

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0323

水资源、水环境、水生态复合系统内涵解析 及韧性评估指标体系研究

刘永超^{1,2,3}, 杜政轩³, 施琪³, 应超³, 李加林^{1,2,3*}

(1.宁波大学 陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心, 浙江 宁波 315211;

2.宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211; 3.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 水资源、水环境、水生态统筹(“三水统筹”)治理是新时代我国推进可持续治水战略的必然路径。韧性视角下的“三水统筹”理念与可持续发展的目标契合, 并日益受到学界的关注。然而, 目前对“三水统筹”概念内涵的系统解析及韧性评估指标的科学构建缺乏深入分析。为此, 系统阐释了水资源、水环境、水生态(以下简称“三水”)复合系统的概念框架及其多维属性(涵盖资源、环境、生态、管理等维度), 界定了“三水”复合系统韧性的科学内涵; 并将该韧性表征为在自然变化与人类活动的双重干扰下, 系统通过水资源可持续配置、水环境良性循环与水生态系统协同演化的耦合机制所展现出的抗干扰能力、自适应调节能力、稳态恢复能力以及系统转型能力的有机统一。在此基础上, 基于复合系统动态耦合理论, 构建了包含驱动力、压力、状态、影响、响应及管理为准则层的“三水”复合系统韧性评估指标体系, 旨在为韧性能力的定量评估提供科学依据, 以支撑生态文明建设战略的实施。

关键词: 水资源、水环境、水生态复合系统; 内涵解析; 韧性评估; 指标体系

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2025)05-0031-12

在全球气候变化加剧与城市化快速发展的双重压力下, 人类活动引发的水资源、水环境、水生态(以下简称“三水”)系统失衡问题凸显^[1-3], 表现为水资源供需矛盾加剧、水质恶化以及水生态系统退化等问题, 在大江大河流域、干流-支流界面及生态敏感带(河流-湖泊过渡区、港湾-海岸带)等人口、资源、环境矛盾突出的关键区域表现尤为显著^[4-5]。党的二十大报告指出, 水生态环境保护作为一项系统工程, 需要深入推进污染防治, 统筹水资源、水环境、水生态(以下简称“三水统筹”)治理。2023年4月《重点流域水生态环境保护规划》(https://www.mee.gov.cn/ywgz/sssthjbh/zdlybhxf/202304/t20230421_1027897.shtml)提出水生态环境保护体系要更加完善, 统筹推进“三水”要素系统治理。近年来, 学术界围绕“三水”系统

的研究呈现多元化发展趋势。在资源维度, 聚焦水资源韧性评估、利用效率测度及其与生态系统的耦合协调机制研究^[6-7]; 在环境维度, 致力于水环境质量的时空特征解析, 通过驱动机制识别与障碍因子诊断, 为水环境治理提供优化路径^[8-9]; 在生态维度, 重点探讨了水生态安全的多尺度驱动机理^[10-11], 运用系统动力学等模型模拟其演变趋势^[12-13], 为水生态系统可持续管理提供了理论框架。

水治理理念的演进经历了以水资源开发管理为主导的水资源治理阶段, 到兼顾水质和水量的“二水统筹”治理阶段, 再到新时代的“三水统筹”治理阶段^[14]; 这种从单一要素治理向系统综合治理的范式转变, 体现了治水战略的深刻变革。当前亟须运用系统论的思想, 解析水资源短缺、水环境污染和水生态退化的耦合关系, 深入探究“三水”复

收稿日期: 2025-03-28

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(23&ZD105)

第一作者: 刘永超, 博士/副研究员, 主要研究方向为资源开发与环境保护。E-mail: liuyongchao@nbu.edu.cn

*通信作者: 李加林, 博士/教授, 主要研究方向为水资源可持续管理。E-mail: lijialin@nbu.edu.cn

合系统的内涵,统筹水域系统中自然和社会要素的交互作用。我国水资源时空分布异质性显著,区域配置格局与社会经济发展需求存在结构性失衡。虽然经济发展模式正逐步向高质量转型,但“三水”复合系统压力持续加剧,已成为制约生态文明建设的影响因素^[15-16]。

在此背景下,构建适应新时代可持续发展要求的国家水治理体系,统筹经济发展与生态保护的双重目标,为中华文明永续发展提供水资源保障。因此,本研究以“三水”复合系统韧性为理论框架,初探了包含多维指标的评价体系,旨在为“三水统筹”治理提供新思路。

1 “三水”复合系统概念及韧性内涵

1.1 “三水”复合系统概念辨识

“三水”复合系统是从多圈层、多维度和多层次分析水资源利用、水环境保护和水生态维持之间

相互影响、相互制约的社会-生态交互作用的复杂系统(图1),不仅关系到人类社会的生存与发展,也是经济可持续发展的重要保障^[17]。

水资源的过度使用会影响水环境质量,同时水环境变化会影响水生态健康,而水生态健康状态又会影响水资源的可持续性,三者密切相关^[18]。具体表现为水资源关注数量特征,包括地表水、地下水以及大气降水等在农业灌溉、工业生产、生活方面的利用量^[19],需要考虑水资源利用效率和可持续性问题;水环境关注质量特征,包括水域环境的健康状况,涉及污染物控制、污水处理和水体自净能力等^[20];水生态关注结构和功能,包括鱼类、植物、微生物等水生生物生存环境和物种多样性^[21],其健康度对于维持自净功能、保护生物多样性和生态平衡至关重要。水环境是水资源与水生态联系的纽带,水环境恶化直接影响水资源的可用性和水生态的健康度。

