

基於主成分因數識別的灌區農業水-能源-糧食複合系統耦合協調性研究

ANALYSIS OF THE COUPLING COORDINATION OF AGRICULTURAL WATER-ENERGY-FOOD COMPOSITE SYSTEMS IN IRRIGATION DISTRICTS BASED ON PRINCIPAL COMPONENT IDENTIFICATION

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
副教授

劉 暢
Chang Liu

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
工程師

劉 兵 兵
Bing-Bing Liu

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
副教授

李 凌 琪*
Ling-Qi Li

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
教授

江 恩 慧
En-Hui Jiang

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
副教授

屈 博
Bo Qu

黃河水利科學研究院
水利部黃河重點實驗室
副教授

郝 林 鋼
Lin-Gang Hao

61

摘 要

隨著人口增長、能源轉型與農業現代化的持續推進，引黃灌區面臨水、能源、糧食等多種資源約束下多目標協調的複雜挑戰，全面且精準地認識引黃灌區水-能源-糧食關聯 (Water-Energy-Food Nexus, WEFN) 系統耦合協調性對於農業可持續發展至關重要。本研究構建了包含 18 個評價指標的 WEFN 系統評價指標體系，然後使用主成分分析法對 WEFN 系統進行降維，識別 WEFN 系統的主成分因數，並以此為評價指標對 WEFN 系統進行綜合評價與耦合協調度測算，最後利用 Mann-Kendall 趨勢檢驗法、Sen's 斜率估計法和冷熱點分析法揭示了各個灌區 WEFN 系統耦合協調度的時空變化趨勢特徵。研究結果表明：水資源、能源、糧食子系統各自內部的大部分評價指標之間都具有顯著的相關性，主成分因數分析能夠有效降低評價指標的資料資訊冗餘。黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度在研究期間總體呈現穩定上升趨勢，增速表現為先快後慢。2020 年黃河下游有 21 個灌區處於良好協調等級，黃河入海口處的引黃灌區耦合協調度增速顯著高於其他區域，山東省和河南省交界處的引黃灌區耦合協調度增速顯著低於其他區域。研究結果能夠說明灌區決策者科學認識 WEFN 系統的發展狀態，有利於為資源科學化管理和農業可持續發展制定針對性改善措施。

關鍵詞：水-能源-糧食、主成分因數、耦合協調度、時空趨勢特徵、引黃灌區。

* 黃河水利科學研究院水利部黃河重點實驗室副教授

450099 中國河南省鄭州市金水區二七商圈順河路，lqli@whu.edu.cn

ANALYSIS OF THE COUPLING COORDINATION OF AGRICULTURAL WATER-ENERGY-FOOD
COMPOSITE SYSTEMS IN IRRIGATION DISTRICTS BASED ON PRINCIPAL COMPONENT
IDENTIFICATION

Chang Liu

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

Bing-Bing Liu

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

Ling-Qi Li*

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

En-Hui Jiang*

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

Bo Qu

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

Lin-Gang Hao

Yellow River Institute of
Hydraulic Research,
Key Laboratory of Yellow River,
MWR

ABSTRACT

With ongoing population growth, energy transition, and agricultural modernization, irrigation districts diverting water from the Yellow River are facing increasingly complex challenges in achieving multi-objective coordination under constraints of water, energy, and food resources. To comprehensively and accurately assess the coupling and coordination of the Water-Energy-Food Nexus (WEFN) system in these regions, this study developed an evaluation index system comprising 18 indicators. Principal Component Analysis (PCA) was employed to reduce dimensionality and extract the principal factors of the WEFN system, which were then used as evaluation metrics for comprehensive assessment and coupling coordination degree calculation. Subsequently, the Mann-Kendall trend test, Sen’s slope estimator, and hot spot analysis were applied to explore the spatiotemporal dynamics of the WEFN system’s coupling coordination degree across the irrigation districts. The results revealed significant internal correlations among most indicators within the water, energy, and food subsystems. Overall, the coupling coordination degree of the WEFN system exhibited a steady upward trend over the study period, with a rapid increase in the early years followed by a slower growth rate. By 2020, 21 irrigation districts in the lower reaches of the Yellow River had reached a well-coordinated development level, while 19 remained in a moderately coordinated state. Notably, the irrigation districts near the Yellow River estuary demonstrated a significantly faster increase in coupling coordination degree compared to other regions, whereas districts located at the border between Shandong and Henan provinces exhibited notably slower

improvement. These findings offer important insights into the current status of WEFN system development in the Yellow River irrigation districts and provide scientific support for targeted measures aimed at improving resource governance and promoting sustainable regional development.

Keywords: Water-Energy-Food, Principal component factor, Spatio-temporal trend characteristics, Coupling coordination degree, the Yellow River irrigation districts.

Liu, C., Liu, B.B., Li, L.Q. *, Jiang, E.H., Qu, B., & Hao L.G. (2026). "Analysis of the Coupling Coordination of Agricultural Water-Energy-Food Composite Systems in Irrigation Districts Based on Principal Component Identification." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(3), 61-78.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202609_72\(3\).0005](https://doi.org/10.29974/JTAE.202609_72(3).0005)

一、引言

水、能源、糧食資源安全是當前全球面臨的重大戰略性挑戰之一^[1]。氣候變化、人口持續增長以及資源利用方式的深刻轉變，正不斷加劇對水資源、能源和糧食系統的綜合壓力^[2]。自 20 世紀 60 年代以來，全球用水量增長了約 4 倍，糧食需求增長約 2.5 倍，顯示出資源消耗與人類發展需求之間的矛盾不斷上升。根據預測，到 2030 年，全球對水資源的需求將比當前增加約 40%，能源需求將增長 50%，而糧食需求也將上升 35%^[3]。為應對這一多重挑戰，聯合國於 2015 年提出了 17 項可持續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs)，其中“零饑餓”(目標 2)、“清潔飲水與衛生設施”(目標 6) 和“可負擔的清潔能源”(目標 7) 三項目標直接關聯於水-能源-糧食系統的協調發展，體現出其在全球可持續發展議程中的核心地位。黃河流域水資源占全國總量僅約 2%，卻承載了全國 12.4% 人口的生活用水需求、12.3% 的糧食生產任務以及約 25% 的煤炭資源開發活動。這種資源供需高度不匹配的格局，使得該區域的引黃灌區在國家水資源配置和生態安全保障中具有極為重要的戰略地位^[4]。隨著人口增長、能源轉型與農業現代化的持續推進，引黃灌區面臨多種資源約束下多目標協調的複雜挑戰^[5,6]。在此背景下水-能源-糧食關聯性 (Water-Energy-Food Nexus, WEFN) 系統作為一種系統科學視角，為理解並應對實現水資源合理配置、能源結構優化與糧食安全保障的多目標統籌提供了理論基礎和實踐路徑。

2011 年在德國波恩會議上，Hoff 首次提出了 WEFN 概念。WEFN 旨在於水資源、能源、糧食的相互聯繫日益密切的背景下，鼓勵管理者在進行決策前預測評估多個部門的平衡與協同效應，用於制定同時滿足多個部門要求的可行性方案，實現有限資源的可持續地利用和管理^[7]。2014 年，聯合國糧農組織 (FAO) 指出，從水資源-能源-糧食關聯性看農業可持續發展問題，有助於我們理解水資源、能源和糧食更廣泛的含義；由於政策制定、大規模投資或農業活動的變化可能會產生超出預期目標和尺度的影響，FAO 以利益相關者對話為核心，確定了資料搜集、情景類比、調控對策三方面的研究內容，用於以確認、評估和管理水、能源、糧食相互關係^[8]。近年來，水-能源-糧食關聯性 (WEFN) 已成為農業科學、水資源管理、能源科學等多個領域交叉融合的研究熱點。王銳^[9]、張禮兵^[10]、郝儀佳^[11]等人基於耦合協調度模型對 WEFN 耦合

協調性進行了綜合評價。賀正齊^[12]、宋潔^[13]、田貴良^[14]等人對 WEFN 的系統安全性與韌性進行了測度與評估。Sun and Hao 結合 Logistic 模型與加速遺傳演算法 (AGA) 模型，構建了協同演化模型 (SEM)，以識別並測度 WEFN 系統的穩態特徵^[15]。Qin 基於投影尋蹤模型與虛擬水貿易理論，評估了 WEFN 系統所承受的綜合壓力並揭示了壓力的傳導機制，提出了一種以促進 WEFN 系統的可持續發展的協調機制^[16]。

在所有經濟部門中，農業生產以自然資源利用強度大和環境足跡顯著為特徵。在黃河流域中，黃河下游引黃灌區的農業生產活動和水資源開發強度又最為劇烈。在自然資源日益稀缺和環境問題日益突出的背景下，用水大戶引黃灌區的 WEFN 系統評估更加需要關注^[17]。當前大多數的 WEFN 研究均是以系統不同特性 (安全性、韌性、可持續性) 為導向，構建複雜且全面的評價指標體系，用以對 WEFN 系統的運行狀態進行科學評價。然而，在構建評價指標體系過程中，WEFN 系統涉及的數目繁多的變數之間可能存在高度相關性 (例如灌溉用水量與機井耗電可能高度相關)，從而導致後續建模時出現多重共線性的問題，影響評價結果的失真。因此，為全面且精準地認識引黃灌區 WEFN 系統的耦合協調性，本研究使用主成分分析法對 WEFN 系統進行降維，識別 WEFN 系統的主成分因數，並以此為評價指標對 WEFN 系統進行綜合評價與耦合協調度測算。最後利用 Mann-Kendall 趨勢檢驗法、Sen's 斜率估計法和冷熱點分析法揭示了各個灌區 WEFN 系統耦合協調度的時空變化趨勢特徵。研究結果可以幫助黃河下游引黃灌區決策者科學認識 WEFN 系統發展狀態，有利於為資源科學化管理和可持續發展制定針對性的改善措施。

