DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.002

流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理

王 煜[1,2]，万 芳[3,4]，王威浩[5,6]，韩文浩[3]，郑小康[1]，张 迪[1]，吕 鸿[1]

（1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003；2. 水利部黄河水利委员会，河南 郑州 450003；3. 华北水利水电大学水资源学院，河南 郑州 450046；4. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210029；5. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038；6. 水利部京津冀水安全保障重点实验室，北京 100038）

摘要：面向水旱灾害风险管控的需求，为揭示水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理，本文基于水资源系统复杂网络，构建“气象-水文-社会经济-生态-工程”五维水资源系统韧性评价指标体系。以汾河流域为研究对象，通过建立子系统因果关系网络厘清要素逻辑关联，综合运用耦合度模型与地理探测器方法，定量解析系统间交互作用强度及韧性驱动机理。研究结果表明：①水资源系统具有明显的复杂网络特征，各子系统间都存在较高强度的耦合关系，其中气象子系统和水文子系统之间的耦合度最高（0.933）；②2010—2022 年，年降水量、地表水资源量、城镇化水平、森林覆盖率、人均供水量等因素是汾河流域水资源系统韧性的主导驱动力，其中年降水量驱动力最强（0.812）；③不同驱动因素交互作用的影响力均大于单因素单独作用时的影响力，各影响因素之间交互作用日趋复杂，多因素共同作用趋势凸显。探索水资源系统复杂网络特征和揭示水资源系统韧性的驱动机理，对于减少灾害风险、优化水资源配置时空格局、支撑流域高质量发展具有重要意义。

关键词：水资源系统；韧性驱动机理；复杂网络；汾河流域

中图分类号：TV213.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-6791（2025）02-0190-14

流域水资源短缺及生态脆弱等问题日趋严重，加强水资源系统水旱灾害防治成为水安全保障的重要任务[1-2]。《国际水文计划（IHP）第九阶段》（2022）提出水管理面临的最重要的挑战是可持续发展、气候变化和灾害风险防控三者之间的合作与协调，其根本目标是为复杂环境下的水安全问题提供系统性解决方案。为了应对日益复杂和不确定的条件，人们正在转向更加综合的方法，韧性理念带来了传统灾害风险管理方法所没有涵盖的全面方法[3-4]。近年来，变化环境下极端气象水文事件趋于广发、频发、并发，水资源系统中气象、水文、社会经济、生态、基础设施等的关联性愈发紧密[5-6]。随着人类社会的发展和科学技术的进步，人们逐渐意识到自然界和社会多种多样的事物之间存在着复杂的关系与相互作用。一个完整的水资源系统中涉及到众多因素构成的复杂网络，因此将复杂网络作为一种有机体系表征水资源系统，具有比较鲜明的跨学科特色，被广泛运用于自然科学、社会科学以及计算机科学等领域，成为了当前研究的热点之一[7]。水资源系统复杂网络的结构与演变机制在当前的研究中展现出非常重要的意义，分析水资源系统复杂网络的特征，可为水资源系统韧性相互作用机制提供基础理论和启示。

目前关于水资源系统韧性的研究主要集中在建立基础理论、指标量化、提出评价方法等方面。如 Hall 等[8]在英格兰供水系统的背景下探索水资源系统韧性，基于风险分析和模拟建模对系统韧性进行评估，用于指导英格兰的水资源管理；Behboudian 等[9]基于证据推理方法（ER）和广义组合规则（GC）评估了极端事件下的水资源系统韧性，并定义了一些适应性管理场景，以提高系统韧性；周申蓓等[10]基于 PSR 模型的研究框架

收稿日期：2024-10-22；**网络出版日期：**2025-04-02
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250402.1544.004
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3202300）；国家自然科学基金项目（52479014）
作者简介：王煜（1968—），男，河南开封人，正高级工程师，博士，主要从事水利规划和水文水资源研究工作。E-mail：happytimes@126.com
通信作者：万芳，E-mail：wanxf1023@163.com

分析了长江流域 11 省水资源系统的韧性变化及其影响特征；赵自阳等[11]构建韧性调控模型对长江经济带的水资源-水环境-社会经济复杂系统韧性进行评估，并分析了其调控因素；何伟军等[12]构建投影寻踪模型对长江经济带水资源系统韧性进行评估，采用地理探测器识别影响水资源系统韧性空间分布格局的调控因素；陈宇昕等[13]基于 DPSIR 模型分析了长三角海岸带韧性的时空演化特征。目前对水资源系统韧性的研究主要局限于对水资源系统韧性本身的定量分析和评估，忽视了它与气象、水文、社会经济、生态和工程设施等方面复杂网络间的联系。影响水资源系统韧性的因素众多[14-16]，主要有灾害性气象水文扰动、社会经济水平、生态因素、基础设施、科学技术、治理能力等因素，通过各因素间相互作用，进而影响水资源系统韧性。水资源系统韧性的驱动机理繁杂无序、多变无定律可循、涉及维度广袤，亟需从复杂网络的角度科学探索流域水资源系统复杂网络特征及韧性发展的驱动机理，解析复杂网络系统时空演变过程的非线性作用关系，对于减少灾害风险、提高流域发展质量、优化流域发展空间格局具有重要的研究意义。

汾河流域位于黄土高原中部，受气候变化及人类活动的影响，成为黄河中游山西省水土流失较为严重的地区之一，同时形成气象-水文-社会经济-生态-工程相互影响的水资源系统复杂网络。随着国家西部大开发、黄河流域生态保护和高质量发展等国家战略的实施，水资源需求还将进一步增长，保障供水安全面临新的严峻考验，汾河流域高质量发展的关键在于汾河流域水资源系统韧性的稳步提升[17-19]。因此，本文主要从水资源系统复杂网络的角度，探究要素间的因果关系及相互作用强度，厘清影响水资源系统韧性的主要驱动机理，明晰不同因素对韧性的影响程度及作用关系，为揭示水资源系统韧性的演变机理、靶向提升水资源系统韧性打下基础。

1　水资源系统复杂网络特征与韧性的演变过程

1.1　水资源系统复杂网络特征

水资源系统是处在一定范围或环境下，为实现水资源开发利用目标，由相互联系、相互制约、相互作用的若干气象水文、经济社会水平、水资源工程单元和管理技术单元所组成的有机体，即以水为主体构成的一种特定系统。气候变化及强人类活动的环境下，水资源系统中气象-水文-社会经济-生态-工程等的关联性愈发紧密，常表现为“牵一发动全身”的连锁反应，极具复杂性和不确定性。随着人类社会的发展和科学技术的进步，自然界和社会多种多样的事物之间存在着复杂的相互作用关系。一个生态系统是由众多生物和环境因素构成的复杂网络，变化环境下的水资源系统，亦可应用复杂网络来表征。比如，水资源系统中因为气候变化或者人为活动等因素，某些节点或边的变化将影响整个系统的发展，因此水资源系统契合复杂网络理论。

