

# 基于典型干旱情景模拟的水资源供需双侧适配规则研究

常文豪<sup>1\*</sup>, 苗青<sup>2</sup>, 王向博<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省第四地质矿产调查院有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月8日

## 摘要

全球气候变化背景下, 极端干旱频发对区域水资源安全构成严峻挑战。传统静态配置模式难以适应极端干旱孕育过程中供水能力与需水压力的非线性协同演化特征。本文选取2001年豫北地区历史罕见极端干旱气象过程为驱动情景, 评估豫北地区现状供水工程体系(含南水北调中线工程)在该类极端事件下的供需双侧动态适配关系。基于气象干旱综合指数(MCI)将干旱过程划分为露头、持续、高峰与缓解四个阶段, 并引入收敛交叉映射模型, 识别各阶段供需双侧耦合强度的不对称特征。结果显示: 露头期与缓解期, 供水侧对需水侧耦合解释力更强; 持续期与高峰期则相反, 需水侧对供水侧的反馈作用更强。据此提炼各阶段供需间关键响应关系: 生活用水与地下水耦合强度持续偏高, 提示应急保障应重点关注地下水; 农业需水与水库供水响应最为紧密, 提示水库调蓄需聚焦关键期灌溉; 工业需水与外调水耦合逐步增强, 提示可加强外调水对工业的支撑; 生态需水与引黄水响应密切, 提示引黄水是生态修复的核心水源。识别的关系可为区域抗旱应急管理 with 水资源韧性提升提供科学依据。

## 关键词

极端干旱, 水资源配置规则, MCI指数, 豫北地区

# Research on Supply-Demand Bilateral Adaptation Rules for Water Resources Based on Typical Drought Scenario Simulation

Wenhao Chang<sup>1\*</sup>, Qing Miao<sup>2</sup>, Xiangbo Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Fourth Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

\*第一作者。

文章引用: 常文豪, 苗青, 王向博. 基于典型干旱情景模拟的水资源供需双侧适配规则研究[J]. 地理科学研究, 2026, 15(3): 437-448. DOI: 10.12677/gser.2026.153041

## Abstract

Under the context of global climate change, the increasing frequency of extreme droughts poses a serious challenge to regional water security. Traditional static allocation models are inadequate to capture the nonlinear co-evolution characteristics of water supply capacity and water demand stress during the development of extreme droughts. This study adopts the historically rare extreme drought event that occurred in 2001 in Northern Henan as a driving scenario to evaluate the bidirectional dynamic supply-demand adaptation of the current water supply infrastructure (including the Middle Route of the South to North Water Diversion Project) under such extreme conditions. The drought process is divided into four stages (onset, duration, peak, and recovery) based on the Meteorological Drought Composite Index (MCI), and the convergent cross-mapping method is introduced to identify the asymmetric characteristics of supply-demand coupling strength at each stage. The results show that during the onset and recovery stages, the supply side has stronger explanatory power over the demand side in terms of coupling. In contrast, during the duration and peak stages, the demand side exerts a stronger feedback effect on the supply side. Based on these findings, key response relationships between supply and demand are distilled for each stage: the coupling strength between domestic water and groundwater remains consistently high, indicating that emergency support should focus on groundwater resources; agricultural water demand is most closely coupled with reservoir supply, suggesting that reservoir regulation should target critical irrigation periods; industrial water demand shows a gradually increasing coupling with external transferred water, implying that external water can be enhanced to support industry; and ecological water demand is closely linked to Yellow River diversion water, highlighting the latter as a core source for ecological restoration. These identified relationships can provide scientific references for regional drought emergency management and water resources resilience enhancement.

## Keywords

Extreme Drought, Water Resources Allocation Rules, MCI Index, Northern Henan Region

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球气候变化背景下, 极端干旱事件的发生频率、强度和持续时间均呈显著上升趋势[1][2]。2001年春季, 河南省遭遇了历史罕见的极端干旱。据统计, 2001年3月至6月, 约100天全省大部分地区无有效降雨, 主要河道来水锐减, 水库蓄水严重不足。

豫北地区位于河南省北部, 地处太行山东侧, 属于暖温带大陆性季风气候区, 水资源禀赋先天不足, 人均水资源量远低于全国平均水平。2001年3~6月, 豫北地区境内主要水库蓄水量降至死水位附近, 地下水水位大幅下降, 农业春灌用水严重短缺, 部分乡镇出现人畜饮水困难, 城市供水安全面临严峻挑战。这一极端干旱事件深刻暴露了区域水资源系统在应对突发性、持续性干旱时的脆弱性与滞后性。

在传统的水资源配置模式中, 通常以多年平均来水或典型年作为设计依据, 侧重于平水年或一般枯水年的供需平衡[3]。然而, 极端干旱事件具有显著的动态演进特征, 一般经历“露头-持续-高峰-缓