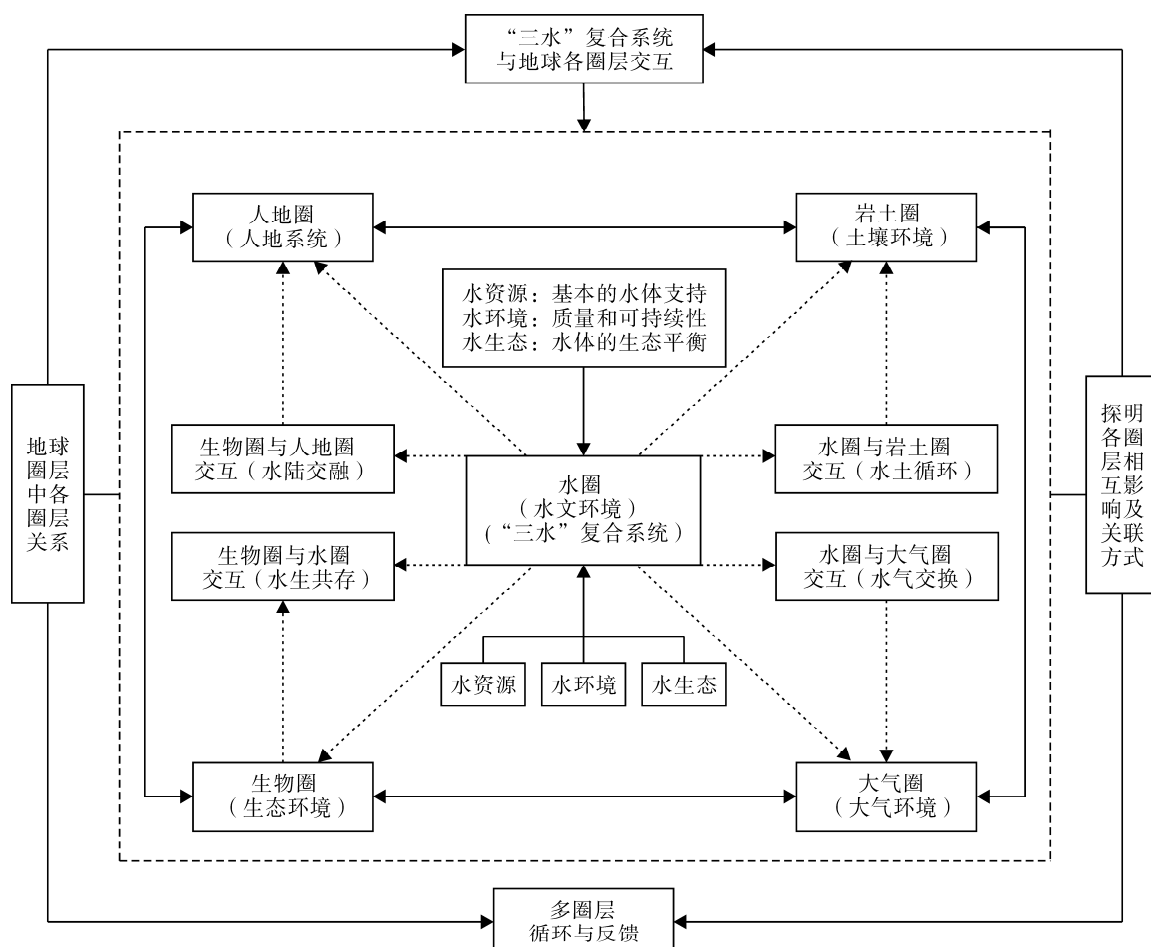


图1 “三水”复合系统与地球表层系统交互作用示意图

1.2 “三水”复合系统的多维属性

“三水”复合系统具有资源、环境、生态、社会经济和管理等多维属性,各属性共同形成了“三水”复合系统的核心内涵。多维属性特征具体阐述如下:

(1) 资源属性。水资源总量、分布和质量状况决定了水资源的供应能力和可利用性,水资源储量、流量和补给量为社会和生态系统的运行提供了支撑。

(2) 环境属性。水环境的质量和健康状况,包括水体物理、化学和生物学特征(如清洁度、营养盐含量、pH值、污染物浓度等),反映了水环境的污染程度和水质状况,进而直接影响水资源的安全性、可利用性以及水生态系统的健康度。

(3) 生态属性。水域环境通过维持水生动植物的种类和数量、栖息地质量、生态系统的结构和功能等来支撑生物多样性,是衡量水体生态系统能

否维持健康水平的主要依据。

(4) 社会经济属性。该属性表征水资源系统与人类社会需求和经济活动的紧密关系,水资源的开发利用、供水需求、用水效率以及与农业、工业、生活用水等社会经济系统的耦合关系,构成了评估水资源可持续性的关键指标。

(5) 管理属性。该属性影响水资源利用的公平性、可持续性、系统的整体协调程度,通过水资源保护、污染治理、水资源利用效率等相关政策与法规的实施,促进水资源保护、分配和可持续利用。

综上,多维属性间的相互作用支撑着“三水”复合系统的运行。同时,为实现“三水”复合系统的可持续发展目标,须统筹考虑系统内各属性特征,借助相应的治理策略提升“三水”复合系统在社会-生态系统中的可持续发展潜力,确保“三水”复合系统的经济效益、生态效益与社会效益的有机统一(图2)。