复杂网络的形成和演化是一个复杂且具有非线性特征的演变过程，往往是由许多因素共同作用的结果，例如自然驱动、人类活动、管理水平等。水资源系统韧性具有多维度相互交织、动态传递、非线性的特征，形成了在系统维度-空间维度-时间维度上紧密联系又相互影响的复杂网络。系统维度上，水资源系统主要受气候变化、水文、气象、生态等因素影响。空间维度上，在流域尺度方面水资源系统主要面临区域发展水平不均、竞争力和劳动力发展不协调所带来的经济风险；在河段尺度方面水资源短缺、水灾害频发和水环境污染等各类扰动是制约水资源系统韧性提升的重要因素。时间维度上，水资源系统韧性状态由原始韧性水平演变为新的稳定水平，其改变可能是由于受到大旱、极端天气等大扰动导致的急性冲击，也可能是由于经济发展、供需结构变化等导致的慢性压力所造成，随着时间的推移，这些因素可能会使水资源系统恢复能力逐渐丧失，从而导致系统为崩溃状态。综合来看，水资源系统本身的复杂性决定了水资源系统的复杂网络结构，而水资源系统的复杂网络结构是其韧性的基础。在水资源系统复杂网络中，某一链路或

节点发生风险，可能在自身或其他链路产生连锁反应，并可能在整个链路中传导和扩散，引发水资源供需失衡从而导致水危机。科学有效和有针对性地综合运用水资源、社会、经济、生态、管理等调控措施，系统识别流域水资源复杂网络的特征，深刻剖析多因素扰动下水资源系统的非线性交互过程，揭示水资源系统在社会、自然系统中“气象-水文-社会经济-生态-工程”5 个维度中的影响因素，可为揭示水资源系统韧性的多因素扰动机理提供重要依据。水资源系统复杂网络图如图 1 所示。

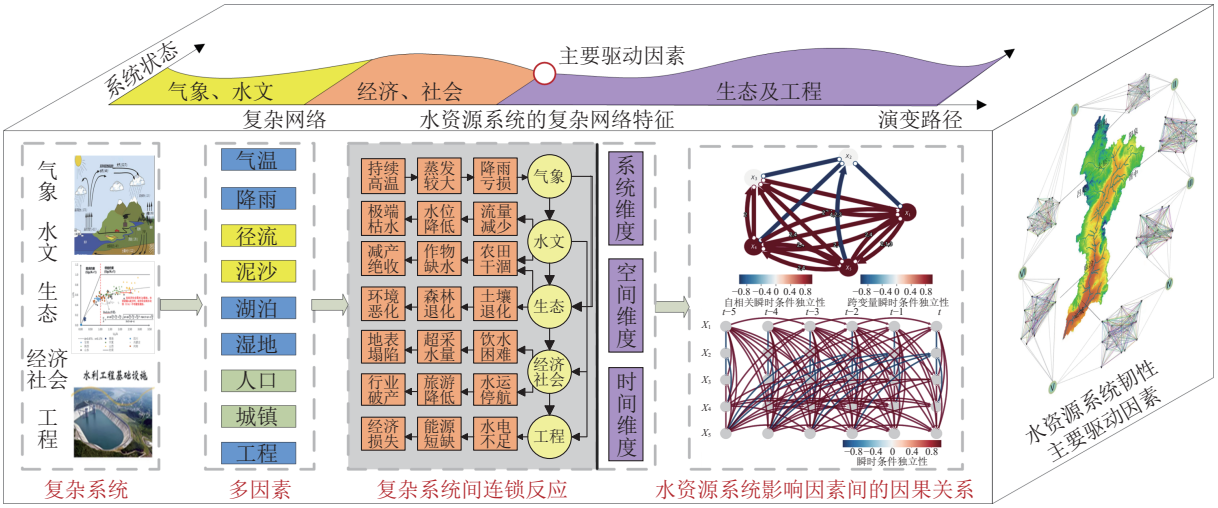

图 1 水资源系统复杂网络图构建

Fig. 1 Construction of complex network diagram of water resource systems

1.2 水资源系统韧性的演变过程

水资源系统韧性存在着复杂的动态联系、结构演化和耦合效应。时间尺度上，多层次、多维度、多情景下水资源系统的动态适应性轨迹方面，亟需探究影响因素之间的作用关系和驱动机理，分析各类影响因素叠加后是否会强化或削弱水资源系统的韧性，从而揭示水资源系统韧性的演变机理。从空间上看，韧性随着流域河段、区域差异而不同，多尺度视角下水资源系统韧性的空间异质性研究较为有限，同尺度不同区域间韧性关联性及互动研究也需进一步加强。因此，本文厘清不同时空尺度下水资源系统韧性影响因素间的相互作用关系，注重从复杂网络角度把握水资源系统韧性的演化发展过程，进一步辨识多因素影响下导致水资源系统韧性变化的内外在作用机制及强度变化，进而揭示其多维度、多尺度影响过程和反馈特征。

水资源系统从初始状态经过漫长时间的发展，逐渐变成一个成熟稳定的系统，此时系统之间的因素间变得越来越相互依赖。如图 2、图 3（t_0 为初始阶段时间；t_{ab} 为系统处于破坏阶段的时间；t_{re} 为系统越过阈值恢复阶段的时间；t_{ns} 为系统达到新的稳定阶段的时间）所示，系统在吸收扰动的过程中，过度紧密的系统将达到饱和，内部排斥会随外部因素干扰加强而增强，直至达到破坏阈值，此阶段是系统受多因素影响最大的时候。在不稳定因素持续加强的情况下，抵抗过程中系统释放了所积累的资源，失去了对内部组织的控制能力，状态也将从抵抗直到被破坏。系统此时需要从上一阶段释放的资源中开始重组，这是系统最不确定和最可能发生破坏形式的恢复阶段，复杂的水资源系统不倾向于某种初始的平衡，而是通过吸收、抵抗、破坏、恢复（重组）达到新的平衡。水资源系统韧性演变发展过程，如图 2 所示，图中纵坐标为水资源系统性能，横坐标为时间。其中水资源系统性能包括：“气象-水文-社会经济-生态-工程”5 个维度中影响因素的综合作用效果，函数 $f_1(x)$、$f_2(y)$、$f_3(z)$、$f_4(s)$、$f_5(e)$ 分别为 5 个维度中主要驱动因素的表征函数，以此来表征水资源系统性能（$S_{\mathrm{link}(t)}$）。

$$S_{\text{link}(t)} = F(f_1(x), f_2(y), f_3(z), f_4(s), f_5(e)) \tag{1}$$

基于水资源系统复杂网络特征，水资源系统韧性发展为区域水资源系统面对外界压力、风险、环境等多因素冲击扰动时的抵抗能力，修复损坏部分从而维持水资源系统平衡状态的恢复能力，并通过韧性调控使系统转向稳定阶段，如图 3 中从初始过程经过破坏、恢复过程，通过韧性调控演变发展为稳定阶段。其中，抵抗能力主要是防止水资源系统脱离当前发展路径从而导致系统衰退的能力，其可保证水资源系统的可持续性发展，抵抗能力的大小主要取决于系统长期以来的历史发展路径。而恢复能力主要是使区域水资源系统通过系统管理、技术创新等转变，使得系统能够恢复到原有路径或维持稳定的能力。

