

水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响

万芳^{1,2}, 王煜³, 王威浩⁴, 郑小康⁵, 韩文浩¹, 严登明⁵, 张迪⁵

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 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; 3. 水利部黄河水利委员会, 河南 郑州 450003; 4. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038; 5. 黄河勘测规划设计研究院有限公司规划研究院, 河南 郑州 450003)

摘要:为研究水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响, 针对汾河流域水资源系统韧性在系统、空间、时间维度上的不断演化发展, 考虑到水资源系统韧性对初始条件的敏感依赖性以及韧性的非线性和不可预测性等特征符合混沌理论的主要特征, 基于混沌理论构建了水资源系统韧性评价模型, 分析了 2017—2021 年汾河流域水资源系统韧性时空演变特征, 分别以 2020 年、2035 年为基准年和水平年, 探究了 2035 年有、无水网情况下, 汾河流域水资源系统韧性水平的变化情况。结果表明: 2017—2020 年汾河流域水资源系统韧性水平波动较小, 总体呈现上升趋势, 且表现为西部高于东部、北部高于南部的空间分布特征, 2021 年水资源系统韧性水平有所下降; 相较于基准年, 无水网情况下 2035 年流域和各地区水资源系统韧性水平均有不同程度的下降; 有水网情况下 2035 年流域水资源系统韧性水平相较于无水网情况有大幅度提升, 各地区消除了低韧性水平, 水网构建对流域水资源系统韧性的提升效果显著。

关键词:水资源系统韧性; 水网构建; 混沌理论; 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:**1004-6933(2025)01-0019-08

Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin//
WAN Fang^{1,2}, WANG Yu³, WANG Weihao⁴, ZHENG Xiaokang⁵, HAN Wenhao¹, YAN Dengming⁵, ZHANG Di⁵
(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 4. Department of
Water Ecology and Environment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038,
China; 5. Planning and Research Institute, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the water network construction influences on the water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin, and in consideration of the continuous evolution of the water resources system resilience in the systemic, spatial, and temporal dimensions, as well as the sensitive dependence of the water resources system resilience on initial conditions and the nonlinearity and unpredictability of the resilience that conform to the main characteristics of the chaos theory, a water resources system resilience evaluation model was developed based on the chaos theory. The spatiotemporal evolution characteristics of the water resources system resilience in the Fenhe River Basin from 2017 to 2021 were studied. With 2020 and 2035 taken as the base year and level year, respectively, the resilience level of the water resources system in the Fenhe River Basin with and without water network in 2035 was explored. The results show that the resilience level of the water resources system in the Fenhe River Basin fluctuated little from 2017 to 2020, showing an overall upward trend, with the water resources system resilience in the west and the north being higher than that in the east and the south, and the resilience level of the water resources system decreased in 2021. Compared with the base year, the resilience level of the water resources system in the Fenhe River Basin and different sub-regions will decrease to different degrees in 2035 without water network. In the case of a water network, the resilience level of the water resources system in the river basin in 2035 will be greatly improved, and the low resilience level will be eliminated in all sub-regions. Therefore, the construction of the water network will significantly improve the water resources system resilience in the river basin.

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); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2023nkzd02); 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹)研究基金项目(2023-SYSJJ-05)
作者简介:万芳(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水旱灾害防御与水资源优化配置研究。E-mail: wanxf1023@163.com
通信作者:王煜(1968—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利规划与水文水资源研究。E-mail: happytimes@126.com

水资源系统韧性指在综合考虑气象、水文、经济发展、社会保障、生态环境、基础设施、优化调配等特征的基础上,实现流域(区域)合理发展,提高水资源系统抵抗未来不确定性和可持续发展的能力。水资源短缺和水生态环境恶化导致流域水资源供需矛盾日益加剧,为应对全球气候变化,在水资源竞争使用过程中需要对水资源系统进行调整,降低其脆弱性或增强其韧性^[1]。国家“十四五”规划指出,扎实推进黄河流域生态保护和高质量发展,注重优化流域发展格局。在此背景下,韧性发展成为黄河流域发展的重要方向。目前对韧性的定量评估及演变分析是相关领域的前沿科学问题之一。科学认识水资源系统韧性,发展有效、系统的水安全保障技术,已经成为区域高质量发展过程中的重要科技支撑。