解”四个阶段[4],各阶段的水资源供需矛盾、系统响应能力及可调控空间均存在显著差异。传统静态配置策略难以根据干旱的动态演进进行灵活调整。因此,亟需突破静态配置思维,从干旱全过程演进的视角出发,精准识别供需双侧在不同干旱阶段的互馈关系。

综上所述,本文以2001年3~6月豫北地区极端干旱为典型极端干旱情景,通过还原历史干旱演进过程,分析各阶段的水资源供需态势,研究旨在厘清在干旱孕育各阶段供需耦合强度的动态变化,揭示关键响应关系,进而为分阶段配置提供重点关注建议,以期为豫北地区及类似干旱频发区提升水网韧性、优化抗旱应急调度提供理论依据与技术参考。

## 2. 研究区概况与数据来源

### 2.1. 研究区概况

豫北地区是指河南省内黄河以北的广大区域,行政区划上包括安阳、鹤壁、焦作、濮阳、新乡5个地级市,济源1个省级示范区,总面积约2.8万平方公里。该区地理位置优越,西依太行山与山西省的长治、晋城交界,北隔漳河与河北省邯郸毗邻,南面和东面临黄河与洛阳、郑州、开封相接,东连山东省,地理位置如图1所示。

豫北地区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 $14^{\circ}\text{C}$ 左右,7月最热(平均 $27^{\circ}\text{C}$ ),1月最冷(平均 $0.1^{\circ}\text{C}$ ),极端最高气温可达 $43.4^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-21.5^{\circ}\text{C}$ 。年降水量500~650毫米,时空分布不均,夏秋降水占全年的72%且多暴雨,最大年降水量达1372.8毫米(2021年),最小仅241.8毫米(1997年)。年均水面蒸发量约1300~2000毫米,远高于年均降水量,呈现出明显的“蒸发大于降水”的水分亏缺特征。蒸发量的年内分配不均,5~6月蒸发最为强烈,占全年蒸发量39%以上。全年无霜期约220天,日照时数2400小时左右。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2923号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Location map of the study area

图1. 研究区地理位置图

### 2.2. 数据来源

本文分析计算采用的2001年气象数据来自中国气象数据网;需水预测涉及的社会经济数据来自豫北各市《统计年鉴》《水资源公报》;可供水量分析参考《河南省水资源公报》《河南省南水北调水资源利

用专项规划》等。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 极端干旱情景识别

本研究选用气象干旱综合指数(MCI)进行干旱识别,该指数通过多时间窗融合算法,能够有效兼顾短期水分亏缺与长期气候异常的叠加效应,既具备捕捉短时间尺度干旱过程的能力,也能准确表征跨季度尺度干旱事件的累积特征[5]。计算公式参考《气象干旱等级》(GB/T20481-2017)[6],干旱分级标准见表1。

**Table 1.** Classification criteria for drought grades

**表 1.** 干旱等级分级标准表

等级	类型	MCI 阈值范围	干旱影响程度描述
1	无旱	$MCI > -0.5$	正常
2	轻旱	$-1.0 < MCI \leq -0.5$	降水略少,对农业影响较轻
3	中旱	$-1.5 < MCI \leq -1.0$	降水明显减少,出现一定旱情
4	重旱	$-2.0 < MCI \leq -1.5$	降水严重不足,旱情较重
5	特旱	$MCI \leq -2.0$	降水极度匮乏,旱情极为严重

#### 3.2. 干旱阶段水资源供需双侧互馈关系解析

在极端干旱胁迫的背景下,水资源供需矛盾被明显放大,二者的关系既相互影响又彼此制约。本研究基于收敛交叉映射模型,定量识别供需双侧之间的信息流向与耦合强度不对称特征,揭示二者间动态相关关系的演变情况,以便为区域应对极端干旱识别供需调控的关键响应关系及决策关注重点。

收敛交叉映射模型(CCM)是由 George Sugihara 于 2012 年首次提出[7]。该方法以状态空间重构理论和 Takens 嵌入定理为基础,通过相空间之间的相互预测来量化变量间非线性耦合强度及其信息流向不对称性,适宜于识别复杂供需系统中哪一侧对另一侧具有更强的动态解释力[8]。考虑两个长度为  $L = 109$  天  $\times$  6 市的时间序列  $X$  和  $Y$ ,通过伪近邻法确定重构流形的维度为  $E = 4$ ,重构流形时的采样间隔为  $\tau = 1$ ,最近邻点数为  $k = 5$ ,在  $t$  时刻重构流形的滞后坐标矢量为公式(3-1)、(3-2)所示:

$$x(t) = \langle x[t], x[t-\tau], \dots, x[t-(E-1)\tau] \rangle \quad (3-1)$$

$$y(t) = \langle y[t], y[t-\tau], \dots, y[t-(E-1)\tau] \rangle \quad (3-2)$$

式中,  $t \in [1+(E-1)\tau, L]$ 。同时,根据公式(3-1)和公式(3-2),可得到  $M_x = \{x(t)\}$  和  $M_y = \{y(t)\}$ 。