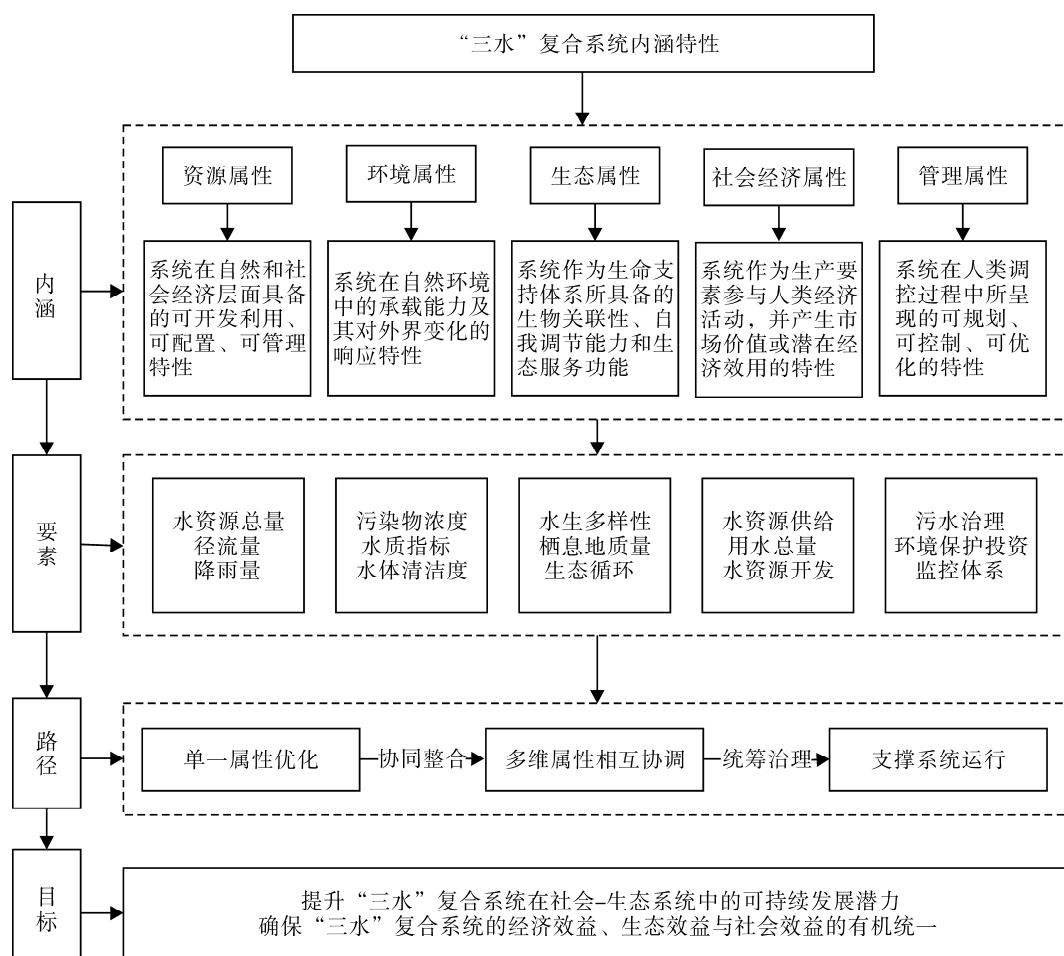


图2 “三水”复合系统内涵特征及多维属性解析

1.3 “三水”复合系统韧性的基本内涵

“韧性”(Resilience, 源自拉丁语“Resilire”), 意为“弹回”或“恢复原状”^[22], 其理论演进呈现明显的学科扩散特征: (1) 工程学领域最早将其定义为材料抵抗断裂和恢复原状的能力; (2) 生态学领域强调生态系统在受干扰后维持结构与功能稳定的能力^[23-24]; (3) 社会学领域关注社会系统应对冲击时的功能维持与快速恢复特性^[25]; (4) 经济学领域侧重金融系统抵御危机并实现稳态转换的适应性^[26]。尽管学科视角存在差异, 但均聚焦于系统承受干扰、维持功能及适应性转型的能力维度^[27], 这一共识为“三水”复合系统韧性研究提供了跨学科理论基础。

本研究基于跨学科韧性理论及“三水”复合系统特性, 定义“三水”复合系统韧性内涵如下: 系统在水文变异、环境胁迫与人类活动等多维扰动耦

合作用下, 通过水资源时空优化配置、水环境污染通量调控和水生态系统服务功能协同提升等机制, 所表现出的抗干扰能力、自适应调节能力、恢复重建能力及系统转型能力的整合, 旨在实现水资源高效利用、水环境质量持续改善和水生态系统健康维持的协同目标(图3)。就系统内单一韧性而言, 水资源韧性体现在水资源过度消耗或面临干旱或洪水等自然灾害时仍然具有数量和质量上的持续供水能力^[28]; 水环境韧性指水环境在遭受污染等人为干扰后, 通过自我净化或治理措施进行调整, 形成动态平衡机制并逐渐恢复其原有功能, 进一步提升适应能力^[29]; 水生态韧性涉及水生植物、微生物和鱼类等生态系统组成部分在水质变化或栖息地改变时, 凭借自我修复来维持多样性和稳定性的能力^[30], 生物多样性越丰富, 生态系统韧性就越强, 即能更有效地应对外界压力并恢复到健康状态。

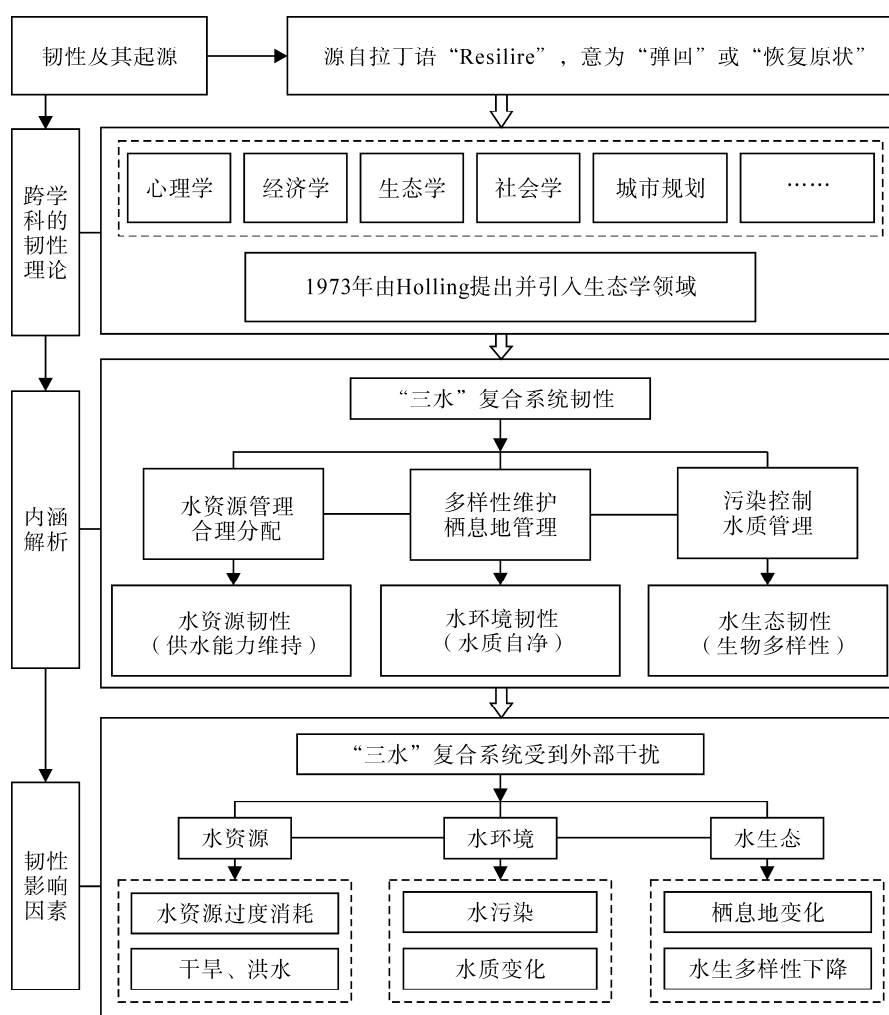


图3 “三水”复合系统韧性的基本内涵及影响因素

总之,水资源韧性、水环境韧性和水生态韧性三者密切关联、相互影响,“三水”复合系统韧性的提升使系统在复杂环境下依然保持稳定和高效运作状态,其韧性越强系统越能适应变化、应对冲击并维持生态平衡。