国内外学者在韧性指标量化和评估方法方面已形成初步框架。Kharraz 等^[2]利用生态网络分析(ecological network analysis, ENA)方法评估了黑河流域生态系统服务恢复力,并提出了两种假设的替代方案,以提高水系的长期健康和韧性;孙才志等^[3]以辽宁省下辽河平原为例,利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和 GIS 技术评价了地下水系统的韧性水平;陈燕飞等^[4]采用改进层次分析法的可变模糊识别模型对汉江流域中下游水环境韧性进行了评价。上述韧性评估方法虽然取得了一定的进展,但也存在一些不足。ENA 方法缺乏统一的系统边界划分规则,在复杂非线性和非稳态系统中并不适用;AHP 法受主观因素的影响大;可变模糊识别模型未能考虑指标间相关性对评价结果的影响。为克服上述韧性评估方法的不足,周申蓓等^[5]基于“压力-状态-响应”模型建立了韧性评价指标体系,利用熵权法计算各指标的权重,将各指标层的总得分作为韧性量化值;Yang 等^[6]通过分析流域系统脆弱性因子表征水资源系统韧性,进而以因子的恢复能力衡量系统的可持续性;夏军等^[7]基于环境变化对水资源暴露度、敏感性、抗压性以及水旱灾害的影响,建立了水资源脆弱性评价模型,对海河流域水资源脆弱性进行了定量分析研究;薛晴等^[8]根据江苏省水资源开发利用特点和“三条红线”管控政策,将江苏省水资源系统评价指标体系划分为水资源、水环境和经济社会 3 个子系统对水资源系统韧性进行评价;Nathwani 等^[9]将“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型与 ENA 相结合,构建指标体系对生态安全系统韧性进行评估;Liang 等^[10]结合韧性

理论和联合国可持续发展目标,探索了沿海韧性演化的核心机制。目前构建不同要素、过程和尺度相结合的指标体系正逐渐成为评价系统韧性的新趋势。综合国内外研究进展,指标体系法从多角度考虑水资源系统韧性,涉及属性较多,易于从综合角度反映水资源韧性,但多因素综合后指标间关系模糊,会掩盖单因素的影响和因素间相互作用的变化,难以客观反映因素之间存在的相互依赖且相互制约的关系,影响评价结果的合理性和准确性。混沌理论是非线性领域的研究热点,通常用来描述混乱但不完全随机的状态,主要应用在混沌动力学系统、电力系统等领域^[11-12]。水资源系统韧性的复杂网络特征与混沌理论的主要特征相契合,其从系统维度到空间维度和时间维度的传播过程呈现非线性特点,对系统维度即初始条件具有敏感依赖性,且韧性发展状态及水平不可预测。

本文以汾河流域为研究对象,尝试利用混沌理论构建水资源系统韧性评估模型,开展水网构建背景下水资源系统韧性评估,分析流域韧性演变规律,定量研究水网构建^[13]对流域水资源系统韧性的提升作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

汾河是黄河第二大支流,位于 35°20'N~39°N、110°30'E~113°32'E,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 市的 41 个县(市、区),如图 1 所示。汾河干流全长约 710 km,流域面积为 39 741 km²,海拔 351~2 791 m。汾河流域是山西省乃至全国重要的水源地和生态保护区,其水资源、水环境、水生态、水灾害问题较为突出,是山西省防洪和生态修复重

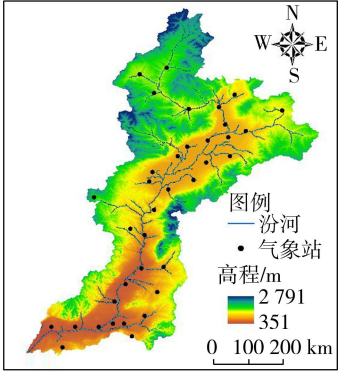


图 1 汾河流域水系及气象站位置分布
Fig. 1 Distribution of water system and meteorological stations in the Fenhe River Basin

点流域。

流域属于中纬度温带大陆性季风气候,年均气温8~14℃,年降水量400~550 mm,降水年际变化大,主要集中在夏季且年内分配不均,汛期(6—9月)降水量约占全年的60%,易发生旱涝灾害。流域年实际蒸发量为300~500 mm,年潜在蒸发量为1400~1600 mm。汾河流域是山西省人口最为密集的区域,是山西省工农业产业的集中区域,工业产值占全省的46%,农业产值占全省的64%,沿岸地区每年从汾河取水24.3亿m³,占全省水资源利用总量的46%。

汾河流域水资源供需矛盾突出,生活及工业用水紧缺,农业灌溉保障程度低。为解决汾河水源供水不足问题,先后在汾河上游和下游兴建了2处跨流域引水工程,即上游万家寨引黄入晋工程和下游临汾马房沟引沁入汾工程。共建成大型水库3座,即汾河水库、汾河二库和文峪河水库,另有中型水库13座、小型水库50座,总控制流域面积为17665 km²,占总流域面积的45%,总库容为15.81亿m³。

1.2 数据来源

收集整理汾河流域36个水文站的降水资料和逐日径流序列数据,建立了汾河流域1958—2021年基础数据与信息库,主要数据类型包括气象、水文、供水数据和地貌及下垫面等的遥感影像,以及流域经济社会、水网建设信息等,资料来源于黄河水利委员会及《黄河流域水文年鉴》等,如表1所示。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、管理等,用于构建水资源系统韧性指标体系。