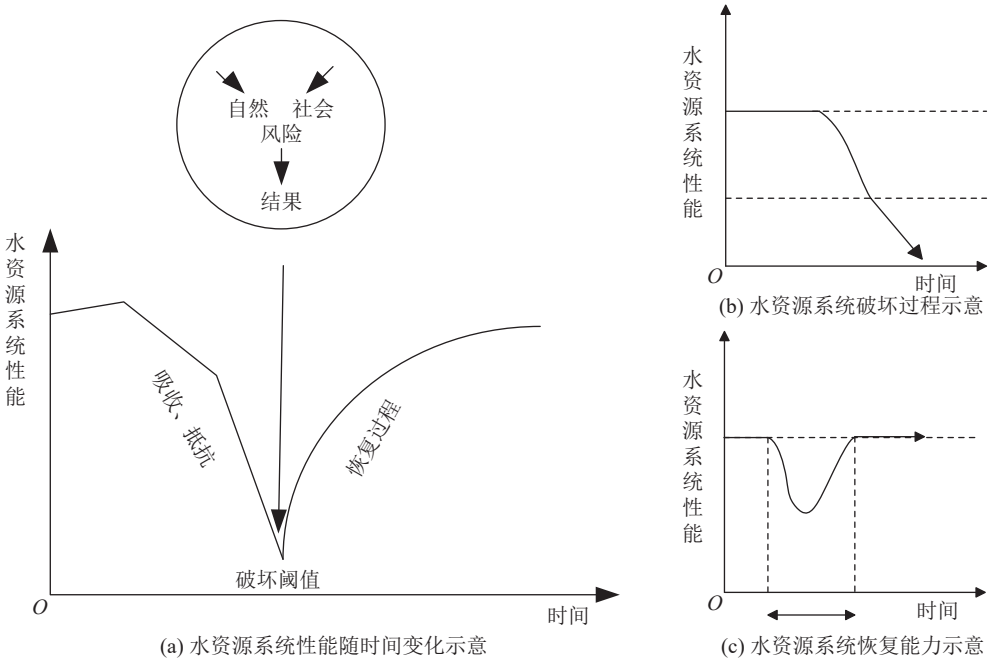

图 2　水资源系统破坏及恢复过程示意

Fig. 2　Water resource systems damage and recovery process diagram

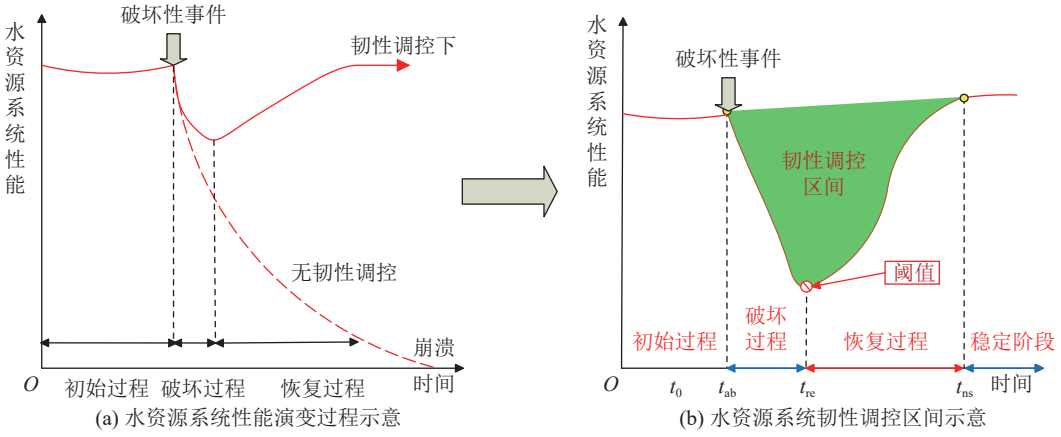

图 3　水资源系统韧性演变过程

Fig. 3　Resilience evolution process of water resource systems

水资源系统韧性状态发生改变可以是由于大扰动(如大旱、极端天气)造成的急性冲击，也可以是由逐渐和更普遍的影响(如经济发展、供需结构变化等)造成的慢性扰动。随着时间的推移，相对较小的“事件”导

致系统破坏，将越过阈值，开始水资源系统恢复阶段。因此，增加图 3 中的“韧性调控区间”可提高水资源系统韧性。鉴于韧性传递过程中的慢性扰动比容易识别的急性冲击更难处理，因此，研究水资源系统韧性的多因素作用强度及主要驱动因素是揭示复杂网络系统驱动机理及提升水资源系统韧性的关键。

2 水资源系统韧性的多因素作用强度及主要驱动因素

2.1 水资源系统韧性的多因素作用强度

基于“气象-水文-社会经济-生态-工程”各子系统间的复杂网络，建立水资源系统韧性系统动力学模型，模拟复杂系统时空演化过程等非线性问题，表达各因素之间的相互作用关系。为了定量反映水资源系统韧性影响因素之间的相互作用程度，首先构造一个效果函数 U_{ij}，然后构造耦合函数 C_m，表征要素之间关系的强度。构建耦合度模型度量各子系统之间的耦合程度，耦合指数越大，表明 2 个或多个子系统之间的有序程度越高，相互影响程度越深。本文选择 ANP-熵权-TOPSIS 法[20-21] 对水资源系统及其子系统韧性综合评价指数进行度量。

（1）将网络层次分析法（Analytic Network Process，ANP）与熵权法相结合，确定水资源系统韧性的评价指标权重：

$$W_j = k_1 W_{1j} + k_2 W_{2j} \tag{2}$$

式中：$W_j (j = 1,2,\cdots,n)$为第 j 个评价指标组合权重，n 为指标个数；W_{1j}、W_{2j}分别为第 j 个指标的 ANP 主观权重和熵权法权重；k_1、k_2 为线性组合系数，一般取 k_1=k_2=0.5。

（2）采用 TOPSIS 法计算综合评价值（E_i）：

$$E_i = \frac{D^-}{D^+ + D^-},\ 0 < E_i \leqslant 1 \tag{3}$$

式中：E_i 为第 i 个区域系统的综合评价值；D^+、D^-分别为各评价指标与正、负理想解之间的欧式距离。

（3）计算各区域子系统间耦合度（C_{iz}）：

$$U_{iz} = \frac{E_{iz} - B_{iz}}{A_{iz} - B_{iz}} \tag{4}$$

$$C_{iz} = z \times \left[\frac{U_{i1} \cdot U_{i2} \cdot U_{i3} \cdots U_{iz}}{(U_{i1} + U_{i2} + U_{i3} + \cdots + U_{iz})^z} \right]^{\frac{1}{z}} \tag{5}$$

式中：U_{iz}为第 i 个区域第z个子系统达到目标的程度，取值范围为 [0,1]，$z = 1,2,\cdots,5$分别表示气象、水文、社会经济、生态、工程；E_{iz}为第 i 个区域第z个子系统的综合评价值；A_{iz}和B_{iz}分别为水资源系统达到稳定状态时该影响因素的上、下限；C_{iz}取值范围为 [0,1]，各影响因素耦合强度在C_{iz}=0 时最弱、在C_{iz}=1 时最强。

2.2 水资源系统韧性的主要驱动因素识别方法

（1）随机森林算法（RFA）具有极强的数据挖掘能力，适用于处理复杂系统的分类问题，可结合袋外数据（Out-of-Bag，OOB）从庞大的数据集中计算水资源系统韧性影响因素的重要程度，从而揭示各相互关联的影响因素间的复杂关系。此外，随机森林算法每次抽样会保留约 1/3 的数据作为袋外数据，用于在模型生成的过程中取得真实误差的无偏估计，利用 OOB 计算得到影响因素的相对重要性[22]。

因此，本研究应用随机森林算法对水资源系统韧性的影响因素进行重要性分析，以得到各因素对水资源系统韧性的影响程度。其主要思想为，计算每个影响因素在模型单棵决策树中的贡献值，再对全部树的结果取平均值，具体计算过程如下式所示：

$$I(x) = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^{J} C_{k,\text{full}} + \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{1}{J} \sum_{k=1}^{J} I_k(x, j) \right) \tag{6}$$