二、研究區域

黃河下游引黃灌區橫跨黃河、淮河及海河三大流域，西起沁河入黃口，東至黃河入海口，包括南北兩側直接引用黃河水灌溉的有關地區，涉及河南、山東兩省 18 個地 (市) 的 88 個縣級區劃單位。總土地面積 8.16 萬 km²，其中黃河流域面積 1.38 萬 km²，淮、海河流域面積為 6.78 萬 km²。黃河下游 40 個大型引黃灌區地理位置如圖 1 所示。研究區的氣候類型為暖溫帶半濕潤季風氣候，氣候較溫和而且有明顯的過渡性，春秋季較短且夏冬季較長，四季分明，多年平均氣溫在 12.7 °C ~ 14.6 °C 之間。

河南省引黃灌區設計灌溉面積 2,518.85 萬畝，總

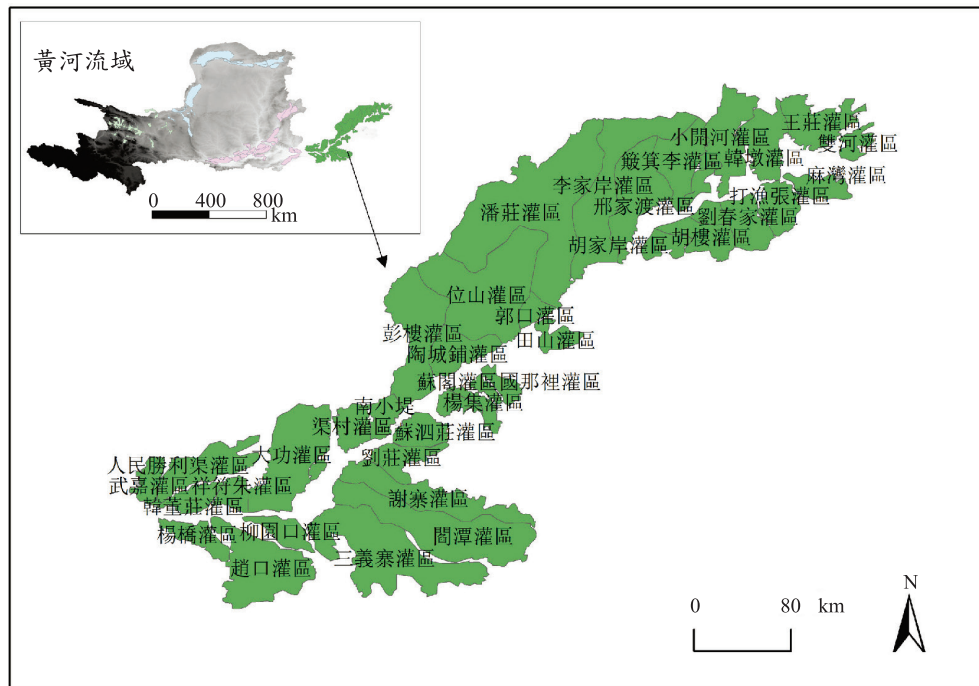


圖 1 黃河下游引黃灌區地理位置

有效灌溉面積 1,982.71 萬畝，其中農田有效灌溉面積 1,909.13 萬畝，林牧灌溉面積 73.58 萬畝。河南省黃河下游引黃灌區分佈中，大型引黃灌區有 17 處，設計灌溉面積 1,503.26 萬畝，有效灌溉面積 1,159.43 萬畝；中型灌區 84 處，設計灌溉面積 481.9 萬畝，有效灌溉面積 289.66 萬畝；小型灌區有效灌溉面積 533.62 萬畝。大型灌區灌溉面積大約佔據總灌溉面積 60% 左右，其中面積最大的是趙口灌區，其耕地面積為 196.4 萬畝。山東省引黃灌區總有效灌溉面積 3,070.37 萬畝，其中農田有效灌溉面積 2,816.27 萬畝，林牧灌溉面積 254.1 萬畝。種植作物以小麥、玉米、水稻、蔬菜、棉花和果品為主，糧經種植比例為 7:3。山東省共建成大型引黃灌區 31 處，設計灌溉面積 2,563.4 萬畝，有效灌溉面積 2,439.3 萬畝；中型灌區有 53 處設計灌溉面積 357.5 萬畝，有效灌溉面積 270.4 萬畝。山東的引黃灌區中，彭樓灌區、位山灌區、潘莊灌區、李家岸灌區、閭潭灌區屬於比較大的灌區，灌溉面積均在 100 萬畝以上。位山灌區面積最大，約為 508 萬畝。另外，邢家渡灌區和簸箕李灌區灌溉面積也在 90 萬畝以上，接近 100 萬畝。

黃河下游引黃灌區年均取水量 130.3 億 m^3 ，其中引黃水 78.4 億 m^3 、當地地表水 8.5 億 m^3 、地下水 43.4 億 m^3 。引黃水、當地地表水、地下水占總用水量的比例分別為 60.2%、6.5% 和 33.3%。從水源類型來看，河南省利用地下水的比例高，引黃水、當地地表水、地下水的比例為 43%、5%、52%；山東省引用黃河水

的比例比較高，引黃水、當地地表水、地下水的比例為 69%、7%、24%。從地下水的開採強度來分析，距離黃河遠近不同，地下水開採強度就不同。因為距離黃河越近，引水越方便，水價就越低，地下水條件好，因此地下水的開採程度也就越低距離黃河越遠，引黃越不方便，引水水價也就越高，地下水條件也越差，從而地下水的開採程度也就越高。因此，河南灌區開採量占可開採量的 79.1%，山東為 42%，河南大於山東。

三、研究方法與數據資料來源

2.1 WEFN 系統指標體系構建

由於農業 WEFN 系統的研究時間較短，還處在開拓和繼續研究階段，指標體系還未達到統一構，本文基於灌區高強度地水資源利用、能源利用和農業生產特徵，構建了包含 18 個評價指標的農業 WEFN 系統綜合評價指標體系，如表 1 所示。

對於水資源子系統，本文主要選取了與水資源投入關係密切的六個指標，包括單位面積灌溉水利用量 ($IWPA$)、有效降雨量 (PRE)、節水灌溉面積比例 (WSP)、地下水利用比例 (GWP)、農業用水比例 (AWP)、水資源開發利用率 (WUP)。其中，單位面積灌溉水利用量是指每年單位面積耕地所消耗的灌溉水

表 1 WEFN 系統的綜合評價指標體系

目標層	子系統	指標層	指標屬性	編號	簡稱
水-能-糧複合系統	水資源子系統	單位面積灌溉水利用量	負向	1	<i>IWPA</i>
		有效降雨量	正向	2	<i>PRE</i>
		節水灌溉面積比例	正向	3	<i>WSP</i>
		地下水利用比例	負向	4	<i>GWP</i>
		農業用水比例	負向	5	<i>AWP</i>
		水資源開發利用率	負向	6	<i>WUP</i>
	能源子系統	單位面積電力使用量	負向	7	<i>EPA</i>
		單位面積柴油使用量	負向	8	<i>DPA</i>
		單位面積化肥使用量	負向	9	<i>FPA</i>
		單位面積農藥使用量	負向	10	<i>PPA</i>
		單位面積農膜使用量	負向	11	<i>AFPA</i>
	糧食子系統	單位面積糧食產量	正向	12	<i>GYPA</i>
		單位面積農業產值	正向	13	<i>AOPA</i>
		糧食種植面積比例	正向	14	<i>GSP</i>
		復種指數	正向	15	<i>MCI</i>
		人均糧食產量	正向	16	<i>GYPC</i>
		有效灌溉面積比例	正向	17	<i>EIAP</i>
		單位面積機械總動力	正向	18	<i>MPPA</i>

量，可以反映出農業對灌溉用水的需求強度。有效降雨量是指能夠被植物吸收利用、補充土壤水分或對農業生產、生態環境有實際作用的降水量，有效降雨量對合理規劃農作物生產和確定耕作方法至關重要。節水灌溉面積比例是指採用節水灌溉技術和設備的灌溉面積占總灌溉面積的比例，反映了灌區的節水能力。地下水供水比例是指地下水在總供水量中的占比，反映了灌區對地下水的依賴程度。農業用水比例是指農業用水量占總用水量的比重，用於灌區農業用水對於總用水量的佔用程度。水資源開發利用率指某地區或流域實際被開發利用的水資源量占可利用水資源總量的比例，反映了水資源的開發強度和可持續利用狀況。