2 水资源系统韧性评价模型

2.1 水资源系统韧性的混沌特性

复杂网络作为一种有机体系的表示方式,被广泛运用于自然科学、社会科学和计算机科学等领域^[14]。复杂网络由许多互相关联的节点和边构成,从统计角度考察网络中大规模节点及其连接之间的性质,可以发现不同的网络内部结构将导致系统功能有所差异。水资源系统的复杂性决定了水资源系统韧性的复杂非线性特征。在水资源系统中,复杂网络结构无处不在^[13],如气象与降水网络、降水与径流网络、人与人之间的社会网络、水资源供需网络、用水部门间的博弈网络、需水与可供水量之间的动态均衡网络、基础设施与用户之间的循环网络等。在水资源系统中,将每个主体或因素看作是一个节点,将因素之间的博弈规则看作连接节点的边,便构成了一个网络。

水资源系统韧性具有多维度相互交织、动态传递和非线性特征,形成在系统、空间、时间维度上紧密联系又相互影响的复杂网络。水资源系统韧性的主要影响因素及扰动存在差异。系统维度上,水资源系统韧性主要受气候变化、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韧性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可持续发展的重要因素。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,其改变可能由于受到大旱、极端天气等大扰动导致的急性冲击,也可能由于经济发展、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,从而导致系统处于崩溃状态。综合来看,水资源系统本身的复杂性决定了水资源系统韧性的混沌特征。某一维度或节点发生风险,将在复杂网络中产生连

表 1 数据类型及来源		
Table 1 Data types and sources		
数据类型	数据描述	数据来源
气象水文数据	降水量(日降水量、年降水量)、温度(日平均温度、日最高温度、日最低温度)、风速、湿度、日照时数、潜在蒸散发等	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)、国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
社会经济数据	人均GDP、人口数量、万元GDP用水量等	《统计年鉴》《中国城市统计年鉴》、中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/DOI/doiList.aspx)
水利工程数据	汾河流域水库库容、蓄水量、调水量等	《统计年鉴》《水资源公报》《水利统计年鉴》
供用水数据	工农业用水、居民生活用水、生态用水、地表水供水、地下水供水、污水回用等	《水资源公报》、1971—2010年全球网格化月度部门用水数据集(https://zenodo.org/record/1209296#.Ygym1eh7rZR)
土地利用类型	耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类栅格数据	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/DOI/doiList.aspx)
土壤数据	土壤深度和砂粒、粉砂粒、黏粒、土壤有机质含量等	联合国粮农组织(http://data.fao.org/map?entryId=ce0c9967-471d-9a2e-3dbc28683ba3)
GIS数据	汾河流域DEM数据、山西省边界、汾河流域边界数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)、国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/ngcc/)

锁反应,可能导致风险在整个系统中传导和扩散,引发水资源供需失衡,从而导致水危机,降低水资源系统韧性水平。水资源系统韧性的复杂网络在系统维度上包括气象水文网络、经济社会网络、基础设施网络,网络中的要素是水资源系统韧性在空间和时间维度上产生变化的驱动因素^[15]。

水资源系统韧性复杂网络是由自然、社会经济和人类活动构成的空间体系与组织体系,其特性与混沌理论主要特征相契合。水资源系统韧性具有以下特点:①韧性演变和传播过程呈现非线性,对初始条件具有敏感依赖性,韧性发展状态及水平不可预测,具有不确定性;②复杂网络中各因子相互嵌套、相互作用形成了混沌景象,各因子相互交织的功能布局体现出水资源系统韧性的自身特质;③复杂网络中的内部要素存在多样性,可避免要素同质化导致的水资源系统脆弱甚至崩溃的现象。水资源系统韧性的复杂网络环境构成了一个混沌系统,其韧性演变呈现为由有序到无序再到新的有序的反复循环过程。运用混沌理论分析有助于更加清晰地理解水资源系统韧性复杂网络中的内在相互作用和水资源系统韧性的发展规律。

2.2 水资源系统韧性评价指标体系

本文应用混沌理论探究水资源系统韧性的演变和传播特征以及韧性水平。水资源系统韧性评价指标体系如图 2 所示,图中(*)表示正向指标,其他为负向指标。气象水文网络评价指标包括流域平均降水量、流域平均气温、水资源总量;经济社会网络评价指标包括河流生态用水占比、人均用水量、万元 GDP 用水量、人均 GDP;基础设施网络评价指标包括水库供水量、引调水供水量、地下水利用量、非常规水供水量。通过考虑多个网络之间的耦合作用和不同网络的评价指标,深度挖掘复杂水资源系统各方面特点及互动关系,可以从微观到宏观层面较为

