{14}$	0.8077	双因子增强	0.7707	双因子增强	0.8018	双因子增强	0.9150	双因子增强
$A_8 \cap A_{11}$	0.9557	非线性增强	0.8999	双因子增强	0.6632	非线性增强	0.9193	双因子增强
$A_8 \cap B_1$	0.7161	双因子增强	0.8420	双因子增强	0.6330	非线性增强	0.9126	双因子增强
$A_8 \cap B_{14}$	0.9941	双因子增强	0.8909	双因子增强	0.8757	非线性增强	0.9116	双因子增强
$A_{11} \cap B_1$	0.5457	非线性增强	0.8709	双因子增强	0.8397	双因子增强	0.9020	双因子增强
$A_{11} \cap B_{14}$	0.6923	非线性增强	0.8776	双因子增强	0.8628	双因子增强	0.9193	双因子增强
$B_1 \cap B_{14}$	0.8162	非线性增强	0.5881	双因子增强	0.8397	双因子增强	0.8658	双因子增强

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 时间维度上,黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度具有逐年上升趋势,由 2010 年的濒临失调上升至 2021 年的中度协同。其中,水资源承载力由 2010 年的 0.396 上升至 2021 年的 0.526,粮食生产韧性同期由 0.271 上升至 0.389。

(2) 空间维度上,黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性逐渐呈现出“东高西低”的空间分布特征,高值区集中在山东省及河南省东南部地区,低值区集中在河南省西北部。

(3) 从黄河下游水资源承载力和粮食生产韧性耦合协调度的影响因素上看,年降水量、居民生活用水量、城市绿地面积、耕地面积和财政支农力度 5 项因子是两者协调发展的主导驱动因子,表明保障粮食生产要素投入、相关政策支持以及各项生态环保措施的落实对于两者协同发展具有积极影响。同时,各主导因子的交互作用解释力显著强于单因子解释力,说明黄河下游粮食产业和水资源可持续发展受多种因素共同影响。

3.2 政策建议

第一,建立健全黄河下游非农产业耗水标准,保证农业用水安全。黄河下游是中国主要粮食产区,在该区域内农业用水量大,在总用水中占比高,因此应优化用水结构,防治农业用水被过度挤压,不断提升粮食生产用水质量和数量。同时要加强各类水利基

础设施建设,推广各类新型农业节水和灌溉技术,不断提升农业用水效率。

第二,协同推进黄河下游粮食产业和水资源可持续发展。一方面,加强对种粮利益保障和补偿的政策支持力度,保证粮食生产要素的合理投入,因地制宜地调整粮食生产布局和种植结构,发挥不同地区的资源禀赋优势;另一方面,在充分确保粮食安全的前提下,加大绿色农业生产技术推广力度,科学制定绿色农业、生态农业发展规划,实现粮食生产效益和水资源效益双提升。

第三,充分发挥政府在粮食产业和水资源可持续发展中的关键作用。在制定各项粮食生产保障和水资源保护政策的过程中“以需定策”,及时发现粮食生产和水资源保护中的“关键问题”,科学合理制定相关支持政策。同时应加快建立反馈联动机制,加强对粮食产业和水资源可持续协同发展的动态监管。

参考文献(References):

[1] 张华,王礼力.中国农业水贫困评价及时空特征分析[J]. 资源科学,2019,41(1):75-86.
Zhang H, Wang L L. Evaluation and spatiotemporal characteristics of agricultural water poverty in China [J]. Resources Science, 2019,41(1):75-86.

[2] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269.
Liu J J, Dong S C, Li Z H. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in China[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(2):258-269.

- [3] 曾冰.区域经济韧性内涵辨析与指标体系构建[J].区域金融研究,2020(7):74-78.
Zeng B. Connotation analysis and index system construction of regional economic resilience[J]. Regional Finance Research, 2020(7):74-78.
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.
- [5] 王松茂,牛金兰.山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J].经济地理,2022,42(8):51-61.
Wang S M, Niu J L. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2022,42(8):51-61.
- [6] Toth A, Rendall S, Reitsma F. Resilient food systems: a qualitative tool for measuring food resilience[J]. Urban Ecosystems, 2016,19:19-43.
- [7] Jacobi J, Mukhovi S, Llanque A, et al. Operationalizing food system resilience: An indicator-based assessment in agroindustrial, smallholder farming, and agroecological contexts in Bolivia and Kenya[J]. Land Use Policy, 2018,79:433-446.
- [8] Zurek M, Ingram J, Sanderson B A, et al. Food system resilience: concepts, issues, and challenges[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2022,47:511-534.
- [9] Daily G C, Ehrlich P R. Socioeconomic equity, sustainability, and Earth's carrying capacity[J]. Ecological Applications, 1996,6(4):991-1001.
- [10] 丁超,胡永江,王振华,等.虚拟水社会循环视域下的水资源承载力评价[J].自然资源学报,2021,36(2):356-371.
Ding C, Hu Y J, Wang Z H, et al. Evaluation of water resources carrying capacity from the perspective of virtual water social circulation[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(2):356-371.
- [11] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.
Xia J, Zhu Y Z. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002,17(3):262-269.
- [12] 段新光,栾芳芳.基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):119-122.
Duan X G, Luan F F. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Population, Resources and Environment, 2014,24(S1):119-122.
- [13] 鲍珂宇,何刚,金兰,等.基于突变级数法的安徽各市相对资源承载力研究[J].地域研究与开发,2021,40(4):39-44.
Bao K Y, He G, Jin L, et al. Study on the relative resource carrying capacity of Anhui cities based on the mutation progression method[J]. Areal Research and Development, 2021,40(4):39-44.
- [14] 王瑛,付艳淙.改进指标赋权法的水资源承载力动态综合评价[J].统计与信息论坛,2022,37(7):98-107.
Wang Y, Fu Y C. Dynamic comprehensive evaluation of water resources carrying capacity using improved index weighting method[J]. Statistics and Information Forum, 2012,37(7):98-107.
- [15] 彭立,邓伟,谭静,等.横断山区水土资源利用与经济增长的匹配关系[J].地理学报,2020,75(9):1996-2008.
Peng L, Deng W, Tan J, et al. The matching relationship between land and water resources utilization and economic growth in Hengduan Mountain area[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,75(9):1996-2008.
- [16] 张宁宁,粟晓玲,周云哲,等.黄河流域水资源承载力评价[J].自然资源学报,2019,34(8):1759-1770.
Zhang N N, Su X L, Zhou Y Z, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(8):1759-1770.
- [17] 杨广,何新林,李俊峰,等.玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法[J].生态学报,2011,31(9):2407-2413.
Yang G, He X L, Li J F, et al. Evaluation methods for sustainable use of water resources in Manas River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(9):2407-2413.
- [18] 热孜娅·阿曼,方创琳,赵瑞东.新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1576-1585.
Geziya A, Fang C L, Zhao R D. Evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in Xinjiang[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,29(7):1576-1585.
- [19] 郝爱民,谭家银.数字乡村建设对我国粮食体系韧性的影响[J].华南农业大学学报:社会科学版,2022,21(3):10-24.
Hao A M, Tan J Y. Impact of digital rural construction on resilience of food system in China[J]. Journal of South China Agricultural University(Social Sciences Edition), 2022,21(3):10-24.
- [20] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999,19(2):12-16.
Liao C B. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 1999,19(2):12-16.