對於能源子系統，本文針對灌區農業能源使用情況，選取單位面積電力使用量 (*EPA*)、單位面積柴油使用量 (*DPA*)、單位面積化肥使用量 (*FPA*)、單位面積農藥使用量 (*PPA*)、單位面積農膜使用量 (*AFPA*)。其中，單位面積電力使用量指農業生產過程中，每年單位耕地面積所消耗的電能，農業用電量主要集中在機井灌溉、電力泵站、水資源調配等方面。單位面積農用柴油使用量是指每年單位耕地面積所消耗的柴油量，反映農業生產對化石燃料的依賴程度和能源利用

效率。單位面積化肥使用量指每年單位耕地面積上投入的化肥總量，化肥的生產是一個高能耗過程，特別是氮肥（如尿素、硝酸銨等）的合成需要大量的化石燃料（主要是天然氣），全球氮肥生產消耗能源約占農業總能源消耗的 40%~50%。單位面積農藥使用量指每年單位耕地面積上使用的農藥總量，農藥的生產過程需要經過化學合成、混合、濃縮、包裝等多個環節，每一環節都涉及能源的消耗。農藥的合成反應往往在高溫和高壓下進行，消耗能源較大。單位面積農膜使用量指每年單位耕地面積上使用的農膜總量，農膜的間接能源主要體現在其原材料（如聚乙烯 PE、聚氯乙烯 PVC）的製造過程中消耗的能源。

在糧食子系統方面，根據灌區糧食生產情況，本文選取了七個與糧食生產密切相關的指標，包括單位面積糧食產量 (*GYPA*)、單位面積農業產值 (*AOPA*)、糧食種植面積比例 (*GSP*)、復種指數 (*MCI*)、人均糧食產量 (*GYPC*)、有效灌溉面積比例 (*EIAP*)、單位面積機械總動力 (*MPPA*)。單位面積糧食產量指每年單位面積耕地上生產的糧食總量，單位面積糧食產量是衡量農業生產效率的核心指標，能夠反映土地資源的使用情況和農業技術水準。單位面積農業產值是指每

年單位面積耕地上所產生的農業生產總值，通常用來衡量農業生產效率與土地利用的經濟效益。糧食種植面積比例是指區域內糧食作物（如小麥、水稻、玉米等）所占耕地總面積的比例，合理的糧食種植面積比例有助於保障糧食安全。復種指數表示的是單位耕地面積上實際播種的農作物總面積。復種指數越高，意味著同一塊土地每年種植的作物次數越多，土地利用效率越高。人均糧食產量是指某一地區一年的人均糧食生產量，通常用每人每年生產的糧食量來衡量，是衡量糧食自給能力的重要指標。有效灌溉面積比例是衡量灌區水利化程度和農業生產穩定性的關鍵指標。單位面積機械總動力是指每年單位面積內所使用的所有機械設備的動力總和，通常用來衡量農業生產中機械化水準的高低。

所有的評價指標被分為正向屬性和逆向屬性，正向指標值表示該指標值越大越好，逆向指標表示該指標值越小越好。

2.2 皮爾遜相關分析

為量化分析各個子系統內部評價指標的相關性，本研究採用皮爾遜相關分析法。皮爾遜相關分析是用於量化兩個連續變數之間線性相關程度的統計方法。皮爾遜相關係數通過計算兩個變數的協方差與標準差的比值來評估線性關聯程度，計算公式為：

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中， r 表示變數 X 、 Y 的皮爾遜相關係數值，其 r 介於 -1 至 1 之間，1 表示完全正相關，-1 表示完全負相關，0 表示無線性關係； X_i ， Y_i 表示變數 X 、 Y 的第 i 個樣本值； $\bar{X}$ ， $\bar{Y}$ 表示變數 X 、 Y 的均值。

2.3 主成分分析法

農業水-能源-糧食複合系統包含的指標數目繁多，評價指標之間難免存在相關性，從而導致指標資料的冗餘問題。主成分分析就是把原有的多個指標轉化為少數幾個代表性較好的綜合指標，這少數幾個指標能夠反映原來指標大部分的資訊（80%以上），並且各個指標之間保持獨立，避免出現重迭資訊。主成分分析主要起著降維和簡化資料結構的作用^[18,19]。因此，本研究利用主成分分析法識別農業水-能源-糧食複合系統的主成分。

假設有 n 個樣本， m 個指標，可構成大小為 n 乘 m 的樣本矩陣 X ：

$$X^0 = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

本研究將 2000 ~ 2020 年黃河下游 40 個大型灌區作為研究對象，因此每一個指標均有 840 個樣本數據。

(1) 首先對其標準化處理：

按列計算均值 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 和標準差

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad \text{，計算得標準化資料}$$

$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j}$ ，原始樣本矩陣經過標準化變為：

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 計算標準化樣本的協方差矩陣

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_i)(X_{kj} - \bar{X}_j)$

(3) 計算 R 的特徵值和特徵向量

特徵值：

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0 \quad (5)$$

R 是半正定矩陣，且 $\text{tr}(R) = \sum_{k=1}^m \lambda_k = m$ 。

特徵向量：

$$a_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{bmatrix}, \dots, a_m = \begin{bmatrix} a_{1m} \\ a_{2m} \\ \vdots \\ a_{mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(4) 計算主成分貢獻率 SC_i 、累積貢獻率 AC_i ：

$$SC_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} (i=1,2,\dots,m) \dots\dots\dots(7)$$

$$AC_i = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} (i=1,2,\dots,m) \dots\dots\dots(8)$$

貢獻率 SC_i 主要指提取的主成分特徵值在矩陣特徵值之和中所占比重。貢獻率越大，說明該主成分對原始資料集資訊要素概括能力越強，攜帶的資訊也越多，其地位越重要。累計貢獻率 AC_i 不同於貢獻率，其值為前 k 個主成分特徵值之和占全部特徵值之和的比重，其值越大，則表示前 k 個主成分對原始資料集資訊要素的概括和代表能力越強。

- (5) 第 i 個主成分 F_i 即為：

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{mi}X_m \dots\dots\dots(9)$$

$a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}$ 即為第 i 個主成分在各個評價指標上的荷載。一般取累計貢獻率超過 80% 的特徵值所對應的第一、第二、...、第 m 個主成分。

- (6) 敏感度分析

本研究採用加雜訊方法對 PCA 結果進行敏感性分析。把雜訊強度設置為 1%、5%、10% 三個雜訊強度級別，即對原始資料增加 1%、5%、10% 的隨機雜訊，然後逐個對比原始 PCA 結果與不同雜訊強度下 PCA 結果主成分向量余弦相似度和累積貢獻率的相似度，從而得到 PCA 結果的敏感性

用余弦相似度比較原始資料和加雜訊後主成分方向的一致性的方法：

$$\cos(u, v) = \frac{u \cdot v}{\|u\| \|v\|} \dots\dots\dots(10)$$

上式中， u 表示 PCA 某一個主成分， v 表示加雜訊後 PCA 某一個主成分。若余弦相似度越接近 1，說明主成分方向變化越小。

累積貢獻率的相似度由原始 PCA 結果圖與不同雜訊強度下 PCA 結果圖直接對比。

2.4 耦合協調度模型

系統耦合是指兩個及兩個以上的系統相互作用而相互影響的現象^[20]。為探究水-能源-糧食系統之間的

耦合協調性關係，本文結合主成分分析方法，建立耦合協調度模型如下：

- (1) 計算綜合評價指數。基於主成分分析結果，將各主成分對應方差貢獻率占累積貢獻率之比作為權重計算得到各個灌區綜合評價指數。

$$I(w) = \frac{SC(w)_1}{AC(w)_m} F(w)_1 + \frac{SC(w)_2}{AC(w)_m} F(w)_2 \dots\dots\dots(11)$$

$$+ \dots + \frac{SC(w)_m}{AC(w)_m} F(w)_m$$

$$I(e) = \frac{SC(e)_1}{AC(e)_m} F(e)_1 + \frac{SC(e)_2}{AC(e)_m} F(e)_2 \dots\dots\dots(12)$$

$$+ \dots + \frac{SC(e)_m}{AC(e)_m} F(e)_m$$

$$I(f) = \frac{SC(f)_1}{AC(f)_m} F(f)_1 + \frac{SC(f)_2}{AC(f)_m} F(f)_2 \dots\dots\dots(13)$$

$$+ \dots + \frac{SC(f)_m}{AC(f)_m} F(f)_m$$

上式中， $I(w)$ 、 $I(e)$ 、 $I(f)$ 分別指不同年份各個灌區的水資源子系統、能源子系統、糧食子系統綜合評價指數； $F(w)$ 、 $F(e)$ 、 $F(f)$ 分別指不同年份各個灌區的水資源子系統、能源子系統、糧食子系統的主成分因數； $SC(w)$ 、 $SC(e)$ 、 $SC(f)$ 分別指在主成分分析中求得的水資源子系統、能源子系統、糧食子系統主成分因數的貢獻率； $AC(w)$ 、 $AC(e)$ 、 $AC(f)$ 分別指在主成分分析中求得的水資源子系統、能源子系統、糧食子系統主成分因數的累積貢獻率。