式中：$I(x)$ 为影响因素贡献值；$C_{k,\text{full}}$ 为第 k 棵树中整个数据集的平均值；J 为决策树数量；n 为影响因素数量；$I_k(x,j)$ 为第 k 棵树中第 j 个影响因素 x 的局部贡献值。

（2）地理探测器是一种用于探测和研究地理空间数据的工具[23-25]，用于分析和揭示地理现象之间的空间关联性和交互作用，可以有效识别多因素之间的关系。水资源系统复杂网络中单因素、多因素等的变化将导致水资源系统韧性发生改变，因此利用地理探测器中的因素探测和交互探测模块，分析引起流域水资源系统韧性发生变化的主要驱动因素以及不同因素间的叠加作用，检验水资源系统韧性不同驱动因素间的相互作用关系。因素探测主要是探测因变量（水资源系统韧性）Y 的空间分异性，以及探测影响因素 X 解释水资源系统韧性 Y 的空间分异性的程度，即因素解释度，用 q 值度量，表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{z=1}^{L} N_z \sigma_z^2}{N\sigma^2} \tag{7}$$

式中：q 表示离散化后的影响因素对因变量水资源系统韧性的解释能力，取值在 0～1 之间；$z = 1,2,3,\cdots,L$，z 是影响因素的分类或分层；N_z 和 σ_z^2 分别为 z 层的样本数和方差；N 和 σ^2 分别为总样本量和方差。交互作用探测主要是识别不同驱动因素之间的交互作用，即评估 2 个因素共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力，交互作用结果可以分为 5 类，如表 1 所示。

表 1　探测因素交互作用类型及判断标准

Table 1　Detection factor interaction type and judgment standard

交互作用类型	判断标准
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因素非线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因素增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

3　结果及分析

3.1　研究区概况

汾河是黄河第二大支流，位于 110°30′E—113°32′E、35°20′N—39°00′N 之间，地处黄土高原东部，纵贯山西省境中部，自北向南流经忻州、太原、晋中、临汾、运城和吕梁 6 个市的 41 个县（市、区），如图 4 所示。汾河干流全长约 710 km，流域面积为 39 741 km^2，海拔范围为 348～2 801 m。汾河流域水资源、水环境、水生态、水灾害等问题较为突出，是山西省乃至全国重要的水源地和生态保护区，是山西省防洪和生态修复的重点流域。由于气候变化和人类活动的影响使该流域在“自然-社会-生态循环”过程中形成了“气象-水文-社会经济-生态-工程”等众多因素紧密联系又相互影响的复杂网络系统。

基于监测资料与统计资料相结合的方式，采用数据挖掘、尺度衔接、数据分析和多源异构数据同化等技术方法，收集和处理汾河流域基于复杂网络的水资源系统韧性相关的水文气象、社会经济、水资源开发利用、水利工程建设和生态环境指标等数据，按时间和空间尺度进行分类，建立水资源系统韧性综合数据库。收集整理汾河流域内及邻近周边 9 个站点的降水资料，以及汾河流域 1960—2022 年的气象、水文、供水数据、地貌及下垫面等的遥感影像和流域社会经济信息等数据资料，建立基础数据与信息库，利用 GIS 技

术在空间分析、预测和辅助决策等方面的优势，对数据进行储存、分析、管理及供水资源系统韧性指标构建等使用。其中，气象水文数据网格的空间分辨率为 0.5°×0.5°，数据来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/）和中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/DOI/doiList.aspx）；社会经济数据来源于《统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》和中国科学院资源环境科学数据中心等；部门用水数据来源于《黄河流域水文年鉴》、《水资源公报》和《水利统计年鉴》等；下垫面数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心；土壤数据来源于联合国粮农组织（FAO）网站（http://data.fao.org/map?entryId=ce0c9967-471d-9a2e-3dbc28683ba3）等。

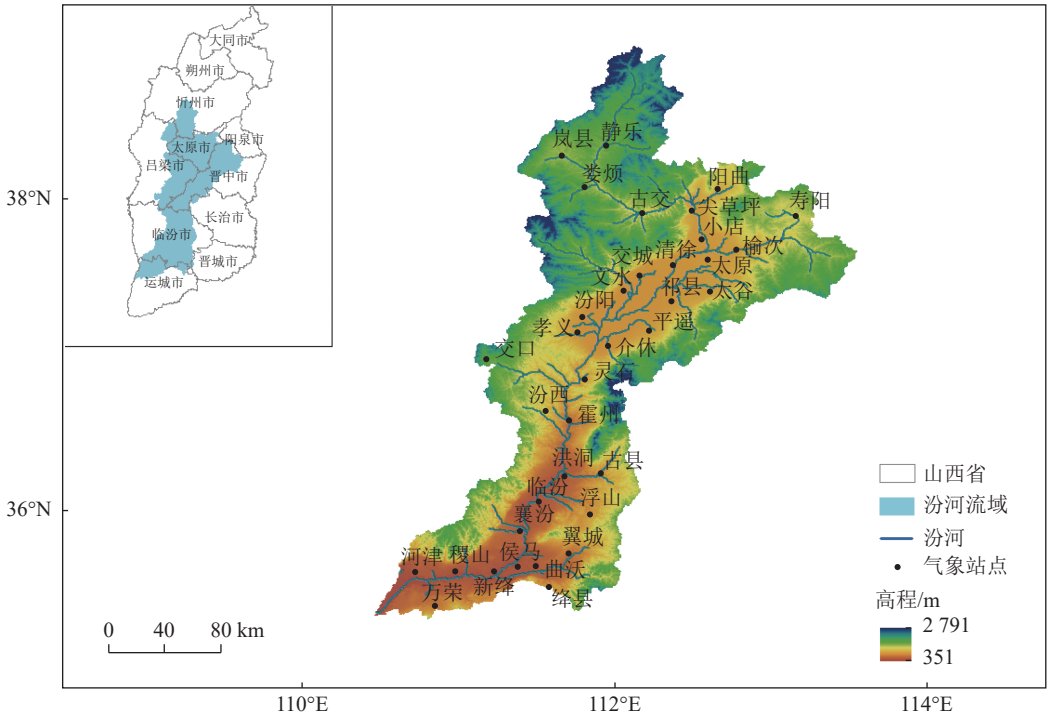

图 4 汾河流域水系及雨量站点位置分布示意

Fig. 4 Distribution of river system and rainfall stations in Fenhe River basin

3.2 韧性评价指标体系构建

在全球气候及环境变化的背景下，干旱灾害事件频发，河流的径流量日益减少，河道出现断流，湖泊和湿地等水域面积萎缩；在人口增加、灾害事件频发、工农业发展和气候变化影响下，水资源供需矛盾问题将进一步加剧，对水资源的管理提出了更加严峻的要求，实现水资源的可持续利用和发展成为了当前时代背景下的研究热点。水资源系统韧性评价指标体系是评价水资源系统受自然因素和人类活动影响的重要依据，也是解决水资源供需矛盾和发展不平衡问题、提出适应性对策的关键。根据研究区域的自然属性、区域发展水平、社会经济文化环境等，需要构建复杂网络影响下的多目标、多维度、多尺度的水资源系统韧性评价指标体系。主要由“气象-水文-社会经济-生态-工程”多维度建立指标体系（表 2），在水资源系统韧性评价过程中，构建不同的指标体系可能会得到不同的评价结果，因此在评价结果的指示值上可能会存在一定的差异性，但客观的水资源系统韧性状态及演化趋势相同。本文依据科学性、合理性以及可获得性原则，探索水资源系统韧性评估策略，构建水资源系统韧性评价指标体系，以期较为全面地反映水资源系统的韧性各维度子系统的相互作用。