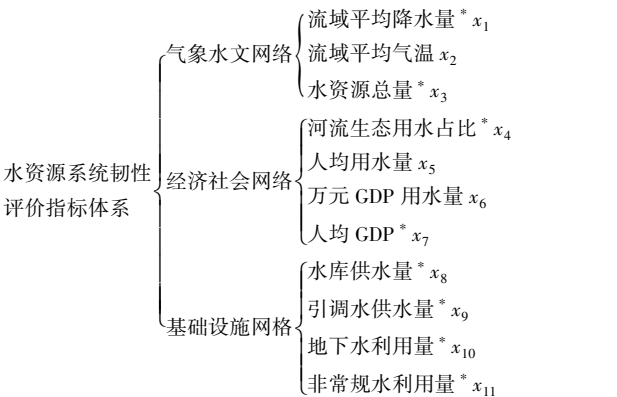


图 2 水资源系统韧性评价指标体系

Fig. 2 Water resources system resilience evaluation index system

全面地评估水资源系统的韧性^[16]。

2.3 水资源系统韧性评价模型

流域多个区域的水资源系统韧性评价属于多属性决策问题,本文选用多准则决策相关方法构建水资源系统韧性评价模型,其中,多准则妥协解排序法(VlseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR)采用了由 Lp-metric 发展而来的聚合函数,其优点是最大化群体效益和最小化个别遗憾,其妥协解可被决策者接受。该方法通过对折衷排序值的异常性进行检测,挖掘主要调控方向及相应指标,从而实现水资源系统韧性的评价与调控分析。相对于传统的方法,该方法在一定程度上提升了评价的客观性。本文采用 VIKOR 法对气象水文网络、经济社会网络、基础设施网络的综合评价价值进行度量,具体量化步骤如下:

步骤 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评价指标的权重:

$$w_j = k_1 w_{ij} + k_2 w_{2j} \tag{1}$$

式中: $w_j(j=1,2,\cdots,n)$ 为第 j 个指标的组合权重; n 为指标数; w_{ij} 、 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 $k_1=k_2=0.5$ 。

步骤 2 确定区域各指标的正理想解与负理想解:

$$\begin{cases} X_j^+ = \max_i x'_{ij} \\ X_j^- = \min_i x'_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

式中: X_j^+ 、 X_j^- 分别为第 j 个指标的正理想解和负理想解; $x'_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 为对指标 x_{ij} 进行标准化处理后的值; m 为年份数。

步骤 3 确定区域不同年份的群体效用值和个体遗憾值:

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{X_j^+ - x'_{ij}}{X_j^+ - X_j^-} \tag{3}$$

$$R_i = \max_j \frac{X_j^+ - x'_{ij}}{X_j^+ - X_j^-} \tag{4}$$

式中 U_i 、 R_i 分别为第 i 年群体效用值和个体遗憾值。

步骤 4 确定区域不同年份的折衷值,并计算系统维度上各网络的综合评价价值:

$$Z_i = v \frac{U_i - U^-}{U^+ - U^-} + (1 - v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \tag{5}$$

$$F_i = 1 - Z_i \tag{6}$$

其中 $U^+ = \max_i U_i$ $U^- = \min_i U_i$
 $R^+ = \max_i R_i$ $R^- = \min_i R_i$

式中: Z_i 为第 i 年折衷值; F_i 为第 i 年系统维度上各网络的综合评价价值; v 为决策系数, 用于控制决策结果偏向群体效用还是个体遗憾的权重, v 越大, 结果越偏向群体效用, 反之越偏向个体遗憾, 一般取 $v = 0.5$, 即取折中方案。

多元 Logistic 回归模型是一种可以用来研究多分类变量与其影响因子之间关系的非线性回归模型。鉴于水资源系统韧性的复杂网络可视作混沌系统, 本文采用多元 Logistic 回归模型计算不同年份水资源系统韧性水平:

$$S_i = \{1 + \exp[-(\alpha + \beta_1 F_{i1} + \beta_2 F_{i2} + \beta_3 F_{i3})]\}^{-1} \quad (7)$$

式中: S_i 为第 i 年水资源系统韧性水平, S_i 值的范围为 $0 \sim 1$, 值越大表示水资源系统韧性水平越高; F_{i1} 、 F_{i2} 、 F_{i3} 分别为第 i 年气象水文网络、经济社会网络、基础设施网络的综合评价价值; α 、 β_1 、 β_2 、 β_3 为回归模型的参数。

基于 ArcGIS 软件中自然断点法将水资源系统韧性水平划分为高韧性水平、较高韧性水平、较低韧性水平、低韧性水平 4 个等级, 对应的水资源系统韧性水平值分别为 $>0.70 \sim 1$ 、 $>0.55 \sim 0.70$ 、 $>0.40 \sim 0.55$ 、 $0 \sim 0.40$ 。