- (2) 計算耦合度。耦合度是指各個系統之間的相互作用和相互影響的程度，計算公式如下：

$$C = \frac{3\sqrt{I(w) \cdot I(e) \cdot I(f)}}{I(w) + I(e) + I(f)} \dots\dots\dots(14)$$

上式中， C 為耦合度， $0 \leq C \leq 1$ ，其數值越大，表明各個子系統之間的關聯程度越高，相互作用性越強

- (3) 計算耦合協調度。耦合協調度反應各個子系統之間的耦合協調程度，體現協調狀況的好壞，計算公式如下：

$$T = \alpha I(w) + \beta I(e) + \gamma I(f) \dots\dots\dots(15)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \dots\dots\dots(16)$$

上式中， D 為耦合協調度， T 為 3 個子系統的綜

表 2 耦合協調度等級劃分標準

耦合協調度	等級標準
[0,0.1)	極度失調衰退
[0.1,0.2)	嚴重失調衰退
[0.2,0.3)	中度失調衰退
[0.3,0.4)	輕度失調衰退
[0.4,0.5)	瀕臨失調衰退
[0.5,0.6)	勉強協調發展
[0.6,0.7)	初級協調發展
[0.7,0.8)	中級協調發展
[0.8,0.9)	良好協調發展
[0.9,1.0]	優質協調發展

合評價指數， α 、 β 、 γ 分別為水資源系統、能源子系統、糧食子系統的權重，本文認為，3 個子系統對灌區發展的影響程度同等重要，因此設定 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。本文參考已有的研究^[21]，具體耦合協調度的等級劃分標準見表 2。

2.5 時空變化趨勢分析方法

本研究利用 Mann-Kendall 趨勢檢驗法對各個灌區 WEFN 系統耦合協調度的時間變化趨勢進行分析^[22]。Mann-Kendall 趨勢檢驗法是非參數檢驗方法，不需要檢驗序列服從某一概率分佈，用來檢驗時間序列變化趨勢的顯著性^[23]。該方法具有適用性廣，量化程度高的特點，現已廣泛應用於氣象資料的趨勢檢驗研究。Mann-Kendall 趨勢檢驗法的基本原理為：對於平穩獨立的時間序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，MK 檢驗是檢驗是否拒絕零假設 (H_0 : 序列沒有單調趨勢)，接受替代假設 (H_a : 序列有單調趨勢)。在零假設下，定義檢驗統計變數 K ：

$$K = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(18)$$

當 $n \geq 10$ 時，檢驗統計變數 K 近似服從正態分佈，將 K 標準化後得到檢驗統計變數 Z ：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$\text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] / 18 \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中 q 為時間序列中結組 (相同的資料值組成的資料組) 的數量， t_p 為第 p 結組的資料值數量。

採用雙側檢驗對檢驗統計變數 Z 進行顯著性檢驗，在一定顯著水準下，當 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 時，拒絕零假設，即序列有單調趨勢。 Z 值為正 (負) 說明序列呈上升 (下降) 的趨勢。本研究選取顯著水準 $\alpha = 0.05$ ，通過標準正態分佈表可知 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。

本研究利用 Sen's 斜率估計法對各個灌區 WEFN 系統耦合協調度的整體時間變化速率 S 進行估計，然後利用 ArcGIS 軟體的冷熱點分析工具對 S 進行冷熱點空間分析。Sen's 斜率估計是一種非參數趨勢估算方法^[22]。該方法利用各時刻點間變化率的中值作為整體的變化率估計值，並以該變化率作為時間序列變化趨勢的大小^[24]。假設時間序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，各時刻點間變化率 S_{ij} 可表示為：

$$S_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (\forall j > i) \quad \dots\dots\dots(21)$$

將 S_{ij} 從小到大排列，整體時間變化速率 S 由下式計算：

$$S = \begin{cases} (S_{n/2} + S_{(n+2)/2}) / 2 & n \text{ 為偶數} \\ S_{(n+1)/2} / 2 & n \text{ 為奇數} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(22)$$

2.6 數據資料來源

灌溉水量、節水面積、農業用水比例、有效灌溉面積、水資源開發利用率等資料來源於研究區河南省和山東省的 17 個地市年度水資源公報。糧食種植面積、糧食產量、人均糧食產量、糧食產值、復種指數、機械總動力、電力使用量、柴油使用量、化肥使用量、農藥使用量、農膜使用量等資料來源於研究區各地市水利統計年鑒。灌區資料根據所在地市平均值或按照占所在地市面積比例計算求得。降雨量資料來源於國家氣象科學資料共用服務中心提供的中國地面氣候資料日值資料集 (V3.0)。本研究選取該資料集中黃河下游引黃灌區內部及周邊 30 個氣象網站 (不包括研究區附近的高山氣象臺泰山站)，利用 Matlab2023a 統計處理為年值資料，利用 ArcGIS10.2 軟體的克裡金 (Kriging) 插值和空間統計工具將氣象網站的資料轉化為各灌區的資料。灌區範圍資料由黃河水利委員會提供。

三、研究結果

3.1 各子系統評價指標的相關性

利用皮爾遜相關分析法對各個子系統內部評價指標的相關性進行量化分析，結果如圖 2 所示。

圖 2(a) 展示了水資源子系統 6 個評價指標之間的相關性大小。在 0.05 顯著性水準下，6 個評價指標 15 組相關分析中，僅 *PRE* 和 *WSP*、*AWP* 和 *GWP* 兩組不存在顯著的相關性，其他 13 組均有顯著的相關性。其中，*IWPA* 和 *GWP* 之間存在較大的正相關關係，相關係數為 0.52，即畝均農業用水量越高，地下水利用比例也越高；*PRE* 和 *WUP* 之間存在較大的負相關關係，相關係數為-0.52，即有效降雨量越高，水資源開發利用率越小。*WSP* 和 *AWP* 之間存在較大的負相關關係，相關係數為-0.45，即農業節水面積比例越高，農業用水比例就越低。

圖 2(b) 展示了能源子系統 5 個評價指標之間的相關性大小。在 0.05 顯著性水準下，5 個評價指標 10 組相關分析中，僅 *EPA* 和 *PPA* 這 1 組不存在顯著的相關性，其他 9 組均有顯著的相關性。其中，*DPA* 與 *FPA*、*PPA*、*AFPA* 之間均存在較高的正相關關係，相關係數分別為 0.79、0.55、0.44，*DPA*、*FPA*、*PPA*、

AFPA 等指標均與石油能源有關，該結果表明石油能源相關的評價指標之間存在密切的相關性。

圖 2(c) 展示了糧食子系統 7 個評價指標之間的相關性大小。在 0.05 顯著性水準下，7 個評價指標 21 組相關分析中，僅 *MCI* 和 *GYP*、*MCI* 和 *AOPA*、*ELAP* 和 *AOPA*、*ELAP* 和 *GSP*、*ELAP* 和 *MCI*、*MPPA* 和 *MCI* 六組不存在顯著的相關性，其他 14 組均與顯著的相關性。其中，*GYP* 與 *AOPA*、*GYP*、*MPPA* 具有較高正相關性，相關係數分別為 0.73、0.74、0.80；*AOPA* 與 *GYP*、*MPPA* 具有較高正相關性，相關係數分別為 0.96、0.89；*GYP* 與 *MPPA* 具有較高正相關性，相關係數分別為 0.92。

綜上所述，水資源、能源、糧食子系統各自內部的大部分評價指標之間都具有顯著的相關性，指標資料資訊的冗餘問題較為嚴重。因此，在 WEFN 系統的研究中，有必要對建立的指標體系進行主成分分析。

3.2 WEFN 系統的主成分因數識別

3.2.1 主成分因數識別結果

本研究將 2000~2020 年黃河下游 40 個大型灌區的 18 個評價指標作為初始樣本，用主成分分析法分別對水資源子系統、能源子系統和糧食子系統進行主成分識別，結果如表 3~ 表 5 所示。