根据 Takens 嵌入定理,流形  $M_x$ 、 $M_y$  是微分同胚的。定义从流形  $M_y$  通过交叉映射得到  $\hat{x}[t]M_y$ , 计算公式详见公式(3-3)。

$$\hat{x}(t)|M_y = \sum w_i x[t_i] \quad i = 1, 2, \dots, E+1$$

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_j} \quad i = 1, 2, \dots, E+1$$

$$m_i = \exp \left\{ -\frac{d[y(t), y(t_i)]}{d[y(t), y(t_1)]} \right\} \quad (3-3)$$

$d[y(t), y(t_i)]$  代表着流形上  $y(t)$  和  $y(t_i)$  之间的欧氏距离, 并计算  $\{\hat{x}(t)|M_y\}$  和  $x[t]$  的相关系数  $r$ 。相关系数  $r$  的计算公式详见公式(3-4)。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^l (x[i] - \overline{x[l]}) (\hat{x}[i]|M_y - \overline{\hat{x}[l]|M_y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (x[i] - \overline{x[l]})^2 \sum_{i=1}^l (\hat{x}[i]|M_y - \overline{\hat{x}[l]|M_y})^2}} \quad (3-4)$$

随着输入数据序列长度  $L$  增加,  $\{\hat{x}[t]|M_y\}$  逐渐收敛于  $x[t]$ , 即相关系数  $r$  收敛于一个大于 0 的值, 且采用 500 次置换检验评估相关系数  $r$  的显著性水平, 可统计推断一侧变量对另一侧变量具有更强的动态解释能力。

### 3.3. 模拟框架界定与数据重构方法

#### 3.3.1. 模拟框架界定

本研究旨在评估豫北地区现状供水工程体系若再次遭遇 2001 年级别的极端气象干旱时的供需响应特征, 因此采用“历史气象驱动 + 现状工程能力”的组合模拟框架。该框架的核心假设包括:

(1) 气象驱动条件完全复现 2001 年 3~6 月的逐日降水、气温等要素, 即干旱的气象强度、持续时长和时空分布格局与历史实况一致;

(2) 供水侧采用现状工程能力核定值, 包括 2014 年通水的南水北调中线工程, 假定各类水库、引调水工程均以当前设计供水能力参与抗旱;

(3) 需水侧采用 2001 年社会经济数据, 以与气象条件保持时序一致性, 避免叠加未来经济社会发展带来的需水增长不确定性。

上述框架能直接回答“现状供水系统面对已知历史极端事件时供需适应能力是否提升”这一具有明确政策含义的问题。但其局限性亦需说明: 第一, 评估反映的是“应对已知最大事件”的能力, 而非未来气候变化下干旱强度与历时可能突破历史极值的情形; 第二, 假定工程均处于正常运行状态, 未纳入老化、调度滞后或应急响应失效等现实约束; 第三, 需水端未纳入社会经济发展预测, 结论不宜直接解读为对未来特定年份的供需平衡判定。

#### 3.3.2. 日尺度需水数据重构

考虑到极端干旱情景的特殊性, 本文将用户需水视为受气温调制的过程[9], 在保持月尺度需水总量严格守恒的前提下, 将气温作为外生驱动因子, 通过高斯钟形函数刻画需水活动与气温的响应关系, 从而构建日尺度分配权重, 以便完成月尺度需水量在日尺度上的重构。本次选取方法属于统计尺度重构方法, 其核心目标在于获取合理的日尺度相对变化结构, 而非精细刻画单日需水的绝对公平。

高斯钟形函数见公式(3-5):

$$\omega_{m,d} = \exp\left(-\frac{(T_{m,d} - T_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$G_{m,d} = G_m \cdot \frac{\omega_{m,d}}{\sum_{d=1}^n \omega_{m,d}} \quad (3-5)$$

式中,  $\omega_{m,d}$  为第  $m$  月  $d$  日在月尺度需水量分解过程中对应的温度响应权重;  $T_{m,d}$  代表第  $m$  月  $d$  日的平均气温,  $T_0$  代表第  $m$  月的多日平均气温,  $\sigma$  代表当月逐日平均气温的标准差;  $G_m$  为第  $m$  月的需水量;  $G_{m,d}$  为第  $m$  月  $d$  日的需水量。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 干旱情景识别结果

基于豫北地区 2001 年历史气象数据, 首先计算研究区逐日气象干旱综合指数(MCI), 以此作为干旱判别与阶段划分的基础。依据《气象干旱等级》(GB/T20481-2017)表述, 当 MCI 指数小于等于-0.5 时, 视为干旱发生。在此基础上, 结合干旱演进的阶段性特征, 将干旱过程进一步划分为露头期、持续期、高峰期与缓解期四个阶段[4], 具体划分标准如下。