表 2　水资源系统韧性评价指标体系

Table 2　Resilience evaluation index system of water resource systems

准则层	指标	单位	符号	属性	准则层	指标	单位	符号	属性
气象	年降水量*	亿m^3	X_1	+	社会经济	生活用水	亿m^3	X_{14}	−
	气温*	℃	X_2	−		人均供水量*	m^3/人	X_{15}	−
	蒸发量	mm	X_3	−		水资源利用率	%	X_{16}	−
水文	水资源总量	亿m^3	X_4	+	生态	森林覆盖率	%	X_{17}	+
	人均水资源量*	m^3	X_5	+		废水排放达标率	%	X_{18}	+
	地表水资源量*	亿m^3	X_6	+		生态用水量	亿m^3	X_{19}	+
	地下水资源量	亿m^3	X_7	+		环境生态管理资产投资	万元	X_{20}	+
社会经济	城镇化水平*	%	X_8	+	工程	蓄水	亿m^3	X_{21}	+
	常住人口	万人	X_9	−		引调水*	亿m^3	X_{22}	+
	人口自然增长率	%	X_{10}	−		提水	亿m^3	X_{23}	+
	GDP	亿元	X_{11}	+		非常规水*	亿m^3	X_{24}	+
	万元GDP用水量	m^3	X_{12}	−		地下水开采	亿m^3	X_{25}	−
	工农业用水	亿m^3	X_{13}	−					

注：*为3.4节中选取用于地理探测器的指标；+表示越大越优，−表示越小越优。

3.3　水资源系统韧性多因素作用强度分析

系统动力学能够明确反映系统内部、外部因素之间的相互关系。本研究将水资源系统划分为 5 个子系统，并且建立各子系统之间的因果关系网络，厘清各因素变量之间的逻辑关系，建立整体与各组成元素相协调的机制，强调宏观与微观相结合，多方面、多角度、综合性地研究系统问题。系统动力学因果关系如图 5(<Time>表示该变量的大小与时间有关)所示。

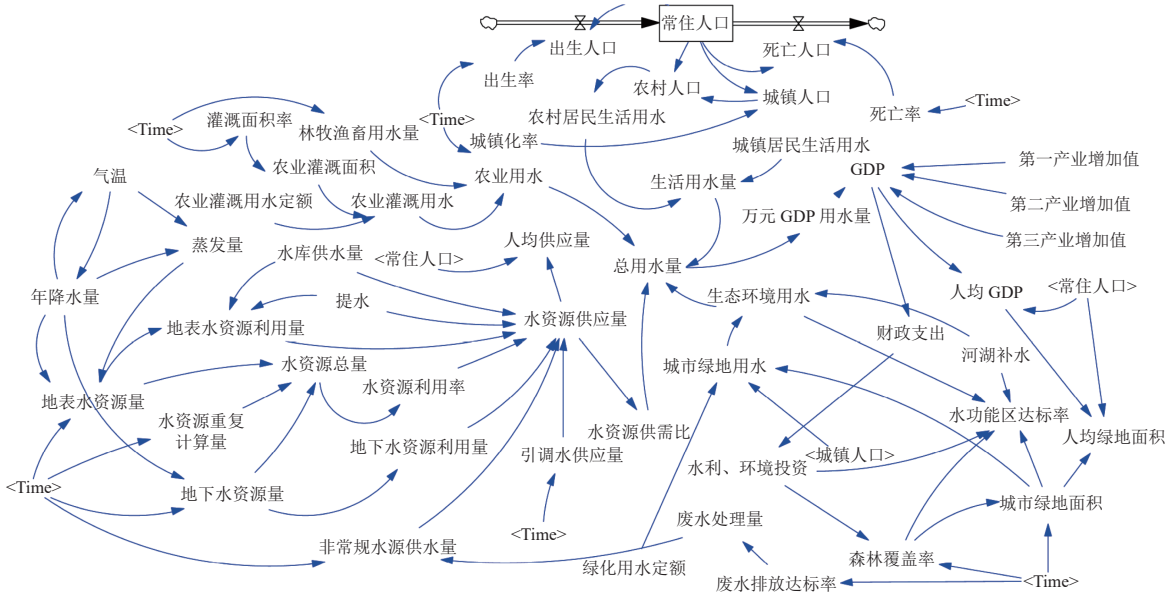

图 5　水资源系统韧性的系统动力学因果关系

Fig. 5　System dynamics causality diagram of water resource systems resilience

耦合度反映了各子系统之间相互作用的影响强度，为量化影响因素间耦合作用程度，利用耦合度模型可

对各系统之间的作用程度进行计算，其计算结果可为提高水资源系统韧性提供一定的理论支撑。为获得长期趋势的全面视角，每 3 a 选择 1 个样本点，从 2010—2022 年中截取 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年、2022 年等 5 a 的时间断面作为样本进行分析，这些年份覆盖了较长时间跨度，可以更加清晰地捕捉到水资源系统韧性的长期趋势和变化。根据式(2)—式(5)，分别对双系统、三系统、四系统、五系统间的耦合度进行计算，其计算结果见表 3。

表 3 水资源系统各子系统耦合度计算结果

Table 3 Calculation results of coupling degree of each subsystem of water resource systems

系统耦合类型	耦合形式	耦合度	系统耦合类型	耦合形式	耦合度
双系统耦合	气象-水文	0.933	三系统耦合	气象-水文-工程	0.652
	气象-社会经济	0.604		气象-社会经济-生态	0.599
	气象-生态	0.700		气象-社会经济-工程	0.552
	气象-工程	0.667		气象-生态-工程	0.606
	水文-社会经济	0.629		水文-社会经济-生态	0.612
	水文-生态	0.698		水文-社会经济-工程	0.555
	水文-工程	0.646		水文-生态-工程	0.592
	社会经济-生态	0.795		社会经济-生态-工程	0.634
	社会经济-工程	0.683	四系统耦合	气象-水文-社会经济-生态	0.597
	生态-工程	0.708		气象-水文-社会经济-工程	0.557
三系统耦合	气象-水文-社会经济	0.616		水文-社会经济-生态-工程	0.553
	气象-水文-生态	0.688	五系统耦合	气象-水文-社会经济-生态-工程	0.551

由表 3 可以看出，水资源系统韧性子系统间都存在较高强度的耦合关系，均在 0.5 以上，说明各子系统间的作用程度显著。在双系统耦合中，气象-水文系统耦合度最大，达到了 0.933，相互影响作用程度最强，说明气象-水文系统存在紧密的关系，是一个高度相互作用的系统，气象和水文系统之间存在反馈机制，如局地气象条件(如降水模式)会影响水文系统的状态(如河流流量和土壤湿度等)；其次是社会经济-生态系统，二者耦合度为 0.795，社会经济系统和生态系统是一个相互依赖、互相影响的复杂系统，良好的生态环境是实现经济可持续发展的基础，而经济活动的可持续性也依赖于对生态系统的保护和合理利用。在三系统耦合中，气象-水文-生态系统的耦合度最大，为 0.688，究其原因是自然条件与生态环境之间存在着相互调节的关系，同时也符合气象-水文系统联系最为紧密的观点；气象-水文-工程系统之间的作用强度次之，说明这三系统间也存在着高度互联性和相互依赖关系。四系统中气象-水文-社会经济-生态的耦合关系也呈现高强度耦合状态。在整体水资源系统中，5 个子系统的耦合强度也较高，达到了 0.551，说明随着环境变化和人类活动对水资源系统影响的日益加深，各子系统因素间交互作用强度也随之加强，整体水资源系统的耦合强度较高。