基于系统维度上各网络的综合评价价值 F_{ik} ($k = 1, 2, 3$), 采用最大熵估计法确定 Logistic 回归模型的参数, 可建立最优化模型^[17-18]:

$$\max H_i = -C \left\{ \frac{\alpha + \sum_{k=1}^3 \beta_k F_{ik}}{1 + \exp[-(\alpha + \sum_{k=1}^3 \beta_k F_{ik})]} - \ln \left[1 + \exp \left(\alpha + \sum_{k=1}^3 \beta_k F_{ik} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中: H_i 为第 i 年水资源系统韧性的不确定性程度, 即熵值; C 为正实数, 确定方法见文献[19]。

应用基于免疫进化的粒子群算法不断迭代求解上述最优化模型即可获得最优参数^[20]。由于使 H_i 达到最大的参数组合并不唯一, 为了得到模型的最优参数, 利用 K-S 检验判断模型的拟合优度。K-S 统计量的范围为 $0 \sim 1$, 其值越高, 水资源韧性评价模型越优。

3 结果与分析

3.1 水资源系统韧性评价结果及时空演变特征

利用汾河流域 2017—2021 年水资源系统韧性在系统维度上的气象水文网络、经济社会网络、基础设施网络的综合评价价值对 Logistic 回归模型的参数进行估计, 以极大似然估计法得到的参数结果作为最大熵估计的初始值, 得到 α 、 β_1 、 β_2 、 β_3 分别为

-2.36 、 1.72 、 3.03 、 1.66 , 将参数 α 、 β_1 、 β_2 、 β_3 代入方程(7), 可得到不同年份水资源系统韧性评价模型。

K-S 统计量为 0.874 , 说明水资源韧性评价模型较优。基于式(7)对汾河流域具有多链路和混沌特征的水资源系统韧性进行动态测度, 汾河流域及 6 个地区 2017—2021 年水资源韧性水平如图 3 所示。

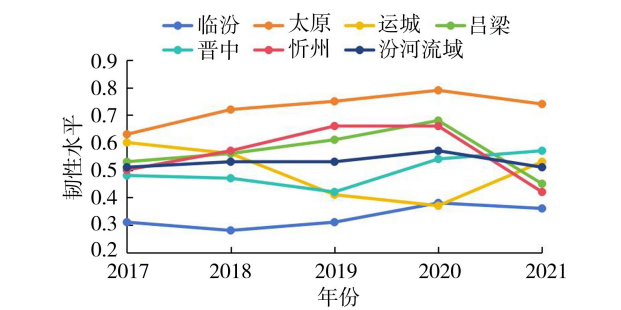


图 3 汾河流域及各地区水资源系统韧性水平变化
Fig. 3 Changes of water resources system resilience level in the Fenhe River Basin and different regions

从图 3 可以看出, 2020 年各地区水资源系统韧性水平由大到小依次为太原、吕梁、忻州、晋中、临汾、运城。从空间趋势来看, 流域水资源系统韧性水平表现为西部高于东部, 北部高于南部。综合来看, 汾河流域各地区水资源系统韧性水平存在一定的波动, 整体韧性较低。2017—2020 年临汾、太原、吕梁、忻州均呈现逐渐增长的趋势, 2020—2021 年有一定程度的下降。主要原因是黄河干流引调水工程供水能力不能充分发挥, 现状水网工程不能满足城乡新发展格局要求, 太原、晋中、临汾、运城等重要城镇现有供水工程不能支撑社会经济快速发展等。

从汾河流域水资源系统韧性水平时间演变趋势来看, 2017—2020 年汾河流域水资源系统韧性水平波动较小, 总体上呈现上升的趋势。由于出台了《山西省汾河流域生态修复与保护条例》等政策, 规范流域内水资源开发、利用、建设等活动, 加快水利基础设施建设, 使水资源调控能力不断提升, 流域水资源系统韧性水平稳步提升, 2020 年汾河流域水资源系统总体韧性水平达到了最高值 0.57 。2021 年汾河流域中下游发生了有气象记录以来最强秋汛, 干支流多处河段发生洪水漫堤、堤外内涝等问题, 洪涝灾害影响了汾河流域部分水利基础设施, 使流域水资源系统韧性水平有所降低, 降至 0.51 。

3.2 水网构建对流域水资源系统韧性提升效果

根据山西省水网构建的有关规划和研究成果, 统筹谋划省级水网“纲”“目”“结”。以万家寨引黄入晋、中部引黄、古贤山西供水工程等具有显著水资源调配功能的重大引调水工程为“纲”, 以水系连通工程、县域配套工程、灌区工程等河湖水系及输配水