当 MCI 值处于-1.0 至-0.5 之间时, 定义为露头期, 表征干旱初现、水分亏缺尚不严重; 当 MCI 值处于-1.5 至-1.0 之间时, 定义为持续期, 表明干旱进一步发展, 水分亏缺加剧; 当 MCI 值小于等于-1.5 时, 定义为高峰期, 反映干旱最为严重的时段; 高峰期之后的时段, 若 MCI 值回升但仍未完全脱离干旱状态(MCI < -0.5), 则归为缓解期, 表示旱情逐步减轻但仍需持续关注。

鉴于气象指数序列可能因短期波动或突变导致阶段划分碎片化, 本研究结合游程理论的干旱事件合并思想对其进行平滑处理。若某一时段的 MCI 值短暂突破当前阶段阈值, 但其前后时段均处于原阈值范围内, 则将该短波动时段并入原阶段, 不予单独划分。干旱情景阶段划分如表 2 所示。

**Table 2.** Stage division of the extreme drought event in 2001 in Northern Henan Province

**表 2.** 豫北地区 2001 年极端干旱事件阶段划分表

干旱阶段	MCI 范围	起始时间	结束时间	天数
露头期	(-1, -0.5]	2001/3/8	2001/3/24	17 天
持续期	(-1.5, -1.0]	2001/3/25	2001/4/9	16 天
高峰期	≤-1.5	2001/4/10	2001/6/8	60 天
缓解期	(-1.5, -0.5]	2001/6/9	2001/6/24	16 天

为检验上述结论对于干旱阶段划分阈值的敏感性, 本研究进一步调整了 MCI 分级边界, 将露头期与持续期的分界由-1.0 分别放宽至-0.9 和-1.1, 重新进行阶段划分。结果表明, 各阶段转换的起止时间仅出现 2~5 天的微小偏移, 验证了主要结论对 MCI 阈值选取的稳健性。

### 4.2. 供需水预测结果

需水预测是进行水资源配置规则制定的基础, 本文以豫北地区各市级单元为预测对象, 进行干旱情景下生活、生态、工业、农业四种用水户的需水预测。预测数据来源于豫北各市《统计年鉴》《水资源公报》等相关规划文件, 预测结果见表 3。

**Table 3.** Forecasted water demand under extreme drought scenarios in six cities of Northern Henan (Unit:  $10^4 \text{ m}^3$ )

**表 3.** 豫北六市极端干旱情景下需水预测结果(单位: 万  $\text{m}^3$ )

行政区	生活	生态	工业	农业	总计
安阳市	7207.38	6404.58	4162.81	85006.15	102780.93
鹤壁市	2011.53	2746.31	1914.32	30269.49	36941.66
济源市	914.31	6682.68	2189.24	3394.72	13180.94
焦作市	4728.27	3516.44	4999.99	43622.27	56866.98
濮阳市	4573.84	5954.20	2559.11	67279.41	80366.56
新乡市	8473.11	10875.90	5427.92	121391.90	146168.84
总计	27908.44	36180.11	21253.40	350963.95	436305.90

豫北地区主要有地表水、地下水、南水北调水、引黄水四种水源。参考《河南省 2001 年水资源公报》描述,在 2001 年干旱情景下,省内大部分小水库、坑塘干涸,中小河流无供水能力。基于供水可靠性与工程调控可行性的综合性考虑,将河道径流概化到大中型水库节点,以大中型水库作为核心供水主体进行可供水量分析。

本文结合《2001 年河南省水资源公报》《河南省南水北调水资源利用专项规划》及《河南省黄河水资源节约集约利用专项规划》结果基于需水过程比例折算至日尺度可供水量,对典型极端干旱场景进行可供水量分析,结果见表 4。

**Table 4.** Available water supply under extreme drought scenarios in six cities of Northern Henan (Unit:  $10^4 \text{ m}^3$ )  
**表 4.** 豫北六市极端干旱情景下可供水量结果(单位: 万  $\text{m}^3$ )

行政区	水库水	南水北调	引黄水	地下水	总计
安阳市	11338.91	2822.99	4179.86	50859.06	69200.83
鹤壁市	8720.17	3271.24	0	19948.30	31939.72
济源市	5181.76	0	2871.39	4981.01	13034.15
焦作市	24987.14	2370.07	12794.02	34151.00	74302.23
濮阳市	0	2373.65	26096.89	38689.67	67160.21
新乡市	10639.49	1621.63	31985.05	50179.01	94425.17
总计	60867.47	12459.58	77927.21	198808.05	350062.30