3.4 水资源系统韧性的主要驱动因素识别

(1)影响因素选取。流域水资源系统韧性变化是一个持续且复杂的动态过程，其发展水平受诸多因素的影响，为探究自然因素与社会经济因素对水资源系统韧性的影响，从本文选取的 25 个指标中探究主要驱动因素，采用随机森林模型计算指标的重要程度，从指标体系的 5 个准则层中各选取 2 个重要程度最高的指标作为主要影响因素用于地理探测，见表 2 中带*号的指标。

(2)因素探测结果及分析。利用地理探测器研究各因素对水资源系统韧性的影响程度。由于地理探测器模型要求探测因素(自变量)不能使用连续性变量，因此使用自然断点分级法对探测因素进行四级分类，基于地理探测器计算得到 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年、2022 年各影响因素对水资源系统韧性的影响程度，单因素探测结果如表 4 所示。

表 4　汾河流域水资源系统韧性单因素探测结果

Table 4　Single factor detection results of resilience of water resource systems in Fenhe River basin

影响因素	2010年		2013年		2016年		2019年		2022年		均值	
	q值	排名	q值	排名	q值	排名	q值	排名	q值	排名	q值	排名
X_1	0.998	1	0.988	1	0.582	2	0.995	1	0.498	7	0.812	1
X_2	0.253	8	0.317	7	0.432	7	0.429	8	0.957	1	0.478	7
X_5	0.400	6	0.880	3	0.223	9	0.495	7	0.087	9	0.417	9
X_6	0.810	5	0.891	2	0.493	6	0.904	4	0.930	2	0.806	2
X_8	0.327	7	0.839	5	0.964	1	0.927	3	0.807	3	0.773	3
X_{15}	0.836	2	0.429	6	0.566	3	0.539	6	0.615	6	0.597	5
X_{17}	0.815	4	0.849	4	0.549	4	0.902	5	0.742	4	0.771	4
X_{19}	0.220	9	0.165	8	0.432	7	0.973	2	0.665	5	0.491	6
X_{22}	0.836	2	0.145	9	0.549	4	0.317	9	0.295	8	0.428	8

基于汾河流域水资源系统韧性探测结果(表 4)，通过对比各年份的影响因素解释度 q 值可以看出，各因素对水资源系统韧性的影响程度在不同历史时期存在差异，说明水资源系统韧性是一个不断演化的过程，在不同阶段受到气候变化及人类活动的影响，其主要驱动因素也有所不同。

由表 4 可知，主要驱动因素为 X_1(年降水量)＞X_6(地表水资源量)＞X_8(城镇化水平)＞X_{17}(森林覆盖率)＞X_{15}(人均供水量)。其中，X_1(年降水量)q 值 5 a 均值排在第 1 位，说明降水量对水资源系统韧性的影响较大，降水量是决定水资源总量的最直接因素，反映区域内的水资源禀赋，降水量多，水源丰盈，自然水体补给充足，有助于维持水资源系统的平衡和稳定，降水量的变化直接影响到流域的水资源量变化，对水资源系统韧性起着主导作用；X_6(地表水资源量)q 值排在第 2 位，地表水包括河流、湖泊等水体，其量的变化直接反映了水资源的实际可利用量，地表水的丰盈程度影响水资源的稳定性及其应对干旱或洪水等极端气候事件的能力；X_8(城镇化水平)q 值排在第 3 位，一般来说城镇化水平越高，城市的基础设施越完善，如水库、输水管网、污水处理厂等，这些基础设施的建设能够保证水资源系统在面对各种冲击时保持区域稳定发展；X_{17}(森林覆盖率)q 值为第 4 位，森林覆盖率影响水土保持和水循环，有效减少径流，增加地下水补给，改善水质，对水资源系统韧性有积极作用；X_{15}(人均供水量)q 值 5 a 均值为 0.597，排在第 5 位，汾河流域水资源较为缺乏，在极端枯水情况下，减少人均供水量，对水资源进行合理分配，有利于缓解水资源系统的压力。

(3)交互作用探测结果及分析。地理探测器模型不仅能够定量分析各驱动因素的影响程度，还能探究驱动因素之间的交互作用强度。水资源系统韧性受到多因素共同作用，因此，利用地理探测器中交互作用探测器探究双因素共同作用时对水资源系统韧性的解释力变化，以及它们之间是否存在相互独立的影响。交互探测作用结果如图 6(图中数值为因子解释度)所示。

由图 6 可知，不同驱动因素交互作用的影响力均大于单因素单独作用时的影响力，且作用效果表现为双因素增强以及非线性增加，不存在相互独立的因素。不同因素两两组合交互作用对水资源系统韧性产生的

影响高于任意单因素的影响力，即研究区水资源系统韧性水平变化是多种因素相互作用而形成的结果，这与已有研究证实的水资源系统韧性受到多种影响因素共同作用的结论一致。非线性增强类型由 2010 年的 5 组，增加至 2022 年的 7 组，双因素增强减少了 2 组，表明各影响因素之间交互作用日趋复杂、多因素共同作用趋势凸显。以 2022 年交互作用探测结果为例，X_1(年降水量)与 X_5(人均水资源量)、X_{22}(引调水)交互作用表现为非线性增强。年降水量是决定区域水资源量多寡的根本要素，在水资源系统中，年降水量对人均水资源量存在着直接显著的影响，降水量直接关系到河水、湖泊、地下水的补给量，进而影响人均水资源量；同时降水量和引调水量间存在反馈调节机制，年降水量的变化会直接影响区域水资源可利用量，当降水量时空分布不均导致水资源短缺时，会通过引调水工程进行调水以弥补水资源短缺，两者紧密相连、相互影响，导致发生交互作用时产生了非线性增强的效应。X_5(人均水资源量)与 X_8(城镇化水平)、X_{17}(森林覆盖率)、X_{19}(生态用水量)、X_{22}(引调水)、X_{24}(非常规水)发生交互作用后对水资源系统韧性水平空间分异的解释力明显高于其他绝大多数因素交互作用，这意味着人均水资源量与这些变量的组合对水资源系统韧性的影响非常显著，且存在复杂的非线性关系，在水资源系统复杂网络中，要素条件的改变将带动水资源系统显著的连锁反应，带来复杂的反馈效应。例如，城镇化水平的提升不仅会增加对水资源的需求，还可能通过改变土地利用模式影响水资源的可用性；森林覆盖率的变化也会影响水资源的涵养和流动模式，这种影响与人均水资源量的变化表现为非线性增强。同时也说明了水资源系统韧性本身具有多维度相互交织的复杂非线性特征，在多维度中形成了紧密联系又相互影响的复杂网络系统。而 X_5(人均水资源量)与 X_{15}(人均供水量)交互探测值较低为 0.698，主要原因是 X_5(人均水资源量)与 X_{15}(人均供水量)这 2 个指标属性重叠度较高，相似性较大，具有较强的线性关系，导致它们的交互作用对水资源系统韧性的影响较小。