2 “三水”复合系统韧性评价指标体系构建

基于以上对“三水”复合系统多维属性及韧性概述解析的认识,如何全面、客观地评价韧性水平成为“三水”复合系统韧性深化研究迫切需要解决的问题。目前针对这方面的研究尚待开展,因此亟需建立一套综合评价指标体系。

2.1 评价指标体系构建原理

国际环境组织通常将韧性评估过程分解为三部分。首先评估系统脆弱性,确定可能导致系统功能丧失或退化的原因;其次评估系统适应性,重点分析系统在面对外界干扰时能够采取的应对策略和自我调节能力;最后评估系统恢复力,重点考虑系统响应速度、恢复效率以及长期持续能力。

针对“三水”复合系统中多重交错的自然和社会风险因素,其韧性评估一方面需要综合考虑不同层面和尺度下的应对能力,识别各类潜在风险因素及其相互作用,评估系统的脆弱性和承载能力;另一方面则要分析系统在面临风险时的响应机制,包括适应、缓解和恢复能力,并根据评估结果,制定相应的管理措施和政策方针,以增强系统的抗干扰能力和可持续性。因此,“三水”复合系统的韧性评估可理解为对系统在自然-人为复合扰动下的适应能力、抗干扰能力以及恢复能力的综合量化表征,其核心在于耦合多维度影响因子的动态反馈机制解析。

为构建具有普适性的“三水”复合系统评价指标体系,本研究在指标甄选过程中统筹考虑其对系统管理的指导意义、数据的可获取性以及指标与“三水”关联内涵的明确性^[31]。DPSIR模型源于PSR(Pressure-State-Response)和DSR(Driving force-State-Response)模型的理论框架^[32]。欧洲环境署(EEA)于2000年将其拓展为DPSIRM(Driving force-Pressure-State-Impact-Response-Management)模型,通过构建社会-生态系统的因果反馈链,为环境问题的系统分析和综合管理提供决策支持^[33-34]。

随着社会-生态系统韧性认识的深入,该模型展现出整合生态、社会、经济、自然等指标的潜力,被广泛用于水资源管理、生态安全评价以及人居环境治理等领域^[35-39]。

DPSIRM模型采用系统动力学视角,通过解析指标间的内在关联性,构建了“诊断-归因-调控”的评估框架,能够表征韧性演变的“抵抗-适应-恢复”动态过程,从而有效评估“三水”复合系统的韧性特征^[40]。因此,以DPSIRM模型为基础构建“三水”复合系统的韧性评估指标体系,可以反映“三水”复合系统内部各要素间的相互关系,为衡量“三水”复合系统内部多维度的潜在风险与韧性提供重要方法。

2.2 评价指标体系构建思路

在界定“三水”复合系统韧性内涵的基础上,通过解析DPSIRM模型的驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)、响应(R)和管理(M)等要素,将其与韧性评估体系中的抗干扰强度和适应能力建立映射关系,进而构建基于DPSIRM的“三水”复合系统韧性评估概念框架。在此基础上,结合“三水”复合系统的管理目标,明确系统韧性的主要受体,并针对具体区域特征识别关键影响因素,从而将系统韧性的复杂性转化为可以量化的评估指标,以增强评估过程的客观性。通过建立多维度的评价指标体系,能够全面测度系统的综合韧性水平,表征其不同维度的韧性特征,并为政策优化与可持续发展提供科学依据,确保管理决策兼具理论依据和可操作性。

基于DPSIRM模型的理论框架,从“三水”复合系统动态耦合过程出发,构建了系统韧性评估的指标体系(图4)。在评估框架设计中,将韧性评估受体明确界定为自然系统和社会经济系统两个维度,以全面反映“三水”复合系统的多元特征。在自然系统指标选取方面,基于水资源承载力评价、水环境承载力评价和湖泊生态系统韧性研究等领域的经典文献^[41-44],结合水资源数量特性、水环境质量特性以及水生态结构和功能特性进行筛选。在社会经济系统指标选取方面,综合考虑经济社会发展对水资源的需求、水污染压力、治理能力以及政策响应与管理效能等因素,结合文献综述与案例选取指标^[45-48]。