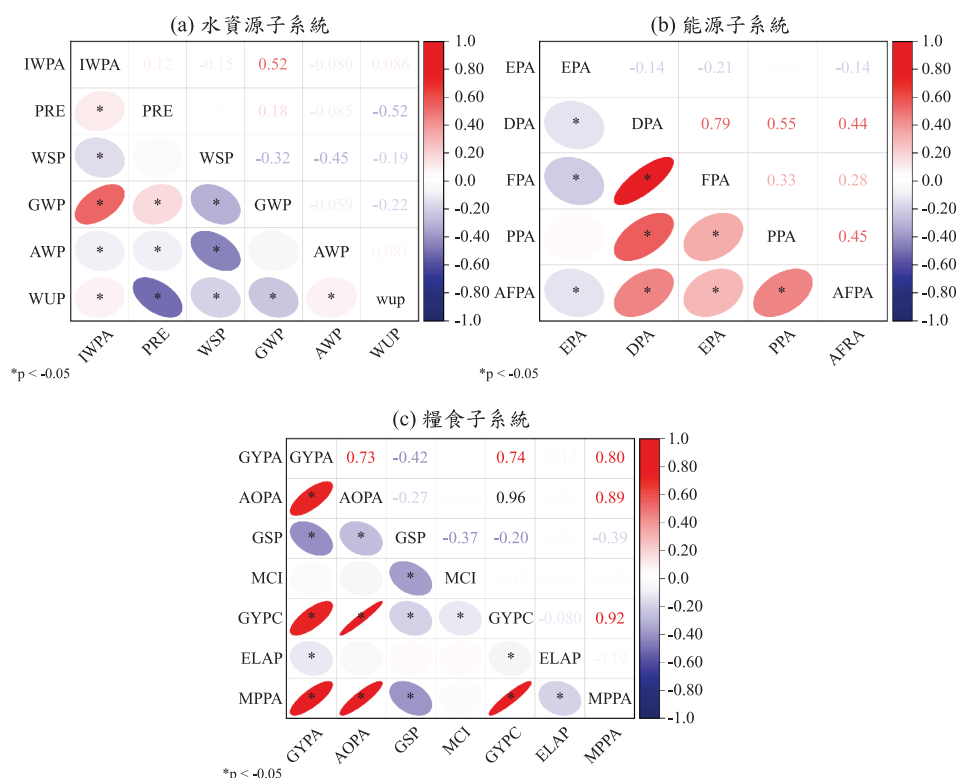


圖 2 黃河下游引黃灌區 WEFN 各子系統相關性分析結果

表 3 水資源子系統主成分分析結果

特徵向量	$F(w)_1$	$F(w)_2$	$F(w)_3$	$F(w)_4$	$F(w)_5$	$F(w)_6$
<i>IWPA</i>	0.544	-0.123	-0.264	-0.402	0.291	-0.611
<i>PRE</i>	-0.180	-0.650	-0.239	0.402	0.565	0.078
<i>WSP</i>	-0.490	0.089	-0.261	-0.716	0.308	0.276
<i>GWP</i>	0.305	-0.380	0.725	-0.328	0.156	0.325
<i>AWP</i>	0.512	-0.125	-0.524	-0.046	-0.255	0.617
<i>WUP</i>	0.276	0.628	0.072	0.232	0.642	0.242
特徵值	2.527	1.577	0.868	0.542	0.352	0.133
貢獻率	42.1%	26.3%	14.5%	9.0%	5.9%	2.2%
累積貢獻率	42.1%	68.4%	82.9%	91.9%	97.8%	100.0%

表 4 能源子系統主成分分析結果

特徵向量	$F(e)_1$	$F(e)_2$	$F(e)_3$	$F(e)_4$	$F(e)_5$
<i>EPA</i>	-0.151	0.873	-0.336	0.318	-0.034
<i>DPA</i>	0.580	-0.001	-0.297	0.046	0.757
<i>FPA</i>	0.510	-0.215	-0.526	0.212	-0.610
<i>PPA</i>	0.451	0.419	0.223	-0.725	-0.213
<i>AFPA</i>	0.420	0.126	0.688	0.572	-0.087
特徵值	2.483	1.052	0.804	0.498	0.163
貢獻率	49.7%	21.0%	16.1%	10.0%	3.3%
累積貢獻率	49.7%	70.7%	86.8%	96.7%	100.0%

表 5 糧食子系統主成分分析結果

特徵向量	$F(f)_1$	$F(f)_2$	$F(f)_3$	$F(f)_4$	$F(f)_5$	$F(f)_6$	$F(f)_7$
<i>GYPA</i>	0.456	-0.036	-0.008	0.197	-0.856	-0.128	0.041
<i>AOPA</i>	0.488	0.116	0.144	-0.181	0.284	-0.629	-0.467
<i>GSP</i>	-0.230	0.618	0.077	-0.668	-0.317	0.065	-0.086
<i>MCI</i>	0.005	-0.749	0.024	-0.651	-0.108	-0.030	0.055
<i>GYPC</i>	0.504	0.012	-0.039	-0.098	0.114	0.754	-0.392
<i>EIAP</i>	-0.080	-0.067	0.980	0.113	-0.041	0.115	-0.021
<i>MPPA</i>	0.490	0.195	0.100	-0.191	0.243	0.021	0.785
特徵值	3.695	1.347	1.001	0.569	0.280	0.085	0.023
貢獻率	52.8%	19.2%	14.3%	8.1%	4.0%	1.2%	0.3%
累積貢獻率	52.8%	72.0%	86.3%	94.5%	98.5%	99.7%	100.0%

累計貢獻率超過 80%的特徵值所對應的 $F(w)_1$ 、 $F(w)_2$ 、 $F(w)_3$ 即為水資源子系統的 3 個主成分因數。在水資源系統的第一主成分因數中，在 *IWPA* (單位面積灌溉水利用量) 和 *AWP* (農業用水比例) 上有較大的正荷載，分別達到 0.544 和 0.512，在 *WSP* (節水灌溉面積比例) 上有較大的負荷載，達到 -0.490，因此第一主成分可視為用水強度因數。在第二主成分因數中，在 *PRE* (有效降雨量) 上有較大的負荷載，達到 -0.650，

在 *WUP* (水資源開發利用率) 上有較大的正荷載，達到 0.628。兩個指標均與區域的水資源稟賦相關。氣候越乾旱的區域往往 *PRE* 越小，*WUP* 越高，因此第二主成分可視為氣候因數。在第三主成分因數在 *GWP* (地下水利用比例) 上有較大的正荷載，達到 0.725，因此第三主成分可視為地下水壓力因數。綜上所述，水資源系統評價指標的 3 個主成分因數分別為用水強度因數、氣候因數、地下水壓力因數。

累計貢獻率超過 80%的特徵值所對應的 $F(e)_1$ 、 $F(e)_2$ 、 $F(e)_3$ 即為能源子系統的 3 個主成分因數。能源子系統的第一主成分因數 $F(e)_1$ 在 DPA (單位面積柴油使用量)、 FPA (單位面積柴油使用量)、 PPA (單位面積農藥使用量)、 $AFPA$ (單位面積柴油使用量) 上均有較大的荷載，因此能源子系統的第一主成分因數可視為化石能源使用強度因數。能源子系統的第二主成分因數 $F(e)_2$ 在 EPA (單位面積電力使用量) 的具有最大荷載，達到 0.873，遠高於其他指標，。因此能源子系統的第二主成分因數可視為電力能源使用強度因數。能源子系統的第三主成分因數 $F(e)_3$ 在 $AFPA$ 上有較大的正荷載，為 0.688；在 FPA 上有較大的負荷載，為-0.526。農膜主要用於蔬菜、水果等非糧食作物的種植，化肥則主要用於糧食作物的種植，因此第 3 個主成分因數可視為非糧食作物能源消耗強度因數。因此，綜上所述，能源子系統的 3 個主成分因數分別為化石能源使用強度因數、電力能源使用強度因數和非糧食作物能源消耗強度因數。

累計貢獻率超過 80%的特徵值所對應的 $F(f)_1$ 、 $F(f)_2$ 、 $F(f)_3$ 即為糧食子系統的 3 個主成分因數。第一主成分因數在 GYP (單位面積糧食產量)、 $AOPA$ (單位面積農業產值)、 GYP (人均糧食產量)、 $MPPA$ (單位面積機械總動力) 上具有較大的正荷載，第一主

成分因數可視為糧食產出能力因數。第二主成分因數在 MCI (復種指數) 上有較大的負荷載，為-0.749，在 GSP (糧食種植面積比例) 上有較大的正荷載，為 0.618，第二主成分因數可視為糧食生產潛力因數。在第三主成分因數在 $EIAP$ (單位面積灌溉用水量) 上具有最大的正荷載，達到 0.980，遠高於其他指標。因此糧食子系統的第 3 個主成分因數可視為糧食生產用水保障因數。糧食子系統的 3 個主成分因數分別為糧食產出能力因數、糧食生產潛力因數、糧食生產用水保障因數。

3.2.2 敏感度分析結果

在 1%、5%、10%的雜訊強度下，分別對 WEFN 系統各個子系統的主成分進行余弦相似度分析，結果如表 6~ 表 8 所示，WEFN 系統各個子系統的前三個主成分余弦相似度均在 0.998 以上，說明 PCA 結果非常穩定，即使加入雜訊 (無論是 1%、5%還是 10%)，主成分方向和原始結果幾乎保持一致。資料本身信噪比很高，雜訊的干擾對整體結構影響很小。

WEFN 系統各個子系統不同雜訊強度下累積貢獻率對比結果如圖 3 所示，累積貢獻率曲線幾乎重合，說明資訊保持率穩定。

綜上所述，PCA 在本研究的資料集上對隨機雜訊不敏感，結果具有較好的魯棒性。

表 6 水資源子系統主成分余弦相似度

雜訊強度	$F(w)_1$	$F(w)_2$	$F(w)_3$	$F(w)_4$	$F(w)_5$	$F(w)_6$
1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5%	0.999	0.999	1.000	0.993	0.993	1.000
10%	0.999	0.999	1.000	0.953	0.952	0.999

表 7 能源子系統主成分余弦相似度

雜訊強度	$F(e)_1$	$F(e)_2$	$F(e)_3$	$F(e)_4$	$F(e)_5$
1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10%	1.000	0.998	0.998	0.999	1.000