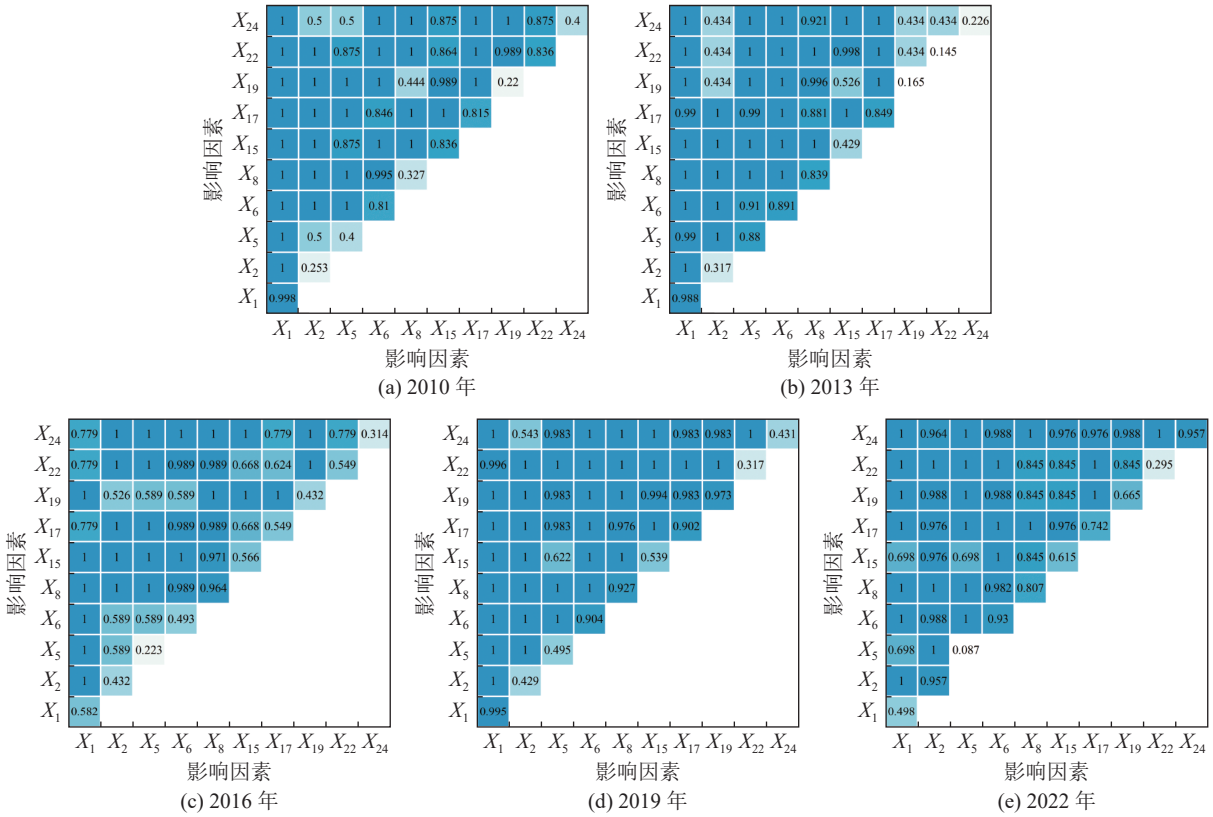

图 6 2010—2022 年交互作用探测结果

Fig. 6 Interaction detection results from 2010 to 2022

4 结　　论

本文基于水资源系统韧性复杂网络的角度，构建“气象-水文-社会经济-生态-工程”五维水资源系统韧性评价指标体系，采用系统动力学方法建立各子系统之间的因果关系网络，厘清各因素变量之间的逻辑关系，建立整体与各组成元素相协调的机制，明确反映水资源系统内部、外部因素之间的相互关系。选取汾河流域 2010 年、2013 年、2016 年、2019 年、2022 年的数据作为样本，通过耦合度模型分析各系统之间的相互作用强度，并采用随机森林算法计算指标因素重要性，从 5 个子系统中各选取 2 个重要程度最高的指标作为主要影响因素用于地理探测，采用地理探测器厘清影响水资源系统韧性的驱动机理，明晰不同因素对韧性的影响程度及作用关系。主要结论如下：

（1）水资源系统韧性具有复杂网络特征，水资源系统韧性子系统间存在较高强度的耦合关系，各子系统间的作用程度显著，其中气象子系统和水文子系统的耦合度最大，达到了 0.933，相互影响作用程度最强；其次是社会经济子系统和生态系统子系统，二者耦合度为 0.795。

（2）因素探测结果表明，在 2010—2022 年间汾河流域水资源系统韧性驱动因素的影响强度存在差异，年降水量、地表水资源量、城镇化水平、森林覆盖率、人均供水量等因素成为影响汾河流域韧性变化的主导驱动力，其中年降水量的驱动力最强，为 0.812。

（3）交互作用探测结果表明，不同驱动因素交互作用的影响力均大于单因素单独作用时的影响力，作用效果表现为双因素增强以及非线性增加，且各影响因素之间交互作用日趋复杂、多因素共同作用趋势凸显。

参考文献：

[1] 张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略 [J]. 中国水利，2022(15)：3-5，14.（ZHANG J Y. Impacts of climate change on national water security and mitigation strategies[J]. China Water Resources，2022(15)：3-5，14.（in Chinese））

[2] 赵勇，黄可静，高学睿，等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价 [J]. 水资源保护，2022，38(4)：39-47.（ZHAO Y，HUANG K J，GAO X R，et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River basin[J]. Water Resources Protection，2022，38(4)：39-47.（in Chinese））

[3] 金菊良，陈梦璐，郦建强，等. 水资源承载力预警研究进展 [J]. 水科学进展，2018，29(4)：583-596.（JIN J L，CHEN M L，LI J Q，et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity[J]. Advances in Water Science，2018，29(4)：583-596.（in Chinese））

[4] CHAUHAN T，CHANDEL V，GHOSH S. Global land drought hubs confounded by teleconnection hotspots in equatorial oceans[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science，2024，7：15.

[5] 郝增超，陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望 [J]. 中国科学：地球科学，2024，54(2)：360-393.（HAO Z C，CHEN Y. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the earth system perspective[J]. SCIENTIA SINICA Terrae，2024，54(2)：360-393.（in Chinese））

[6] 王煜，彭少明，郑小康，等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题 [J]. 水科学进展，2024，35(1)：11-23.（WANG Y，PENG S M，ZHENG X K，et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River basin under the layout of water network[J]. Advances in Water Science，2024，35(1)：11-23.（in Chinese））

[7] BATTISTON F，AMICO E，BARRAT A，et al. The physics of higher-order interactions in complex systems[J]. Nature Physics，2021，17(10)：1093-1098.

[8] HALL J W，BORGOMEO E，BRUCE A，et al. Resilience of water resource systems：lessons from England[J]. Water Security，2019，8：100052.

[9] BEHBOUDIAN M，KERACHIAN R，POURMOGHIM P. Evaluating the long-term resilience of water resources systems：application of a generalized grade-based combination approach[J]. Science of the Total Environment，2021，786：147447.