需特别说明的是,外调水可供水量是规划层面的多年平均分配额度,并非流域层面在干旱胁迫下动态调度后的实际可调水量。在实际极端干旱情景中,水源区自身可能同步遭遇不同程度的气象干旱,从而影响可外调水量的实际供给能力。因此,本研究中引调水可供水量属于“规划可调水量”情景下的上限估计,实际干旱应急调度中可调水量可能低于该值。

### 4.3. 干旱孕育阶段水资源供需双侧互馈形式

根据水资源供需双侧的因果关系检验,如图 2 所示,黑色线条代表需水侧对供水侧的解释程度,而红线代表供水侧对需水侧的解释程度,可见在典型干旱孕育过程中,水资源供需双侧具有明显的互馈关系。

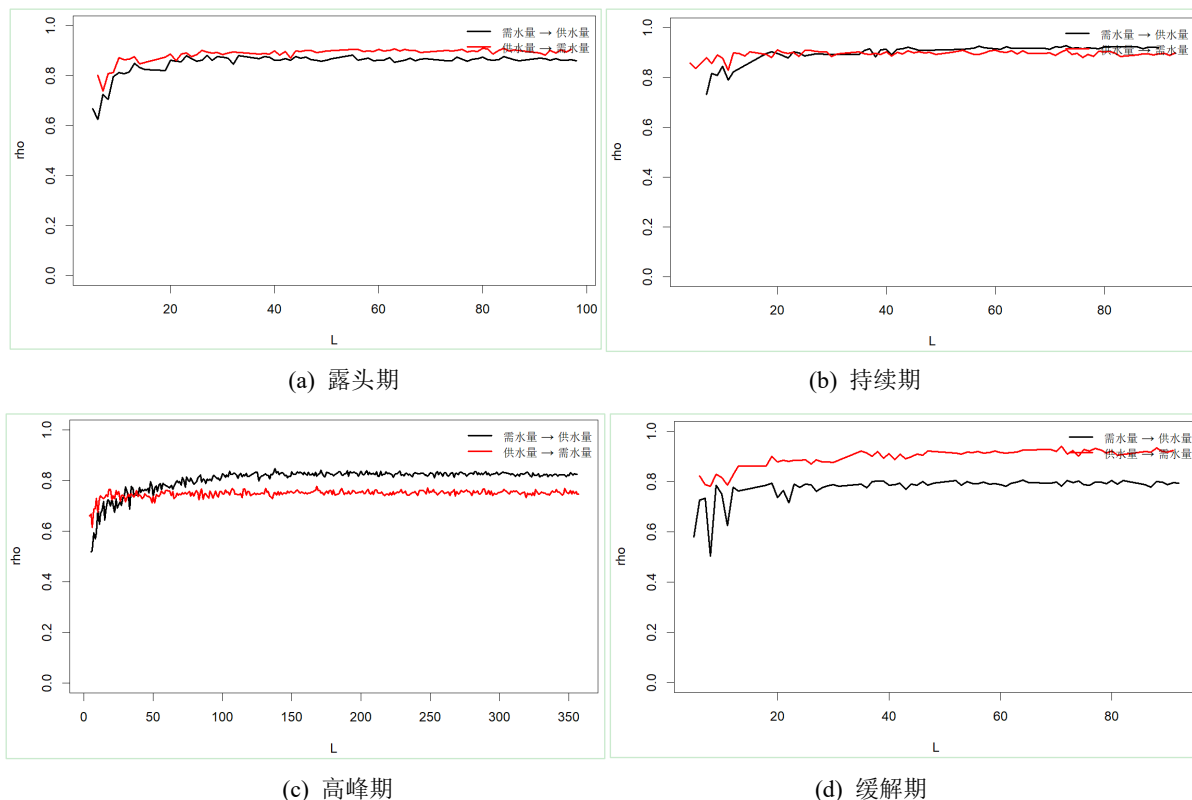
其中,在露头期内,如图 2(a)所示,需水侧对供水侧的交叉映射相关系数  $r$  收敛于 0.86,供水侧对需水侧的  $r$  收敛于 0.92,供水侧对需水侧的耦合解释力相对更强。这提示,该阶段应重点关注各供水水源的可用能力及其对需水的支撑潜力,供需关系的信息流向上主要表现为供水侧驱动。

在持续期内,如图 2(b)所示,需水侧对供水侧的  $r$  收敛于 0.94,供水侧对需水侧的  $r$  收敛于 0.89,需水侧对供水系统的动态具有更强的耦合解释力。这提示,该阶段需将调控关注重点转向需水端,密切监测不同用户需水的结构变化,以此作为供水优化调度的关键输入信息。

在高峰期内,如图 2(c)所示,需水侧对供水侧的  $r$  收敛于 0.82,供水侧对需水侧的  $r$  收敛于 0.74,需水侧的耦合解释力仍占优,供需系统信息流向表现为需水侧驱动。