表 8 糧食子系統主成分余弦相似度

雜訊強度	$F(f)_1$	$F(f)_2$	$F(f)_3$	$F(f)_4$	$F(f)_5$	$F(f)_6$	$F(f)_7$
1%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10%	1.000	1.000	0.999	1.000	0.999	0.999	1.000

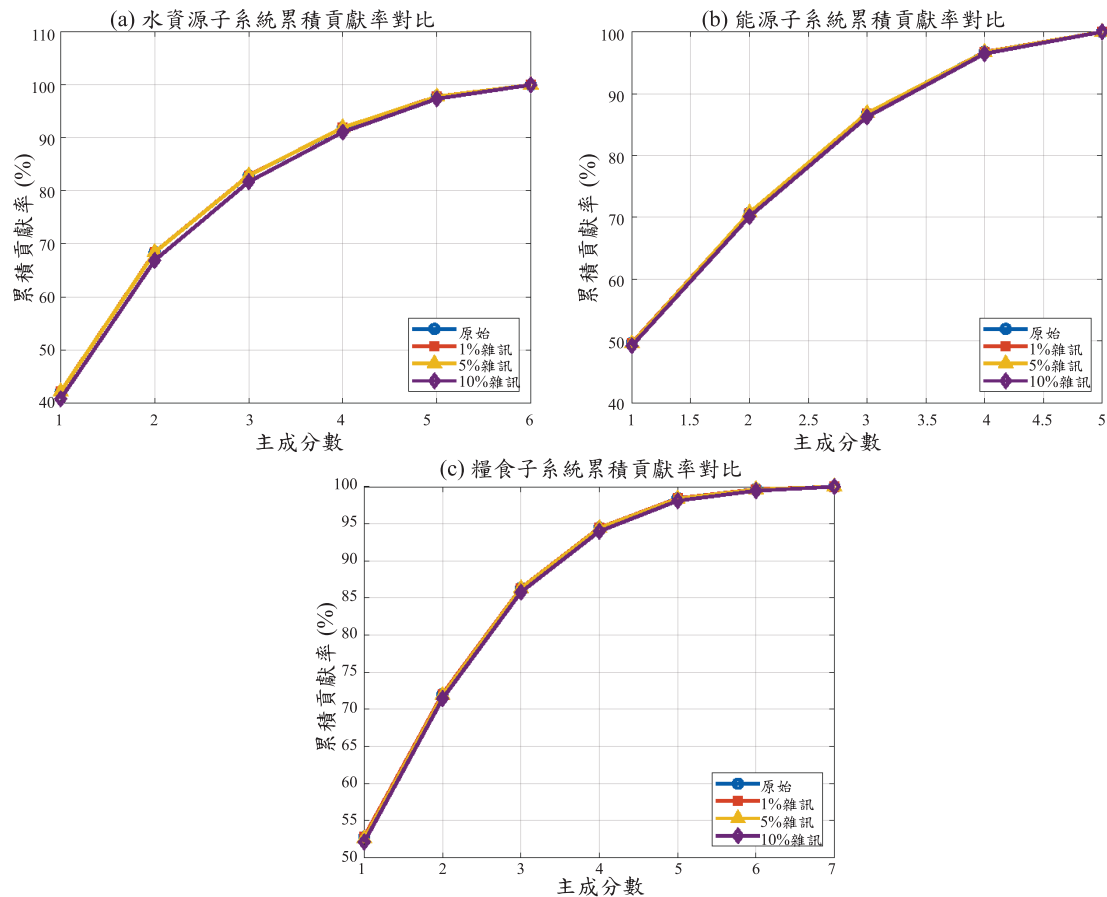


圖 3 WEFN 系統各個子系統不同雜訊強度下累積貢獻率對比

3.3 WEFN 系統耦合協調度及其時空變化趨勢

3.3.1 各子系統的評價指數評價結果

利用公式 (11) ~ (13) 求得 WEFN 系統各個子系統評價指數，其統計結果可見圖 4。

如圖 4(a) 所示，研究期間下游灌區水資源評價指數呈現先波動性變化，後穩定上升的過程。2000~2006 年下游灌區水資源評價指數波動性較強。由於該時期灌區現代化改造尚未完成，灌溉渠系工程大多老舊失修，對於乾旱氣候的應對能力較弱。特別是 2002、2006 年，研究區有效降雨量平均值僅為 311、425 mm，處於乾旱的水文年份，水資源系統的評價指數顯著下降，平均值僅為 0.31、0.35。2007~2020 年開始，灌區現代化配套工程完工，水資源系統評價指數穩定上升，波動幅度也逐漸減少。

如圖 4(b) 所示，研究期間下游灌區能源評價指數呈現先快速下降，後穩定上升的過程。研究期初期，農業能源以高強度盲目投入為主，使用效率非常低，能源子系統評價指數一度有 0.63 下降到 0.44。2006 年

起，國家層面明確提出單位 GDP 能耗降低 20% 的發展目標，進入 2008 年後各地節能減排措施全面推進。此外，在同一時期，引黃灌區開始逐步由柴油機泵等傳統高耗能動力向電力驅動設備轉變，尤其是國家對農業電價的補貼政策，使得單位產值耗能顯著下降。隨後受益於農業現代化、節能減排政策推動。能源利用效率逐步提高。特別是山東省下游的王莊、韓墩、簸箕李、雙河、麻灣、打漁張等灌區，上升趨勢明顯，能源子系統評價指數均值在 2019 年上升至 0.72。

如圖 4(c) 所示 2000-2020 年，黃河下游各灌區的糧食系統評價指數均呈現出顯著的增長趨勢。尤其是在 2000 年至 2014 年期間增長速度較快，平均值從 0.21 增長到 0.72。這一時期國家實施了一系列“三農”政策，如取消農業稅、提高糧食最低收購價、發放農業補貼等，極大調動了農民種糧積極性，保障了糧食生產。優良品種、測土配方施肥、病蟲害綜合防控等現代農業技術得到廣泛應用，提高了單產水準和抗災能力。2014 年後，糧食系統發展指數增長速度有所放緩，但整體仍保持上升趨勢。該時期農業灌溉保障和機械化進程已經相對完善，大量灌區的糧食作物調整為高效

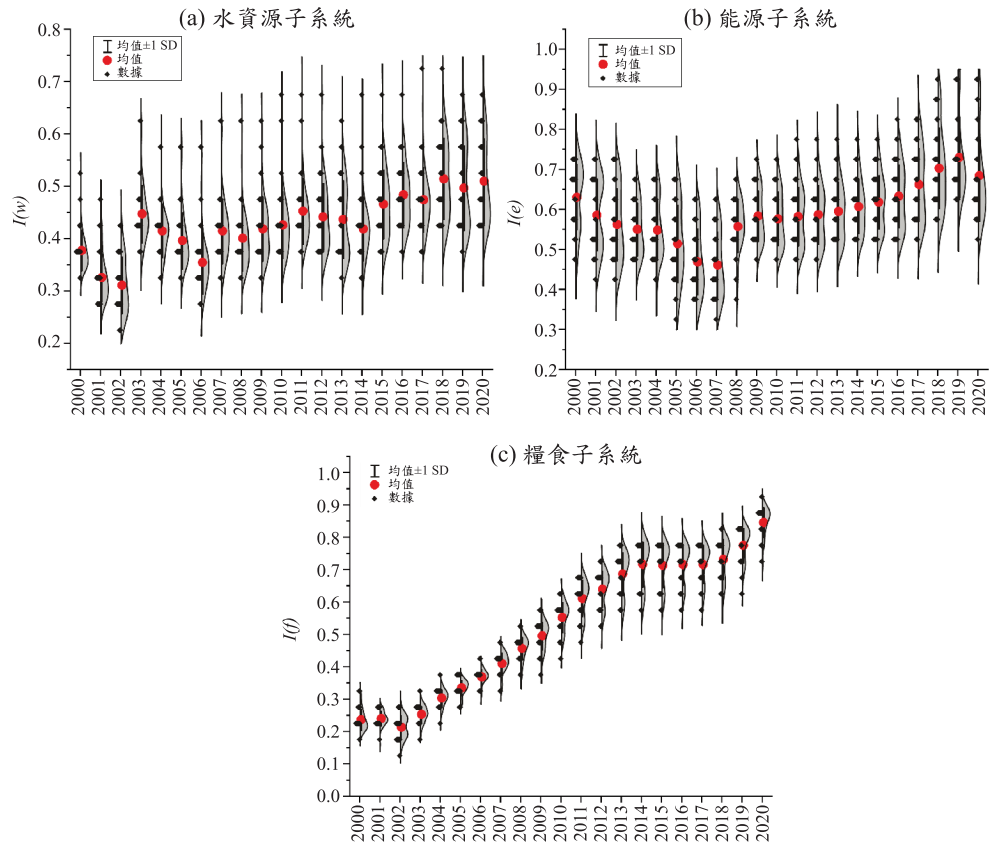


圖 4 黃河下游引黃灌區 WEFN 系統各個子系統評價指數

經濟作物或糧經結合，提升了單位面積產出與經濟效益，但糧食種植面積比例也出現了一定下滑，因此該時期糧食子系統發展指數的增速相對緩慢。

3.3.2 WEFN 系統耦合協調度測算結果

利用公式 (13) ~ (16)，求得黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度結果，如圖 5 所示。2000 ~ 2020 年，研究區 WEFN 系統耦合協調度展現出穩定上升趨勢。在研究初期 2000 ~ 2002 年，WEFN 系統耦合協調度有輕微下降，整體水準在 0.54 ~ 0.62 之間，根據表 2 耦合協調度等級劃分標準，屬於勉強協調發展等級或初級協調發展等級。2011 年，研究區 WEFN 系統耦合協調度增長較為迅速，所有灌區 WEFN 系統耦合協調度均達到 0.7 以上，半數的灌區甚至達到 0.75 以上，但沒有灌區達到 0.8，因此此時灌區 WEFN 系統耦合協調度處於中級協調發展等級。2012 年開始，研究區 WEFN 系統耦合協調度的增速開始減緩，到 2018 年增長停滯，研究區 WEFN 系統耦合協調水準趨於穩定。2020 年，研究區有 19 個灌區 WEFN 系統耦合協調度在 (0.7,0.8) 範圍，處於中級協調發展等級，有 21 個灌區 WEFN 系統耦合協調度在 (0.8,0.9) 範圍，處於良好協調發展等級。