[10] 周申蓓，汪心愿，童建. 基于 PSR 模型的长江流域水资源系统韧性分析 [J]. 水利经济，2023，41(3)：23-28，57，123-124.（ZHOU S B，WANG X Y，TONG J. Resilience analysis of water resources system of the Yangtze River basin based on pressure-state-response model[J]. Journal of Economics of Water Resources，2023，41(3)：23-28，57，123-124.(in Chinese)）

[11] 赵自阳，王红瑞，张力，等. 长江经济带水资源-水环境-社会经济复杂系统韧性调控模型及应用 [J]. 水科学进展，2022，33(5)：705-717.（ZHAO Z Y，WANG H R，ZHANG L，et al. Construction and application of resilience evaluation model of water resources-water environment-social economy complex system in the Yangtze River Economic Belt[J]. Advances in Water Science，2022，33(5)：705-717.(in Chinese)）

[12] 何伟军，李佳琪，袁亮. 时空异质性视角下长江经济带水资源系统韧性评估及调控因子分析 [J]. 水资源与水工程学报，2024，35(3)：29-39，50.(HE W J，LI J Q，YUAN L. Resilience assessment of water resources system and analysis of regulatory factors in the Yangtze River Economic Belt from the perspective of spatio-temporal heterogeneity[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2024，35(3)：29-39，50.(in Chinese)）

[13] 陈宇昕，刘永超，应超，等. 长江三角洲地区海岸带韧性时空特征及驱动因子分析 [J]. 海洋通报，2024，43(6)：809-823.（CHEN Y X，LIU Y C，YING C，et al. Spatio-temporal characterization of coastal resilience in the Yangtze River Delta region and analysis of driving factors[J]. Marine Science Bulletin，2024，43(6)：809-823.(in Chinese)）

[14] CHENG X，LONG R Y，CHEN H，et al. Coupling coordination degree and spatial dynamic evolution of a regional green competitiveness system：a case study from China[J]. Ecological Indicators，2019，104：489-500.

[15] HAN H，GUO L，ZHANG J Q，et al. Spatiotemporal analysis of the coordination of economic development，resource utilization，and environmental quality in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Ecological Indicators，2021，127：107724.

[16] CONSTAS M A，MATTIOLI L，RUSSO L. What does resilience imply for development practice? Tools for more coherent programming and evaluation of resilience[J]. Development Policy Review，2021，39(4)：588-603.

[17] 李静文，李振涵，吴海滨，等. 汾河流域水资源承载力评估及生态敏感性分析 [J]. 环境工程学报，2024，18(2)：359-370.(LI J W，LI Z H，WU H B，et al. Carrying capacity of water resources assessment and ecological sensitivity analysis in Fen River basin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2024，18(2)：359-370.(in Chinese)）

[18] 钞锦龙，李乐乐，杨朔，等. 汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究 [J]. 地理科学，2022，42(3)：487-496.(CHAO J L，LI L L，YANG S，et al. Coupling and coordination relationship between urbanization and water resources in the Fenhe River basin[J]. Scientia Geographica Sinica，2022，42(3)：487-496.(in Chinese)）

[19] 万芳，王煜，王威浩，等. 水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响 [J]. 水资源保护，2025，41(1)：19-26.(WAN F，WANG Y，WANG W H，et al. Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River basin[J]. Water Resources Protection，2025，41(1)：19-26.(in Chinese)）

[20] 左其亭，张志卓，吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价 [J]. 水资源保护，2020，36(2)：1-7.(ZUO Q T，ZHANG Z Z，WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection，2020，36(2)：1-7.(in Chinese)）

[21] 张鹏，冯柯. 基于组合赋权-TOPSIS 模型的防空重点保卫目标优选 [J]. 系统仿真学报，2024，36(11)：2644-2653.(ZHANG P，FENG K. Optimization of crucial targets for air defense based on combined weighting-TOPSIS model[J]. Journal of System Simulation，2024，36(11)：2644-2653.(in Chinese)）

[22] 陈吉臻，沈琛琛，樊子豪，等. 三峡库区柑橘园土壤有机碳关键影响因子分析 [J]. 长江流域资源与环境，2024，33(11)：2440-2450.（CHEN J Z，SHEN C C，FAN Z H，et al. Influencing factors of soil organic carbon in citrus orchard in the Three Gorges Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2024，33(11)：2440-2450.(in Chinese)）

[23] 王劲峰，徐成东. 地理探测器：原理与展望 [J]. 地理学报，2017，72(1)：116-134.(WANG J F，XU C D. Geodetector：principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica，2017，72(1)：116-134.(in Chinese)）

[24] 梁康，公丽，宋小青，等. 黄河水源涵养区土地利用变化的区域分异特征及未来格局 [J]. 水科学进展，2024，35(2)：325-337.(LIANG K，GONG L，SONG X Q，et al. Regional differentiation and future patterns of land use changes in the water conservation zone of the Yellow River[J]. Advances in Water Science，2024，35(2)：325-337.(in Chinese)）

[25] 邹美靓，刘洛，王璐，等. 广东省耕地资源承载力时空演变及其驱动机理研究 [J]. 西南农业学报，2023，36(8)：1573-1583.

（ZOU M L，LIU L，WANG L，et al. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of cultivated land resources carrying capacity in Guangdong Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2023，36(8)：1573-1583.（in Chinese））

Complex network characteristics and resilience-driving mechanisms of water resource systems in river basin*

WANG Yu[1,2]，WAN Fang[3,4]，WANG Weihao[5,6]，HAN Wenhao[3]，ZHENG Xiaokang[1]，ZHANG Di[1]，LYU Hong[1]

（1. *Yellow River Engineering Consulting Co.，Ltd. Zhengzhou* 450003，*China*；2. *Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources*，*Zhengzhou* 450003，*China*；3. *School of Water Resources*，*North China University of Water Resources and Electric Power*，*Zhengzhou* 450046，*China*；4. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*，*Nanjing Hydraulic Research Institute*，*Nanjing* 210029，*China*；5. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*，*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing* 100038，*China*；6. *Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources*，*Beijing* 100038，*China*）

Abstract：This study addresses the demand for risk management of flood and drought disasters and reveals the complex network characteristics and resilience-driving mechanisms in water resource systems. Specifically，a five-dimensional，i.e.，'meteorology-hydrology-socioeconomic-ecology-engineering' water resource system resilience evaluation index is developed，which is applied to the Fenhe River basin，acting as the research object. Furthermore，this work quantitatively analyzes the interaction intensity between systems and their resilience-driving mechanisms by establishing a causality network of subsystems to clarify the logical relationships among elements and comprehensively employing the coupling degree model and the geographical detector method. The research findings are: ① The water resource system exhibits distinct complex network characteristics，with high-intensity coupling relationships among its subsystems. Among them，the coupling degree between meteorological subsystem and hydrological subsystem is the highest (0.933). ② In the series of 2010—2022，annual precipitation，surface water resources，urbanization level，forest cover and per capita water supply were the dominant drivers of water resource systems resilience in the Fenhe River basin. Among them，the annual precipitation driver is the strongest (0.812). ③ The interactive effects among different driving factors are consistently more significant than the individual effects of single factors. Notably，the interactions among various influencing factors have become increasingly complex，with multifactorial synergies becoming more pronounced. Exploring the complex network characteristics of water resource systems and revealing the resilience-driving mechanisms in water resource systems are of great significance for reducing disaster risk，optimizing the spatial and temporal pattern of water resources allocation and supporting the high development quality of the basin.

Key words：water resource systems；the resilience-driving mechanisms；the complex network；the Fenhe River basin

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No.2022YFC3202300) and the National Natural Science Foundation of China (No.52479014).