通道为“目”,以大中型水库及湖泊与岩溶大泉等具有控制性功能的水源工程为“结”,构建“三纵九横、八河连通,多源互补、丰枯调剂,蓄泄拦排、河湖安澜,水清岸绿、河畅泉涌,智慧联动、调控有序”的现代水网。

依据《山西省现代水网建设规划(2021—2035)》和2035年山西省国家水网的建设情况,包括地下水超采区治理、非常规水源利用、水网骨干工程,特别是防洪减灾工程、引调水工程、水利枢纽和水源工程、供水工程等重要水利工程建设情况,基于Matlab软件,以汾河流域各地区1995—2022年的指标数据为原始数据,综合灰色预测模型GM(1,1)^[21]和BP神经网络模型^[22-24],对2035年汾河流域有、无水网构建情景下流域水资源、经济社会发展及用水等水资源系统韧性的复杂网络各要素进行预测,结果如表2所示。

表2 水资源系统韧性的复杂网络各要素预测结果
Table 2 Prediction results of main factors of complex network of water resources system resilience

地区	$x_1/\text{亿 m}^3$	$x_2/^\circ\text{C}$	$x_3/\text{亿 m}^3$		$x_4/\text{亿 m}^3$
			有水网	无水网	
临汾	100.25	15.5	9.32	6.96	0.41
太原	46.55	11.5	6.14	4.76	2.32
运城	73.69	15.5	11.98	10.26	1.11
吕梁	121.56	13.5	11.26	10.61	0.56
晋中	96.39	13.5	14.41	13.21	0.88
忻州	131.11	13.0	18.51	17.14	0.81
流域	569.55	13.75	71.62	62.95	6.08

地区	$x_5/\text{亿 m}^3$	$x_6/\text{亿 m}^3$	$x_7/\text{亿 m}^3$	$x_8/\text{亿 m}^3$	
				有水网	无水网
临汾	223.56	11.42	6846.03	2.53	1.49
太原	103.57	4.21	18010.85	2.77	1.89
运城	392.36	21.03	8133.27	0.77	0.46
吕梁	199.51	7.95	7499.19	1.43	1.33
晋中	190.85	11.03	6188.64	1.71	1.27
忻州	323.75	12.81	5633.39	2.16	1.35
流域	238.93	11.41	52311.37	11.37	7.79

地区	$x_9/\text{亿 m}^3$		$x_{10}/\text{亿 m}^3$		$x_{11}/\text{亿 m}^3$	
	有水网	无水网	有水网	无水网	有水网	无水网
临汾	3.03	1.90	2.11	2.42	0.71	0.58
太原	1.20	0.77	3.97	4.55	2.70	2.18
运城	1.09	0.67	5.14	6.15	0.34	0.31
吕梁	1.79	1.14	1.89	1.93	0.89	0.76
晋中	1.57	0.89	2.90	3.19	1.09	0.89
忻州	1.80	1.37	2.57	2.74	0.51	0.46
流域	10.49	6.74	18.57	20.97	6.24	5.18

分别以2020年、2035年为基准年和水平年,分析汾河流域水网构建前后水资源系统韧性水平和空间格局变化,揭示汾河流域水网建设对水资源系统韧性的提升效果。2035年汾河流域及各地区有、无水网情况下水资源系统韧性水平对比如表3所示。根据水资源系统韧性水平的等级标准,结合ArcGIS

空间分析工具进行可视化处理,结果如图4所示。

表3 汾河流域及各地区有无水网情况下水资源系统韧性水平对比

Table 3 Comparison of water resources system resilience level with and without water network in the Fenhe River Basin and different regions			
地区	2020年	2035年(无水网)	2035年(有水网)
临汾	0.38	0.27	0.50
太原	0.79	0.82	0.92
运城	0.37	0.31	0.42
吕梁	0.68	0.41	0.58
晋中	0.54	0.45	0.61
忻州	0.66	0.47	0.68
流域	0.57	0.46	0.62

由表3可以看出,2035年无水网情况下,汾河流域水资源系统韧性水平为0.46,比2020年韧性水平(0.57)显著降低,甚至还低于2017年韧性水平(0.51)。从图4空间分布来看,2035年各地区水资源系统韧性水平由高到低依次为太原、忻州、晋中、吕梁、运城、临汾,总体特征与2020年相似,大体上表现为北部高于南部的特点,且各地区韧性水平均低于2020年韧性水平。主要原因是,随着经济社会的发展,到2035年现有水资源开发利用和节约保护工程体系已不能满足社会经济发展和生态环境保护需求,流域水资源与经济发展水平不匹配问题更加突出,导致水资源系统韧性水平降低。