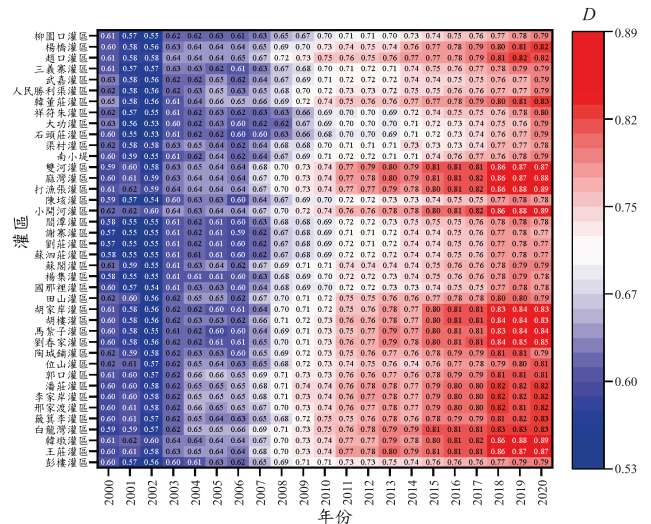


圖 5 黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度

3.3.3 WEFN 系統耦合協調度時空變化趨勢

利用 Mann-Kendall 趨勢檢驗法對 2000 ~ 2020 年黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度的時間變化趨勢進行分析，結果如表 9 所示。黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度 M-K 檢統計量 Z 在 5.28 ~

表 9 黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度時間變化趨勢核對總和變化率

灌區名稱	M-K 檢統計量 Z	變化速率值 S	灌區名稱	M-K 檢統計量 Z	變化速率值 S
彭樓灌區	5.89	0.0117	劉莊灌區	5.65	0.0114
王莊灌區	5.95	0.0149	謝寨灌區	5.59	0.0112
韓墩灌區	6.07	0.0148	閻潭灌區	5.71	0.0113
白龍灣灌區	5.95	0.0141	小開河灌區	6.01	0.0146
簸箕李灌區	5.95	0.0123	陳垓灌區	5.77	0.0108
邢家渡灌區	5.83	0.0125	打漁張灌區	6.01	0.0148
李家岸灌區	5.83	0.0127	麻灣灌區	5.95	0.0149
潘莊灌區	5.95	0.0127	雙河灌區	5.95	0.0149
郭口灌區	5.83	0.0116	南小堤	5.59	0.0107
位山灌區	5.77	0.0110	渠村灌區	5.53	0.0090
陶城鋪灌區	5.53	0.0124	石頭莊灌區	5.59	0.0110
劉春家灌區	5.77	0.0150	大功灌區	5.28	0.0102
馬紮子灌區	5.71	0.0151	祥符朱灌區	5.65	0.0111
胡樓灌區	5.71	0.0140	韓董莊灌區	5.89	0.0122
胡家岸灌區	5.59	0.0145	人民勝利渠灌區	5.77	0.0101
田山灌區	5.53	0.0111	武嘉灌區	5.53	0.0097
國那裡灌區	5.71	0.0107	三義寨灌區	5.53	0.0111
楊集灌區	5.83	0.0117	趙口灌區	5.95	0.0119
蘇閣灌區	5.77	0.0106	楊橋灌區	5.83	0.0118
蘇泗莊灌區	5.77	0.0114	柳園口灌區	5.83	0.0112

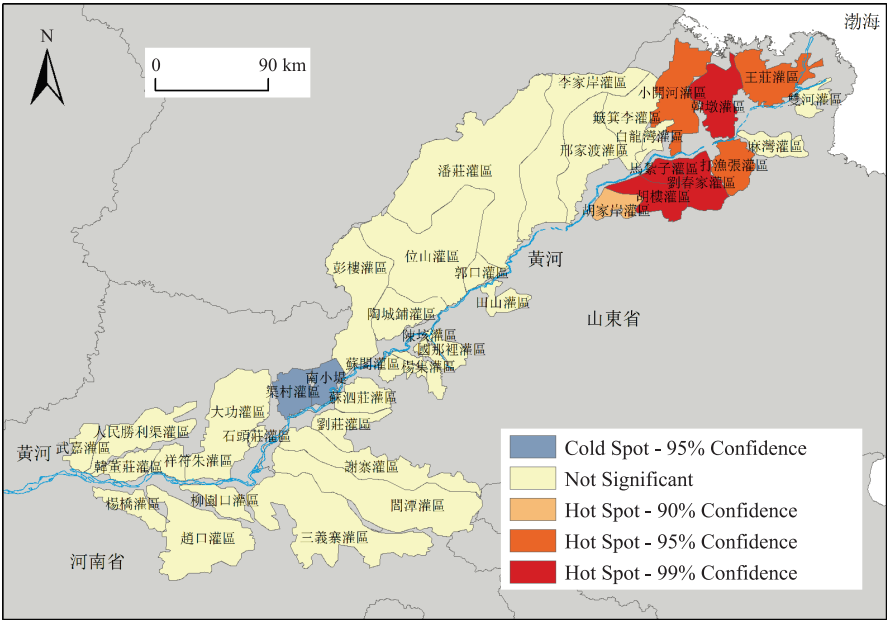


圖 6 黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度變化率冷熱點分佈

6.07 之間。本研究選取顯著水準 $\alpha = 0.05$ ，通過標準正態分佈表可知 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。因此，黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度均為顯著增長的趨勢。

利用公式 (10) ~ (12) 求得 WEFN 系統耦合協調

度整體時間變化速率值 S 。由表 9 可知，黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度整體增長速率值為 0.0090~0.0151/年。其中渠村灌區 WEFN 系統耦合協調度增長最慢， S 值為 0.009/年，馬紮子灌區增長速率

最快， S 值為 0.0151/年。利用 ArcGIS 軟體的冷熱點分析工具對 S 值進行空間分析，結果如圖 6 所示， S 值熱點主要分佈於臨近黃河入海口處的馬紮子、王莊灌區、韓墩灌區等 7 處引黃灌區，該結果表明黃河入海口處的引黃灌區耦合協調度增長速率顯著高於其他區域； S 值冷點主要分佈於山東省與河南省交界處的南小堤、渠村灌區兩個灌區，該結果表明山東省和河南省交界處的引黃灌區耦合協調度增長速率顯著低於其他區域。

四、討論

對比 WEFN 系統耦合協調度測算結果與各子系統評價結果可知，研究前期 WEFN 系統耦合協調度的增加主要源於糧食子系統的快速增長。研究前期灌區現代化配套工程完成後，水資源保障和能源供給能力大幅提升，糧食生產中的水資源消耗量和能源投入量也隨之增高，換來了糧食產出能力的飛速增長，伴隨水資源子系統發展波動與能源子系統的退化。劉楚傑、楊騫等人發現與本研究結論一致，2004~2007 年中國糧食主產區尤其是河南、山東兩省，糧食生產與農業水資源壓力脫鉤類型均以擴張負脫鉤類型為主，糧食產量快速增長帶來了巨大的資源壓力^[25,26]。到研究後期，在保障糧食安全的前提下，政府開始鼓勵農業節水與能源結構的優化，3 個子系統開始同步增長，但受技術瓶頸的約束和自然條件稟賦的限制，WEFN 系統的耦合協調度進入良好協調發展等級後，開始進入相對平穩的發展狀態。

黃河入海口處的引黃灌區耦合協調度增長速率顯著高於其他區域，這主要由於部分入海口灌區原本基礎設施薄弱、協調度偏低，近年來集中力量投入，使得邊際改善顯著，表現為協調度增長速率快。入海口水資源相對緊張、用水結構矛盾突出，反而成為倒逼系統快速協調的動力。入海口的東營市、濱州市全面推進高標準農田建設、節水灌溉技術應用（如滴灌、噴灌），水資源利用效率大幅提升，推動了水-糧系統協調。李長松測度了 2010~2020 年黃河下游 17 個地市水土匹配係數與糧食單產水準耦合協調度，入海口的東營市、濱州市同樣處於優質協調的狀態^[27]。山東省和河南省交界處的引黃灌區耦合協調度增長速率顯著低於其他區域。這主要是由於該區域地處黃河下游中段、供水通道的中下游“過度地帶”，調水受上游灌區與入海口灌區雙重擠壓，資源調度不確定性高。由於引黃水不穩定，部分區域對地下水依賴度高，導致水