- [22] 毛蒋兴,韦统,张芳.基于多源数据的北部湾城市群都市圈识别与发展规划建议[J].规划师,2020,36(7):53-59.
Mao J X, Wei T, Zhang F. Identification and planning proposals for the metropolitan area of beibu bulf urban agglomeration based on multi-sourced data[J]. Planners, 2020, 36(7): 53-59.
- [23] 张鹏岩,杨丹,李二玲,等.人口城镇化与土地城镇化的耦合协调关系:以中原经济区为例[J].经济地理,2017, 37(8):145-154.
Zhang P Y, Yang D, Li E L, et al. The coupling and coordination relationship between population urbanization and land urbanization: A case study of the central plains economic zone as an example [J]. Economic Geography, 2017, 37(8): 145-154.
- [24] Liu Y L, Zhang X H, Kong X S, et al. Identifying the relationship between urban land expansion and human activities in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Applied Geography, 2018, 94: 163-177.
- [25] 刘超,罗建美,霍永伟,等.陕西省县域土地利用效益与城镇化的时空变化及协调性分析[J].水土保持研究, 2020, 27(3): 320-335.
Liu C, Luo J M, Huo Y W, et al. Exploring spatial-temporal variation and coordination of land use benefits and urbanization at county level in Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (3): 320-335.
- [26] 杜宏茹,唐钰婷,张紫芸.新疆干旱区城镇化的地域特征及其高质量发展路径[J].经济地理,2021,41(10): 200-206.
Du H R, Tang Y T, Zhang Z Y. The regional characteristics and high quality development path of urbanization in arid regions of Xinjiang[J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 200-206.
- [27] 陈明星,叶超,陆大道,等.中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构[J].地理学报,2019,74(4):633-647.
Chen M X, Ye C, Lu D D, et al. Cognition and construction of the theoretical connotation for new-type urbanization with Chinese characteristics[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(4): 633-647.
- [28] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 534-546.
- [29] Huang Q Y, Liu Y H. The Coupling between urban expansion and population growth: An analysis of urban agglomerations in China (2005—2020) [J]. Sustainability, 2021, 13(13): 7250.
- [30] 杨洋,梅洁.环渤海地区县域土地-人口城镇化水平时空演化与失调发展特征[J].经济地理,2019,39(7):205-215.
Yang Y, Mei J. The spatiotemporal evolution and imbalanced development characteristics of land population urbanization level in counties around the Bohai Sea region [J]. Economic Geography, 2019, 39(7): 205-215.
- [31] 陈利,朱喜钢.中国城镇化的地域非均衡及其动态演进:来自基尼系数及核密度估计的经验证据[J].统计与信息论坛,2017,32(5):76-84.
Chen L, Zhu X G. Regional disequilibrium and dynamic evolution of China's urbanization: Evidence from the Gini Coefficient and Kernel Density Estimation [J]. Statistics and Information Forum, 2017, 32(5): 76-84.

(上接第420页)

- [21] 孙研,王钊茗.新发展理念下农业产业高质量发展的实证研究[J].西安财经大学学报,2021,34(5):52-61.
Sun Y, Wang C M. Empirical research on high-quality development of agricultural industry under new development concept [J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2021, 34(5): 52-61.
- [22] 王晓君,何亚萍,蒋和平.“十四五”时期的我国粮食安全:形势、问题与对策[J].改革,2020(9):27-39.
Wang X J, He Y P, Jiang H P. China's food security during the 14 th Five-Year Plan Period: Situation, problems and Countermeasures[J]. Reform, 2020(9): 27-39.
- [23] 罗海平,王佳铖,胡学英,等.粮食主产区粮食安全与生态安全脆弱性耦合研究[J].统计与信息论坛,2023,38(7):117-128.
Luo H P, Wang J C, Hu X Y, et al. Coupling of food security and ecological security vulnerability in major grain producing areas [J]. Statistics and Information Forum, 2023, 38(07): 117-128.