在缓解期,如图 2(d)所示,需水侧对供水侧的  $r$  收敛于 0.79,供水侧对需水侧的  $r$  收敛于 0.90,供水侧的耦合解释力重新增强,供需信息流向回归供水侧驱动。

综合来看,在极端干旱演进过程中,供水侧与需水侧的耦合解释力呈交替增强态势,据此可识别不同阶段的侧重点:露头期与缓解期宜重点评估供水侧的保障能力,持续期与高峰期则应将需水端的结构变化作为优化调度的关键信号。



**Figure 2.** Results of supply-demand interaction during the drought development stage in Northern Henan

**图 2.** 干旱孕育阶段豫北地区水资源供需双侧互馈结果图

从干旱演进的物理过程来看，上述耦合特征与各阶段的供需态势具有内在一致性。在露头期内，干旱影响处于初期阶段，各水源可供水量未进入极限约束状态，整体仍具有一定的调节空间。此时供水侧可以缓解极端干旱所形成的水量缺口，供需运行边界主要由供水侧能力决定，系统整体呈现出“供水侧驱动”的基本特征。

在持续期和高峰期内，随着干旱影响持续强化并逐步发展至最强阶段，区域降水长期亏缺，水源补给能力显著下降。此时，需水侧成为水资源供需系统的主动约束变量，供水侧围绕需水侧进行反向适配，系统整体呈现出“需水侧驱动”的运行特征。

在缓解期内，极端干旱影响逐步衰减，区域来水补给能力逐渐回升，各类水源工程由低位向安全运行区间回补，可供水量逐步恢复，供水侧重新获得调节能力。此时，供水能力边界决定需水可实现水平，系统整体回归“供水侧驱动”的运行特征。

因此，水资源供需系统应随着干旱孕育过程而进行有针对性的动态调整，即在露头期和缓解期重点评估各供水水源的可用能力，而在持续期和高峰期重点监测和调控不同用户需水的结构变化，以此作为供水优化调度的关键输入信号。

#### 4.4. 露头期与缓解期水源 - 用户关键响应关系识别

在常规供水条件下，水源配置通常遵循“先地表后地下、先本地后外调”的基本原则。具体而言，应优先开发利用水库水、引黄水及南水北调水等地表水源，以降低地下水开采强度，缓解地下水超采及区域水位持续下降风险；在地表水内部，则遵循本地水优先原则，即优先利用本地水库调蓄水量，当本地水资源供给不足时，再依次启用引黄水与南水北调水等跨区域调入水源，以降低用水成本。区域各水源

供水优先序可界定为：水库水 > 引黄水 > 南水北调水 > 地下水。

然而，在干旱胁迫的情况下，上述优先序可能因水源保障能力与用户依赖程度的非线性变化而发生适应性调整。本次基于收敛交叉映射模型，从耦合强度的视角，识别不同极端干旱孕育阶段各水源与用户间的关键响应关系，明确耦合强度排序。具体而言，耦合解释程度越高，表明该水源对该用水户需水变化的支撑与动态响应关系越紧密，应是调度者重点关注和协同调控的环节。其中，南水北调水主要用于生活需水、工业需水以及生态需水；水库水主要用于生活需水、农业需水、工业需水以及生态需水；引黄水主要用于工业需水、农业需水以及生态需水；地下水主要用于生活需水、工业需水以及农业需水。

根据 4.3 结论，在露头期和缓解期，供水侧对需水侧的耦合解释力更高，因此应着重分析各水源与用户间的响应关系。各水源供水量对各用水户需水量耦合强度结果见表 5。

**Table 5.** Coupling strength between water supply from various sources and water demand of various water users  
**表 5.** 各水源供水量对各用水户需水量耦合强度结果表

干旱孕育阶段	水源	生活	工业	农业	生态
露头期	水库水	0.9997	0.4339	0.9633	0.9465
	引黄水		0.4451	0.5242	0.8618
	南水北调水	0.985	0.2845		0.9577
	地下水	0.9963	0.5558	0.9162	
缓解期	水库水	0.6136	0.4019	0.6277	0.3961
	引黄水		0.3749	0.3862	0.4026
	南水北调水	0.9934	0.1324		0.7444
	地下水	0.8871	0.6727	0.8226	

注：表中数据为收敛交叉映射的相关系数收敛值。

综合来看，由于水源和用水户之间的匹配关系和水源的功能属性不同，各水源对不同用水户的耦合强度呈现明显的分异格局，形成了不同阶段水源与用户间差异化的响应强度排序结构。

基于 CCM 耦合强度排序，得到露头期和缓解期供水侧驱动下各用水户的响应强度排序，见表 6、表 7。

**Table 6.** Ranking of response intensity of various water users under supply-side driving during the drought onset period  
**表 6.** 露头期内供水侧驱动下各用水户响应强度排序结果表