資源系統長期失衡，制約系統協調演化。張澤林測算了黃河下游十七地市 2010~2021 年水資源承载力與糧食生產韌性的耦合協調度，結果同樣發現研究期間耦合協調度最低值均出現在山東省和河南省交界處的開封市、新鄉市^[28]。

五、結論

- (1) 在構建評價指標體系過程中，WEFN 系統涉及的數目繁多的變數之間可能存在高度相關性。本研究首先利用 Person 相關分析法對 WEFN 系統的水資源、能源、糧食 3 個子系統內部指標進行相關性分析，結果發現在 0.05 顯著性水準下，水資源、能源、糧食子系統各自內部的大部分評價指標之間都具有顯著的相關性。為建模的效率和評價準確性，本研究利用主成分分析法將評價指標體系中的 18 個評價指標提煉為 9 個主成分因數，在減少評價指標之間相關性的基礎上保留了 80% 以上的有效資訊。
- (2) 通過對黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度評估發現，研究區 WEFN 系統耦合協調度在研究期間總體呈現穩定上升趨勢。初期（2000~2002 年）協調水準較低，多數灌區處於勉強或初級協調發展等級（0.54~0.62）。2011 年，協調度顯著提升，所有灌區均超過 0.7，部分達到 0.75 以上，整體進入中級協調發展階段。2012 年後增速趨緩，至 2018 年基本趨於穩定。至 2020 年，研究區大部分灌區已達到較高協調水準，其中 21 個灌區處於良好協調等級，19 個灌區仍處於中級協調階段。
- (3) 黃河下游引黃灌區 WEFN 系統耦合協調度 M-K 檢統計量 Z 值在 5.28~6.07 之間，均為顯著增長的趨勢。渠村灌區 WEFN 系統耦合協調度增長最慢， S 值為 0.009，馬紮子灌區增長速率最快， S 值為 0.0151。通過冷熱點空間分析發現，黃河入海口處的引黃灌區耦合協調度增速顯著高於其他區域，山東省和河南省交界處的引黃灌區耦合協調度增速顯著低於其他區域。

致謝

本研究承蒙國家自然科學基金編號 U2243601 及 52409058 及 52309019，河南省科技攻關項目編號 242102520050 之經費補助，使本研究得以完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Gu D, Guo J, Fan Y, *et al.* (2022). "Evaluating Water-Energy-Food System of Yellow River Basin Based on Type-2 Fuzzy Sets and Pressure-State-Response Model[J]". *Agricultural Water Management*, 267: 107607. DOI:10.1016/j.agwat.2022.107607.
2. Zhang C, Zhao X, Shi C. (2024). "Efficiency Assessment and Scenario Simulation of the Water-Energy-Food System in the Yellow River Basin, China[J]". *Energy*, 305: 132279. DOI:10.1016/j.energy.2024.132279.
3. Wang Y, Song J, Zhang X, *et al.* (2022). "Coupling Coordination Evaluation of Water-Energy-Food and Poverty in the Yellow River Basin, China[J]". *Journal of Hydrology*, 614: 128461. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.128461.
4. Wang S, Yang J, Wang A, *et al.* (2023). "Coordinated Analysis and Evaluation of Water-Energy-Food Coupling: A Case Study of the Yellow River Basin in Shandong Province, China[J]". *Ecological Indicators*, 148: 110138. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110138.
5. Gao H, Liu X, Wei L, *et al.* (2023). "Assessment of Sustainable Agricultural Development Based on the Water-Energy-Food Nexus Framework in the Middle and Upper Reaches of the Yellow River, China[J]". *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42): 96040-96054. DOI:10.1007/s11356-023-29222-0.
6. Ren H, Liu B, Zhang Z, *et al.* (2022). "A Water-Energy-Food-Carbon Nexus Optimization Model for Sustainable Agricultural Development in the Yellow River Basin Under Uncertainty[J]". *Applied Energy*, 326: 120008. DOI:10.1016/j.apenergy.2022.120008.
7. Hoff H. (2011). *Understanding the Nexus: Background Paper for the Bonn2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Nexus Conf. Water, Energy Food Secur. Nexus*[J]. Stock. Environ. Institute, Bonn.
8. Flammini A, Puri M, Pluschke L, *et al.* (2014). "Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative[M]".
9. 王銳、祝笑笑、彭豔豔、趙素霞、肖東洋。「2000-2020 年黃河流域水-能源-糧食系統耦合協調時空演變特徵 [J]」。水土保持研究, 2024 (01 vo 31): 354-362. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.012。
10. 張禮兵、康傳宇、金菊良、白亞超、章啟兵、陳小鳳。「供需雙側調控下水稻灌區水-能源-糧食系統耦合協調評價與優化研究[J]」。水利學報, 2023 (07 vo 54): 829-842. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20221010。
11. 郝儀佳、夏詠、張揚、李先東。「西北地方水—能源—糧食系統耦合協調發展時空動態及預測分析[J]」。水土保持研究, 2025 (03 vo 32): 251-259. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.014。
12. 賀正齊、周到、張振揚、費義涵。基於 PSR 與雲模型的重要耕地後備資源區水資源-能源-糧食協同安全評價[J]。水利經濟, 2025 (01 vo 43): 26-31+47。
13. 宋潔、黃靜思、何冠楠、王劍曉。「水-能源-糧食紐帶系統的風險測度與韌性提升研究[J]」。中國管理科學, 2025 (01 vo 33): 323-334. DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.1708。
14. 田貴良、孫澤辰、景曉棟、楊雨璿。「高品質發展背景下黃河流域“水-能-糧-碳”系統韌性提升策略研究 [J]」。中國農村水利水電, 2024 (11): 1-11。
15. Sun C, Hao S. (2022). "Research on the Competitive and Synergistic Evolution of the Water-Energy-Food System in China[J]". *Journal of Cleaner Production*, 365: 132743. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132743.
16. Qin J, Duan W, Chen Y, *et al.* (2022). "Comprehensive Evaluation and Sustainable Development of Water-Energy-Food-Ecology Systems in Central Asia[J]". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157: 112061. DOI:10.1016/j.rser.2021.112061.
17. Halytsia O, Vracholi M, Sauer J. (2024). "Assessing Performance of Crop Producers from Water-Energy-Food-Environment Nexus Perspective: A Composite Indicator Approach[J]". *Science of The Total Environment*, 935: 173436. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.173436.
18. 李靖華、郭耀煌。「主成分分析用於多指標評價的方法研究——主成分評價[J]」。管理工程學報, 2002(01): 39-43。
19. 馬駿、李昌曉、魏虹、馬朋、楊予靜、任慶水、張雯。「三峽庫區生態脆弱性評價[J]」。生態學報, 2015(21): 7117-7129。
20. Xing L, Xue M, Hu M. (2019). "Dynamic Simulation and Assessment of the Coupling Coordination Degree of the Economy-Resource-Environment System: Case of Wuhan City in China[J]". *Journal of Environmental Management*, 230: 474-487.

- DOI:10.1016/j.jenvman.2018.09.065.
21. Yin D, Yu H, Lu Y, *et al.* (2023). "A Comprehensive Evaluation Framework of Water-Energy-Food System Coupling Coordination in the Yellow River Basin, China[J]". *Chinese Geographical Science*, 33(2): 333-350. DOI:10.1007/s11769-023-1344-2.
22. "Spatio-statistical Analysis of Temperature Fluctuation using Mann-Kendall and Sen's Slope Approach | Climate Dynamics [J]". *Climate Dynamics*, 2017.
DOI:10.1007/s00382-016-3110-y.
23. 張洪波、李哲浩、席秋義、餘熒皓。「基於改進過白化的 Mann-Kendall 趨勢檢驗法[J]」。水力發電學報，2018 (06): 34-46。
24. 任婧宇、趙俊俠、馬紅斌、彭守璋、李炳垠。「2015-2100 年黃土高原四季氣候變化的時空分佈趨勢預測[J]」。水土保持通報，2019 (05): 262-271.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.037。
25. 劉楚傑、李曉雲、江文曲。「糧食主產區糧食生產與農業水資源壓力脫鉤關係研究[J]」。農業資源與環境學報，2023 (02): 479-489.
DOI:10.13254/j.jare.2022.0009。
26. 楊騫、司祥慧、王珏。「減排增匯目標下中國糧食生產效率的測度及分佈動態演進[J]」。自然資源學報，2022 (03): 600-615。
27. 李長松、周霞、周玉璽。「黃河下游水土匹配係數與糧食生產協調發展測度及影響因素[J]」。經濟地理，2022 (10): 177-185.
DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2022.10.020。
28. 張澤琳、周霞、周玉璽。「黃河下游水資源承載力與糧食生產韌性時空耦合及驅動因素[J]」。水土保持研究，2024 (03): 412-420.
DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.003。

收稿日期：民國 114 年 07 月 10 日

修改日期：民國 114 年 08 月 25 日

接受日期：民國 115 年 02 月 20 日