2035年有、无水网的情况下汾河流域整体水资源系统韧性水平分别为0.62、0.46,水网构建使流域水资源系统韧性水平明显提升,达到了较高韧性水平。从空间分布来看,太原水资源系统韧性水平远高出其他城市,达到了0.92,并且3种情况下均达到高韧性水平;2035年水网初步构建完成后,临汾和忻州水资源系统韧性水平提升幅度最大,分别增加了0.23和0.21,运城、吕梁和晋中水资源系统韧性水平也有明显提升;除运城、临汾水资源系统韧性为较低水平以外,其他地区均达到或超过了较高韧性水平,全流域消除了低韧性水平。主要原因是,2035年省级水网体系基本建成后,将加强流域地表水地下水统一调配,逐步扩大引黄规模,使地下水开采量持续减少,非常规水利用量逐年增加,从而缓解水资源供需矛盾;水网建设将提升流域水资源的空间配置能力和年际年内调节能力,提高水资源对流域及各地区生态保护和经济社会发展支撑水平,也将显著提高流域水旱灾害防御能力、水资源集约利用能力、水资源优化配置能力、河湖生态保护治理能力、水网智慧化水平和流域水安全保障能力。

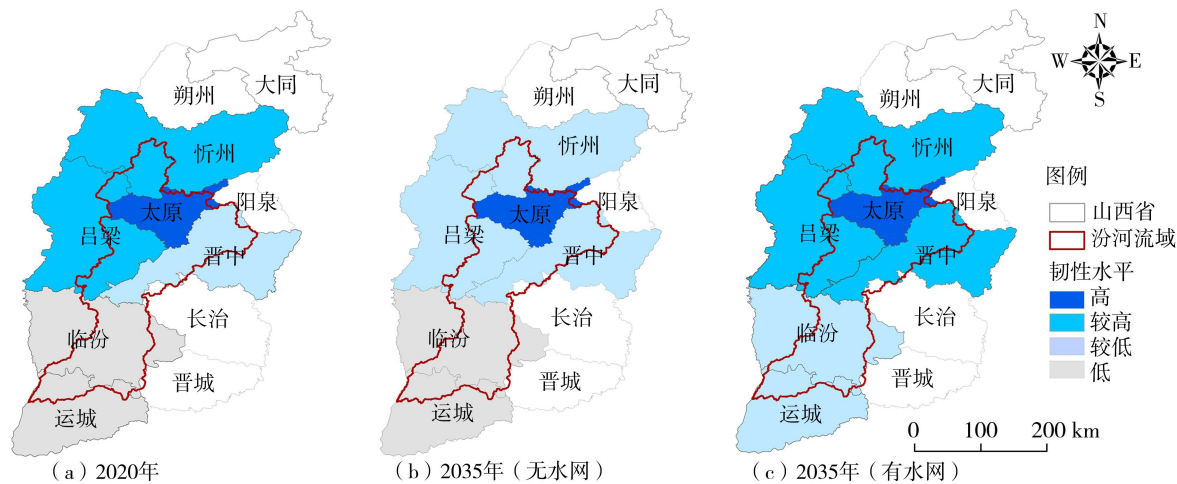


图 4 汾河流域水资源系统韧性水平空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water resources system resilience level in the Fenhe River Basin

4 结 论

a. 2017—2020 年汾河流域水资源系统韧性水平波动较小, 总体呈现上升趋势, 2021 年受洪涝灾害影响, 流域总体韧性水平降低至 0.51, 流域水资源系统韧性水平表现为西部高于东部、北部高于南部的空间分布特征。

b. 2035 年无水网建设的情况下, 流域水资源系统韧性水平为 0.46, 相较于 2020 年显著降低, 甚至低于 2017 年韧性水平, 流域水资源系统韧性水平空间分布特征与 2020 年相似, 各地区水资源系统韧性水平均低于 2020 年韧性水平。

c. 2035 年水网构建初步完成后, 流域水资源系统总体韧性水平明显提升, 达到了 0.62 的较高韧性水平; 各地区水资源系统韧性水平均有了明显提升, 流域内消除了低韧性水平, 说明水网构建对水资源系统韧性的提升效果显著。

参考文献:

[1] BOULTON C A, LENTON T M, BOERS N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s [J]. Nature Climate Change, 2022, 12(3): 271-278.

[2] KHARRAZ I A, AKIYAMA T, YU Yadong, et al. Evaluating the evolution of the Heihe River basin using the ecological network analysis: efficiency, resilience, and implications for water resource management policy [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 688-696.