水源	生活	农业	生态	工业
水库	1	2	3	4
引黄	-	2	1	3
南水北调	1	-	2	3
地下水	1	2	-	3

注：表中数字代表响应强度排序，数值越小耦合越强。

需说明的是，表中排序反映的是 CCM 模型识别的耦合强度差异，不构成绝对的水量分配比例指令。其核心价值在于指示调度者应重点关注和优先协同的水源 - 用户关系，为干旱期水资源调配提供科学依据与决策参考。

**Table 7.** Ranking of response intensity of various water users under supply-side driving during the drought recovery period  
**表 7.** 缓解期内供水侧驱动下各用水户响应强度排序结果表

水源	生活	农业	生态	工业
水库	2	1	4	3
引黄	-	2	1	3
南水北调	1	-	2	3
地下水	1	2	-	3

注：表中数字代表响应强度排序，数值越小耦合越强。

#### 4.5. 持续期与高峰期用户 - 水源关键依赖关系识别

在需水侧，各用户的用水需求并非被动接受供给约束，其变化同样通过调度系统反馈至供水端，触发多水源联合响应，形成差异化水源依赖格局。通过识别不同用水部门对水源的依赖程度与响应敏感性，可刻画多水源联合供水的需求侧驱动路径。依据水利部《水资源调度管理办法》规定，“开展水资源调度，应当优先满足生活用水，保障基本生态用水，统筹农业、工业用水以及水力发电、航运等需要”，将用户用水的政策优先序界定为：生活 > 生态 > 工业 > 农业。

在此基础上，CCM 模型识别出的耦合强度排序，则可进一步揭示各用水户在特定干旱阶段对各水源的依赖程度差异，为政策优先序框架下的水源精准配置提供依据。

在持续期和高峰期，需水侧对供水侧的耦合解释力更强，因此应着重分析各用户与水源间的依赖关系。各用户需水量对各水源供水量耦合强度结果见表 8。

**Table 8.** Coupling strength of water demand from various water users on water supply from various sources  
**表 8.** 各用户需水量对各水源供水量耦合强度结果表

干旱孕育阶段	用户	南水北调水	引黄水	水库水	地下水
持续期	生活	0.9567		0.9755	0.9964
	生态	0.7109	0.8013	0.8747	
	工业	0.5934	0.6815	0.5598	0.4442
	农业		0.7839	0.9488	0.9
高峰期	生活	0.7877		0.862	0.9427
	生态	0.5495	0.8978	0.7765	
	工业	0.5526	0.4572	0.4211	0.4896
	农业		0.7541	0.8625	0.725

注：表中数据为收敛交叉映射的相关系数收敛值。

综合来看，不同用水部门的水源依赖强度排序呈现出显著分异格局，反映出区域供水体系在极端干旱胁迫条件下由本地应急保障向多源协同恢复的动态转换特征。具体而言，CCM 分析揭示出以下关键响应关系。

生活需水与地下水、水库水的耦合强度持续偏高，提示应以地下水应急保障和水库调蓄为生活用水的核心支撑；农业需水与水库水、地下水的响应关系最为紧密，提示水库调蓄和地下水是农业灌溉的关键依托；工业需水与外调水(南水北调水、引黄水)的耦合逐步增强，提示可加大外调水对工业部门的支撑

关注；生态需水与引黄水、水库水的动态响应密切，提示引黄水补给和水库调节是生态修复的重要保障。

在持续期内，需水侧驱动下各用水户的水源依赖强度排序详见表 9。在高峰期内，需水侧驱动下各用水户的水源依赖强度排序详见表 10。

**Table 9.** Ranking of dependency intensity of various water sources under demand-side driving during the drought duration period

**表 9.** 持续期内需水侧驱动下各水源依赖强度排序结果表

用水户	水库	引黄	南水北调	地下水
生活	2	-	3	1
生态	1	2	3	-
工业	3	1	2	4
农业	1	3	-	2

注：表中数字代表依赖强度排序，数值越小依赖强度越高。

**Table 10.** Ranking of dependency intensity of various water sources under demand-side driving during the drought peak period

**表 10.** 高峰期内需水侧驱动下各水源依赖强度排序结果表

用水户	水库	引黄	南水北调	地下水
生活	2	-	3	1
生态	2	1	3	-
工业	4	3	1	2
农业	1	2	-	3

注：表中数字代表依赖强度排序，数值越小依赖强度越高。

需指出，表中排序反映的是 CCM 模型识别的耦合强度差异，并非绝对的水源调配指令。其核心价值在于提示调度者：在满足生活、生态等刚性保障政策优先序的前提下，应重点关注哪些水源 - 用户关系需优先协同，为干旱期多水源联合调度提供科学识别依据。

#### 4.6. 政策与管理启示

(1) 建立基于 MCI 指数的分级预警与动态响应机制。结合 MCI 实时监测与供需耦合强度信号，露头期启动轻度压减与水源预蓄；持续期切换至“以供定需”刚性管理，避免高峰期无水可调。