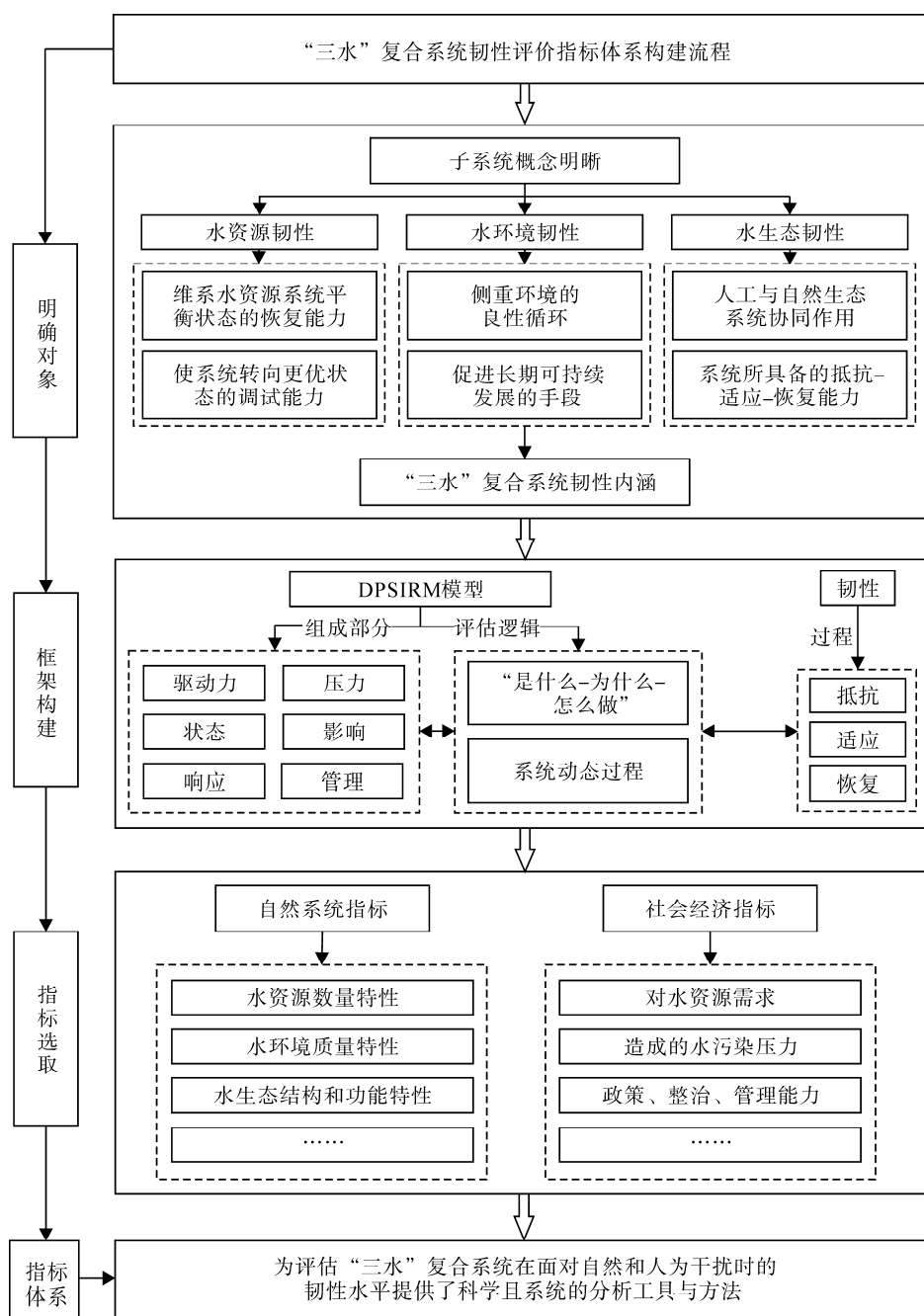


图4 评价指标体系构建的流程与思路

3 “三水”复合系统韧性评价指标选取与解释

3.1 指标选取

区域“三水”复合系统韧性水平的评估,本质上是对水资源可持续供给能力、水环境质量维持能力以及水生态系统稳定性发展潜力的综合评价。同时,该评估须纳入区域间“三水”协同治理成效的差异化分析,并量化系统耦合协调度对整体韧性水

平的贡献效应。因此,本研究构建了包含目标层、准则层和指标层三个层次的“三水”复合系统评价指标体系,并通过与DPSIRM模型的要素映射实现有机结合(表1)。

表1目标层以可持续发展为导向,表征“三水”复合系统的整体韧性水平;准则层依据DPSIRM模型的理论框架,系统构建包含驱动力、压力、状态、影响、响应以及管理六个维度的评价准则。

表1 “三水”复合系统韧性评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标含义及性质	数据来源
“三水”复合系统韧性水平	驱动力	降水量/亿 m ³	积聚水资源 (+)	《中国环境统计年鉴》
		GDP/亿元	经济水平 (+)	《中国统计年鉴》
		第一产业占 GDP 比重/%	经济结构 (-)	《中国统计年鉴》
		专利授权数/件	科技创新能力 (+)	《中国统计年鉴》
		地方财政科学技术支出/亿元	科技支持水平 (+)	国家统计局
	压力	人口密度/(人·km ⁻²)	人口资源需求 (-)	《中国统计年鉴》
		用水总量/亿 m ³	水资源消耗量 (-)	《中国环境统计年鉴》
		人均用水量/m ³	人均耗水强度 (-)	《中国环境统计年鉴》
		废水排放总量/万 t	水污染强度 (-)	《中国环境统计年鉴》
		实际用水量/万 m ³	资源消耗强度 (-)	《中国环境统计年鉴》
		化肥施用强度/(t·hm ⁻²)	水资源受损度 (-)	《中国农村统计年鉴》
		人均水资源量/(m ³ ·人 ⁻¹)	水资源分配 (+)	《中国环境统计年鉴》
		生态用水总量/亿 m ³	维持生态系统功能用水 (+)	国家统计局
		供水总量/亿 m ³	供水能力 (+)	国家统计局
		森林覆盖率/%	森林面积/土地面积 (+)	《中国环境统计年鉴》
	影响	NDVI/%	归一化植被指数 (+)	地球资源数据云平台
		FVC/%	植被覆盖度 (+)	国家青藏高原科学数据中心
		水资源总量/亿 m ³	水资源储备 (+)	《中国统计年鉴》
		水产面积/hm ²	水产聚集程度 (-)	《中国农村统计年鉴》
		生态环境补水/亿 m ³	水生态修复力 (+)	《中国环境统计年鉴》
	响应	治理废水项目投资/万元	生态筹资能力 (+)	国家统计局
		污水处理总量/万 t	污水治理水平 (+)	《中国环境统计年鉴》
		环境污染治理投资/亿元	污染治理水平 (+)	国家统计局
		财政环境保护支出占比/%	财政支持比重 (+)	国家统计局
	管理	污水处理厂数量/座	污水应对能力 (+)	《中国环境统计年鉴》
		污水处理厂污水处理能力/(m ³ ·d ⁻¹)	污水处理能力 (+)	《中国环境统计年鉴》
		水土流失治理面积/hm ²	水土流失修复 (+)	《中国环境统计年鉴》
		节水灌溉面积/hm ²	水资源节约 (+)	《中国环境统计年鉴》
		人工林面积/hm ²	水源涵养保持 (+)	《中国环境统计年鉴》

注: (+) 代表正向指标, 其数值与系统韧性呈正相关; (-) 代表负向指标, 其数值与系统韧性呈负相关。

社会、经济、自然等要素常作为城市生态韧性的驱动力要素, 选取自然降水量、社会经济及科创水平相关指标表征; 压力表征对“三水”复合系统韧性水平施加压力的外界干扰要素, 选取对“三水”复合系统产生影响的水资源消耗与水生态、水环境

破坏的相关指标; 状态指在驱动力和压力共同作用下“三水”复合系统韧性水平的现状, 受驱动力和压力的作用而改变, 选取人均水资源量和生态本底水平相关指标衡量; 影响表征各要素对“三水”复合系统所处自然环境和社会经济所产生的影响, 选