[3] 孙才志, 陈雪姣, 陈相涛. 下辽河平原浅层地下水脆弱性评价[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(2): 238-247. (SUN Caizhi, CHEN Xuejiao, CHEN Xiangtao. The assessment of shallow groundwater vulnerability in the lower reaches of Liaohe River Plain [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(2): 238-247. (in Chinese))

[4] 陈燕飞, 张翔. 河流水环境的可恢复性及其评价研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(1): 34-36. (CHEN Yanfei, ZHANG Xiang. Water environment resilience and its resilient assessment of rivers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 34-46. (in Chinese))

[5] 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. (ZHOU Shenbei, WANG Xinyuan, TONG Jian. 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. (in Chinese))

[6] YANG Jie, YANG Y C E, KHAN H F, et al. Quantifying the sustainability of water availability for the water-food-energy-ecosystem nexus in the Niger River Basin [J]. Earth's Future, 2018, 6(9): 1292-1310.

[7] 夏军, 石卫, 陈俊旭, 等. 变化环境下水资源脆弱性及其适应性调控研究: 以海河流域为例 [J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 27-33. (XIA Jun, SHI Wei, CHEN Junxu, et al. Study on vulnerability of water resources and its adaptive regulation under changing environment: a case of Haihe River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 27-33. (in Chinese))

[8] 薛晴, 杨侃. 基于 BP 神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究 [J]. 水利水电技术, 2022, 53(11): 86-99. (XUE Qing, YANG Kan. Study on forecast and regulation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on GA-BP-SD coupling model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(11): 86-99. (in Chinese))

[9] NATHWANI J, LU Xiaoli, WU Chunyou, et al. Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 51-60.

- [10] LIANG Jingjing, LI Yangfan. Resilience and sustainable development goals based social-ecological indicators and assessment of coastal urban areas;a case study of Dapeng New District, Shenzhen, China[J]. Watershed Ecology and the Environment, 2020, 2: 6-15.
- [11] 孙淑琴, 祁鑫, 袁正海, 等. 基于混沌理论的电力系统微弱谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 76-86. (SUN Shuqin, QI Xin, YUAN Zhenghai, et al. A weak harmonic detection method for a power system based on chaos theory [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 76-86. (in Chinese))
- [12] 肖嵩, 陈哲, 杨亚涛, 等. 基于混沌理论与 DNA 动态编码的卫星图像加密算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(3): 1128-1137. (XIAO Song, CHEN Zhe, YANG Yatao, et al. Satellite image encryption algorithm based on chaos theory and DNA dynamic coding [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(3): 1128-1137. (in Chinese))
- [13] 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 Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, 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))
- [14] 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.
- [15] 刘欢, 甘永德, 杨钦, 等. 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 62-68. (LIU Huan, GAN Yongde, YANG Qin, et al. Adaptability evaluation of water resources and associated elements based on perspective of water network [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 62-68. (in Chinese))
- [16] 陈莉, 张安安. 黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 1-8. (CHEN Li, ZHANG Anan. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 1-8. (in Chinese))
- [17] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 等. 一种信息不完备条件下的水资源安全风险概率预测模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1078-1090. (QIAN Longxia, WANG Hongrui, ZHANG Ren, et al. A model for predicting water resources security risk probability in the condition of incomplete information and its application [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(5): 1078-1090. (in Chinese))
- [18] 徐蕴韵, 吴昊, 李永泰, 等. 南水北调东线江苏段用水结构及其时空演变[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 97-102. (XU Yunyun, WU Ha, LI Yongtai, et al. Water consumption structure and its temporal and spatial evolution in Jiangsu section of east route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 97-102. (in Chinese))
- [19] 吴乃龙, 袁素云. 最大熵方法[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991.
- [20] 叶倩琳, 王万良, 王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1107-1120. (YE Qianlin, WANG Wanliang, WANG Zheng. Survey of multi-objective particle swarm optimization algorithms and their applications [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6): 1107-1120. (in Chinese))
- [21] 谢乃明, 刘思峰. 离散 GM(1,1) 模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 93-99. (XIE Naiming, LIU Sifeng. Discrete GM(1,1) and mechanism of grey forecasting model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(1): 93-99. (in Chinese))
- [22] 刘春成, 曾智, 庞颖, 等. 城市需水量预测方法比较[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 179-183. (LIU Chuncheng, ZENG Zhi, PANG Ying, et al. Comparison of urban water demand forecasting methods [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 179-183. (in Chinese))
- [23] 邹红梅, 朱成涛. 基于 LSTM 和 BP 神经网络的水库入库径流中长期预测比较研究[J]. 水文, 2024, 44(4): 27-31. (ZOU Hongmei, ZHU Chengtao. Comparative study on mid-long term prediction of reservoir inflow based on LSTM and BP neural network [J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(4): 27-31. (in Chinese))
- [24] 陈星, 沈紫菡, 许钦, 等. 陕西省月用水量预测方法研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 73-78. (CHEN Xing, SHEN Zihan, XU Qin, et al. Research on monthly water consumption prediction methods in Shaanxi Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 73-78. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-05-07 编辑: 施业)