(2) 强化地下水在极端干旱期的战略备用地位。CCM 分析揭示，高峰期生活需水与地下水耦合强度持续偏高，提示地下水是饮水安全的关键依托。建议平水年严格控采涵养，避免露头期过早大量动用，确保极端干旱期具备应急响应能力。

(3) 优化多水源联合调度关注重点。高峰期南水北调水与工业需水、生活需水耦合紧密，建议重点评估向工业和生活倾斜的可行性；引黄水与生态需水耦合突出，应充分关注其生态补水功能，防范干旱次生生态风险。

(4) 推动农业需水结构性调整与风险共担。高峰期农业需水与水库供水耦合最强，应于持续期引导压减高耗水作物灌溉，将有限蓄水精准聚焦粮食安全关键生育期，并通过农业保险等机制分担农户干旱损失。

上述启示源于 CCM 模型识别的关键响应关系，具体调度仍需结合实时水情与工程能力综合研判。

## 5. 结论

本文以豫北地区 2001 年历史极端干旱事件为例，识别了面向干旱动态演进过程的水资源供需双侧关

键响应关系，主要结论如下：

(1) 基于 MCI 指数可将极端干旱过程有效划分为露头、持续、高峰、缓解四阶段。各阶段 MCI 阈值范围与干旱演进特征吻合，为分阶段识别供需关系提供了科学依据。

(2) CCM 模型识别出干旱演进中供需双侧耦合强度的不对称特征：露头期和缓解期供水侧耦合解释力更强，表现为供水侧驱动；持续期和高峰期需水侧耦合解释力更强，表现为需水侧驱动。据此可确定不同阶段的调控侧重点。

(3) 在 MCI 指数处于露头期范围内( $-1 < \text{MCI} \leq -0.5$ )或缓解期(高峰期之后且 $-1.5 < \text{MCI} \leq -0.5$ )时，判定为进入供水侧驱动阶段。水源 - 用户响应强度排序揭示了以下关键关系：露头期，水库水与生活、生态需水耦合最强，提示应重点关注水库对生活 and 生态的保障；缓解期，水库水与农业、生活需水耦合突出，提示水库调蓄应聚焦农业灌溉与生活用水。地下水与生活、农业的耦合在两个阶段均较高，提示其是基础保障水源。

在 MCI 指数处于持续期、高峰期范围内( $\text{MCI} \leq -1.0$ )时，判定为进入需水侧驱动阶段，高峰期，生活需水与地下水、水库水耦合最强，提示应优先确保这两类水源对生活的支撑；农业需水与水库供水耦合最为突出，提示水库调蓄应聚焦关键期灌溉；工业需水与南水北调水耦合紧密，提示可加大外调水对工业的支撑；生态需水与引黄水耦合最强，提示引黄水是生态修复的核心水源。

(4) 从方法整合视角看，CCM 作为诊断工具可识别不同干旱阶段的耦合强度不对称特征与关键响应关系。这些信息可进一步嵌入优化决策框架，其中耦合强度排序能为随机动态规划的状态转移设定先验约束或为模型预测控制的目标函数提供权重赋值依据，而信息流向的阶段转换则可辅助判断应以供水侧规避风险还是需水侧主动调控为主，从而形成“诊断 - 决策”一体化的极端干旱应急管理框架。

## 参考文献

- [1] 屈艳萍, 吕娟, 苏志诚, 等. 抗旱减灾研究综述及展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 115-125.
- [2] 马明卫, 韩宇平, 严登华, 等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 11-21.
- [3] 靳涛阳, 王涛, 胡广录, 等. 基于模糊多目标优化与 FAHP-TOPSIS 方法的西北内陆河绿洲灌区水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(4): 196-205.
- [4] 贺双燕, 杨晓静, 刘俊钊, 等. 2022 年江西省干旱时空演变特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 49-62.
- [5] 高泽田, 董航宇, 范俊红, 等. 基于 MCI 指数研究河北省冬小麦生育期干旱特征[J]. 华北农学报, 2025, 40(S1): 78-85.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481-2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/flfgbz/bz/202209/t20220921\\_5098974.html](https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/flfgbz/bz/202209/t20220921_5098974.html)
- [7] Sugihara, G., May, R., Ye, H., Hsieh, C., Deyle, E., Fogarty, M., et al. (2012) Detecting Causality in Complex Ecosystems. *Science*, **338**, 496-500. <https://doi.org/10.1126/science.1227079>
- [8] 唐立娜, 梁枫迪, 颜金珊, 等. 基于不同收敛交叉映射算法的土地利用变化对环境热舒适度的时空响应因果分析[J]. 生态学报, 2025, 45(12): 5619-5636.
- [9] Chen, X. and Yang, L. (2019) Temperature and Industrial Output: Firm-Level Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, **95**, 257-274. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.07.009>