取水资源总量等相关指标;响应和管理维度分别表征社会系统应对自然和社会要素复合扰动的短期适应能力和长效治理能力,通过污水处理、相关财政支出等指标量化。该机制促使“三水”系统形成预防、适应或者改善的递进响应模式,并且通过反馈效应优化驱动力、调控压力,进而改善状态并缓解影响^[49-52]。

在准则层的六个维度框架下,指标层进一步细化为若干可以量化的具体评价指标,最终形成完整的“三水”复合系统韧性评估指标体系。

3.2 指标解释

3.2.1 驱动力

驱动力推动着“三水”复合系统内各要素的相互作用和变化^[53]。其中,降水量直接决定水资源自然补给量与时空分布特征^[54]。GDP 增长对系统的影响具有双重性,既通过产业用水加剧资源压力,又为改善管理水资源提供了支持^[55]。第一产业中,农业灌溉在大量用水的同时,农药化肥的不合理使用会导致面源污染^[56]。专利授权数作为衡量区域科技创新水平的关键指标,其增长可以通过促进技术创新与优化管理效率,改善“三水”复合系统的协调性。此外,地方财政的科技投入能够支持水资源管理领域的创新技术研发,从而提升“三水”保护的科技支撑能力^[57-58]。

3.2.2 压力

压力指复合系统在外部驱动力作用下所承受的负荷,可能导致系统功能退化或结构失稳。其中,高人口密度通过资源需求空间集聚与废弃物排放强度提升的双重路径,对区域水资源供需平衡、水环境质量维持及水生态系统健康产生多尺度、非线性的复合环境效应^[59-60]。水资源过度开发与用水需求的持续增长(表现为用水总量和人均用水量上升)显著加剧了水资源枯竭的风险;尤其是在水资源禀赋脆弱的地区,这种趋势将不可避免地导致地下水水位下降和地表水流量减少,进而破坏水资源自然补给平衡^[61]。废水的排放不仅会降低水质,还会加剧水生态系统的退化,水质等级将大幅下降,在饮用水源区形成以水质制约为特征的水资源短缺现象^[62]。此外,高强度的化肥施用通过地表径流将大量的氮、磷等营养物质输入水体,加速水体的富营养化进程,进而诱发“水华”或“赤潮”^[63],

最终造成水生态系统功能退化^[64]。

3.2.3 状态

状态表征外部压力作用下“三水”复合系统的响应特征。人均水资源量是衡量区域水资源丰沛度的重要指标,直接反映了水资源供给的稳定性^[65]。在水资源相对匮乏的地区,水体的自净能力较弱,污染物容易在水体中积累,从而加剧水质污染问题;在水资源丰富的地区,水体流量通常较为稳定,有助于维持健康的水生态系统和较高的生物多样性。此外,生态用水总量作为生态系统健康的核心指标,反映了为维持生态平衡、保护生物多样性所需的水资源量,能够增强水体的自净能力,也能够有效地保护水生生物栖息地,避免过度干扰生态系统^[66]。供水总量作为区域水资源保障能力的关键指标,其充足性直接决定水体环境容量与污染物降解效率,对维持水质基准具有决定作用^[67]。森林通过冠层截留、枯落层蓄渗以及根系固土等协同机制延缓洪峰形成,削减洪峰流量,从而显著提升流域水文调节能力与生态韧性^[68];随着森林覆盖率的提高,区域生态系统将更加稳定,生态系统的自修复周期会进一步缩短。NDVI、FVC 与森林覆盖率类似,均是常用的植被监测指标,NDVI 侧重植被生理活性,FVC 则更多表征植被的空间覆盖程度,两者表现出与降水量、平均相对湿度和供水量的正相关性,是水系统韧性的重要状态变量^[69]。

3.2.4 影响

影响描述的是驱动力、压力、状态等因素变化对复合系统带来的具体结果或风险。水资源总量的变化直接影响系统稳定性,决定了用水的保障水平。水资源充足的地区水体流量较大,具备较强的污染物稀释和自净能力,能显著提升水生态系统的韧性,使其在面临干旱、污染等环境压力时更具恢复能力^[70]。水产养殖伴随水资源需求增加,养殖过程中产生的废水、残饵和粪类等有机物会增加水体中氮、磷的含量,可能导致局部水域富营养化,进而引发水环境恶化^[71]。

大规模养殖还可能扰动水生态系统,引发物种竞争和生态链紊乱,造成生物多样性减少。为应对这些问题,生态环境补水作为一种调节手段,通过向河流、湖泊和湿地等生态区域注入额外的水资源,恢复水生态系统的平衡与功能^[72]。生态补水不

仅能够缓解人类活动和气候变化带来的水资源过度消耗,还能够稀释水体中的污染物,减少富营养化现象的发生,提高复合系统的恢复能力,维持复合系统的稳定。

3.2.5 响应

响应是指社会主体(如政府、企业或个人)为应对或缓解环境与社会系统的驱动力、压力及潜在影响而采取的一系列适应性措施与策略。废水治理项目的实施显著提升了污水处理能力,有效降低了未经处理废水的直接排放量,从而减少了水体污染的风险^[73];该措施不仅改善了区域水质,还通过保护“三水”复合系统的稳定性,增强了系统的整体响应能力。污水处理总量的增加有效降低了水体污染物浓度,从而提升了系统应对人口增长和工业发展所带来的污水排放压力的缓冲能力,并通过改善水体自净能力提高生态恢复力^[74]。此外,通过加大污染治理投资,水处理设施和技术升级,能够有效净化工业、农业及生活污水中的污染物,显著改善水体质量,增强水环境的稳定性,维护生态系统的健康。财政环境保护支出作为系统的响应指标,财政投入能够支持水环境保护和科学管理,减少水资源的过度开发与污染,提高其可持续利用率,增强系统应对环境压力的韧性^[75]。

3.2.6 管理

管理是指系统性地干预、调控和优化“三水”系统中的关键要素,实现三者的协同发展。相较于被动响应指标,管理更强调决策者的主观能动性,其本质在于推动“三水”系统从被动应对向主动调控转变^[76]。水土流失治理作为我国水土保持工作的核心内容,其生态效益主要体现在:(1)增加植被覆盖度,减少土壤侵蚀,降低径流泥沙含量,从而改善水体浊度;(2)增强土壤水分保持能力,优化水源涵养功能,为水生生物提供更适宜的栖息环境,最终促进流域生态系统的平衡与稳定^[77]。

污水处理厂作为水污染控制和水质改善的关键基础设施,其数量的增加能够增强“三水”系统的韧性,通过增强系统应对突发污染事件的缓冲能力,提高用水高峰期等压力条件下的适应性与恢复力^[78]。污水处理厂的污水处理能力是决定污水净化效能的关键参数,其处理规模与污染物去除率呈现正相关;提升处理能力可以有效降低水体中污染物

的浓度,改善出水水质,进而创造适宜的水生生态环境,对维持水生生物群落结构和保护水生生态系统生物多样性具有重要作用。节水灌溉技术通过精准调控灌溉水量,可以显著提升农业水资源利用效率,同时有效缓解因过量灌溉导致水资源浪费和面源污染;该技术既能够降低农业用水强度,又可以减少江河的污染负荷,从而改善水体环境质量,对维持水生生态系统结构和功能的稳定性具有积极作用^[79]。

4 结论与展望

作为新时代国家水治理体系的创新范式,“三水”复合系统理论的提出源于全球气候变化加剧与人类活动强度持续增加的双重压力。本研究基于传统水资源管理理论框架,系统解析了“三水”复合系统的多维度属性与内涵特征。在此基础上,提出了“三水”复合系统韧性综合评价指标体系,并运用 DPSIRM 模型实现了系统要素间相互作用过程的量化表征。这种动态化、系统化的研究方法不仅深化了对水域环境复杂性的科学认知,而且为区域水资源管理的实证研究提供了方法论支撑,同时为相关政策制定提供了理论依据。

尽管当前“三水”复合系统韧性评价研究仍处于探索阶段,存在评估指标体系普适性不足和技术框架标准化欠缺等问题,但本研究为“三水”复合系统韧性的科学评估提供了可量化的方法论参考。特别是在理论内涵解析方面构建了系统认知框架,在指标体系设计与韧性评价上实现了定量化突破。鉴于区域自然环境条件、社会经济背景和水资源需求等的异质性特征,未来研究应着力于开发基于多源数据耦合的建模方法,开展多情景实证比较,并构建动态适应性评估体系,以增强用“三水”复合系统理论解决复杂人地系统问题的实践转化能力。

参考文献:

- [1] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5):483-493.
- [2] 白乐, 李怀恩, 何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12):2078-2088.
- [3] 方林, 方斌, 刘艳晓, 等. 长三角地区景观生态风险与

- 人类活动强度的响应及其时空关联[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22):210-219.
- [4] 李怀恩, 李越, 蔡明, 等. 河流水质与流域人类活动之间的关系[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1):24-28.
- [5] 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.
- [6] 张明斗, 任衍婷, 刘耀彬. 中国水资源利用效率与生态韧性的协调度及动力因素研究[J]. 世界地理研究, 2025, 34(2):168-180.
- [7] ZHANG H Q. Analysis of spatiotemporal evolution and influencing factors of water poverty and ecological resilience coupling coordination in Chinese[J]. Ecohydrology, 2025, 18(2):e2732.
- [8] 李爱华, 李艺, 吕铃钥, 等. 山东省水环境承载力时空演化及驱动因素研究[J/OL]. [2025-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20250124.1637.008.html>.
- [9] LUO P P, MU Y, WANG S T, et al. Exploring sustainable solutions for the water environment in Chinese and Southeast Asian cities[J]. Ambio, 2022, 51(5):1199-1218.
- [10] KOVÁCS Z, TARCSAY B L, TÓTH P, et al. Prediction of physico-chemical parameters of surface waters using autoregressive moving average models: a case study of kis-balaton water protection system, Hungary[J]. Water, 2024, 16(16):2314.
- [11] 戴文渊, 玛久草, 陈亦晨, 等. 黄河流域甘肃段水生态安全驱动力分析及动态演变[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10):1662-1671.
- [12] 李明月, 胡志雄, 彭康, 等. 基于 PSFR 模型的黄河流域吕梁段水生态安全评估[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(3):741-751.
- [13] FARZANEH M A, REZAPOUR S, FOVARGUE R, et al. Stochastic mathematical models to balance human and environmental water needs and select the best conservation policy for drought-prone river basins[J]. Journal of cleaner production, 2021, 291:125230.
- [14] 廖雅, 侯晓姝, 任晓红. “三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析[J]. 环境科学, 2022, 43(4):1853-1862.
- [15] 景晓栋, 田贵良. 黄河流域最严格水资源保护利用制度的内涵解析、核心构成及实施路径[J]. 水资源保护, 2025, 41(2):58-64, 87.
- [16] 李加林, 田鹏, 史小丽, 等. 水资源管理研究进展[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(2):248-260.
- [17] 苏莹, 董增川, 崔璨, 等. 湖南省“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统协调发展评价[J]. 中国农村水利水电, 2023(7):63-73.
- [18] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I.城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4):594-605.
- [19] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度[J]. 地理学报, 2014, 69(1):121-133.
- [20] 刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1081-1090.
- [21] 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6):707-710.
- [22] 王刚, 吴嘉莉. 城市韧性: 思想渊源、知识谱系与学术反思[J]. 中国应急管理科学, 2023(11):1-14.
- [23] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8):151-158.
- [24] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology and systematics, 1973, 4:1-23.
- [25] 解为瀚, 汪伟全. 韧性治理视域下社区应急管理的行动逻辑[J]. 社会科学, 2024(3):118-125, 192.
- [26] 叶文显. 黄河流域经济韧性的时空演变特征与影响因素[J]. 统计与决策, 2024, 40(17):132-137.
- [27] 李依浓, 李洋. 数字化背景下的韧性城市建设: 以德国达姆施塔特为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28(7):65-74.
- [28] 万芳, 王煜, 王威浩, 等. 流域水资源系统韧性演变及水网构建效果分析[J/OL]. [2025-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20240909.1506.004.html>.
- [29] 杨亚锋, 王红瑞, 曹永强, 等. 可变 TOPSIS 水安全韧性三支决策方法及应用[J]. 水科学进展, 2024, 35(4): 595-605.
- [30] 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.
- [31] 李海龙, 于立. 中国生态城市评价指标体系构建研究[J]. 城市发展研究, 2011, 18(7):81-86, 118.
- [32] 曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于 SD 和 DPSIRM 模型的水资源管理模拟模型: 以黑河流域甘州区为例[J]. 经济地理, 2013, 33(3):36-41.
- [33] 雷晓康, 汪静. 乡村振兴背景下农村贫困地区韧性治理的实现路径与推进策略[J]. 济南大学学报(社会科学版), 2020, 30(1):92-99, 159.
- [34] YANG J, LI X M. Assessment on spatial differentiation of urban ecological security based on DPSIRM framework-the case of Dalian[C]//2010 the 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Wuhan, China, 2010:144-149.

- [35] 郭倩, 汪嘉杨, 张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3):484-493.
- [36] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11):3511-3520.
- [37] 杨俊, 李雪铭, 李永化, 等. 基于 DPSIRM 模型的社区人居环境安全空间分异: 以大连市为例[J]. 地理研究, 2012, 31(1):135-143.
- [38] ZHANG F, LIU X P, ZHANG J Q, et al. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China[J]. Ecological modelling, 2017, 349:41-50.
- [39] 向丽, 周伟, 任君, 等. 基于 DPSIRM 模型的高原城市湿地生态安全评价: 以湟水流域西宁段为例[J]. 生态学杂志, 2022, 41(10):2064-2071.
- [40] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [41] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5):1979-1987.
- [42] 张峰, 杨俊, 席建超, 等. 基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2014, 36(4):831-839.
- [43] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2):258-269.
- [44] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1):30-34.
- [45] 孙才志, 孟程程. 中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J]. 地理科学, 2020, 40(12):2094-2104.
- [46] 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.
- [47] 赵磊, 王立权, 戴长雷, 等. 基于 DPSIRM 模型的太原市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2):109-115.
- [48] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4):973-991.
- [49] 李雪铭, 刘凯强, 田深圳, 等. 基于 DPSIR 模型的城市人居环境韧性评价: 以长三角城市群为例[J]. 人文地理, 2022, 37(1):54-62.
- [50] 朱晏君, 李红波, 胡晓亮, 等. 欠发达地区县域乡村社会-生态系统韧性研究: 以山西省静乐县为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1):11-19, 56.
- [51] 于伯华, 吕昌河. 基于 DPSIR 概念模型的农业可持续发展宏观分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(5):68-72.
- [52] 钱田田, 王宏卫, 余芳瑞, 等. 基于 DPSIR 模型的新疆城市生态韧性评估及影响因素分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(5):607-614.
- [53] 曹红军. 浅评 DPSIR 模型[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(增刊 1):110-111, 126.
- [54] 王毅勇, 周超凡, 黄榕, 等. 基于 DPSIR-熵权的陕西省水生态安全评价及障碍诊断分析[J/OL]. [2025-02-15]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406023>.
- [55] 陈翔. 数字化监管视角下水库型水源地生态安全评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [56] 谢贤健, 苟千陶, 吴汉. 重庆市土地利用变化特征及生态敏感性评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6):178-194.
- [57] 杨力, 徐悦, 朱俊奇, 等. 长江中游城市群水生态韧性及影响因素分析[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1):335-347.
- [58] 曹鹏飞, 易雅宁, 王宏洋, 等. 新质生产力导向的现代化节水产业体系构建策略[J/OL]. [2025-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20250205.1526.002.html>.
- [59] 吴艳霞, 邱乐. 关中平原城市群土地生态安全评价[J]. 中国水土保持, 2024(2):52-56.
- [60] 施国良, 薛航. 基于 XGBoost 算法的跨境河流水资源争端影响因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6):137-144.
- [61] 邓朝晖, 刘洋, 薛惠锋. 基于 VAR 模型的水资源利用与经济增长动态关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(6):128-135.
- [62] 王瑗, 盛连喜, 李科, 等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3):10-14.
- [63] 李航. 基于水环境承载力的南昌市污水处理厂布局优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [64] 徐文婷, 谢宗强, 葛结林, 等. 基于 DPSIR 模型的乡村生态景观生物多样性预警[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12):1943-1952.
- [65] 甘荣情, 曾令武, 陈媛, 等. 黄河流域中下游城市水资源节约集约利用能力[J]. 环境科学, 2025, 46(5):2816-2827.
- [66] 齐文华, 金艺华, 尹振浩, 等. 基于 SWAT 模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡分析[J]. 生态学报, 2023, 43(8):3116-3127.
- [67] 甘容, 孔令迪, 郭林, 等. 基于多种方法的信阳市水资源系统韧性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(4):12-19.
- [68] 张永泽, 郑丙辉. 小河流域森林的环境水文效应研究[J]. 水资源保护, 1994, 10(4):22-26.

- [69] 高雅玉, 黄泉, 田晋华, 等. 中国西北干旱生态移民区跨流域调水生态效益研究: 以黄花滩生态移民区为例[J/OL]. [2025-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20250327.1721.004.html>.
- [70] 王煜, 万芳, 王威浩, 等. 流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理[J]. 水科学进展, 2025, 36(2):190-203.
- [71] 刘国锋, 徐跑, 吴霆, 等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 225-233.
- [72] 秦琦. 城市景观生态环境需水规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [73] 王智翔. 基于 TOPSIS-BP 模型湘江流域水资源承载力评价与预警研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [74] 谭炳卿, 吴培任, 宋国君. 论淮河流域水污染及其防治[J]. 水资源保护, 2005, 21(6):4-10.
- [75] 肖瑶. 长江经济带环境保护投资效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [76] 李加林, 田鹏, 刘永超, 等. 水资源、水环境、水生态系统治理研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版), 2024, 37(4):22-30.
- [77] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7398-7409.
- [78] 刘江涛, 杨伟明. 基于可持续和韧性目标的深圳市污水规划指标体系构建[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 19-24.
- [79] 康绍忠, 胡笑涛, 蔡焕杰, 等. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J]. 水利学报, 2004, 35(12):1-7.

Connotation analysis and resilience assessment index system development for the water resources-water environment-water ecology coupled system

LIU Yongchao^{1,2,3}, DU Zhengxuan³, SHI Qi³, YING Chao³, LI Jialin^{1,2,3}

(1.Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Donghai Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The integrated governance of water resources, water environment, and water ecology (hereinafter referred to as “Three-Water Coordination”) represents an essential pathway for advancing China’s sustainable water management strategy in the new era. The resilience-based “Three-Water Coordination” concept aligns with sustainable development goals and has increasingly attracted the attentions of scholars. However, in-depth studies systematically interpreting its conceptual connotation and scientifically constructing the resilience assessment indicators remain limited. This study systematically elaborates the conceptual framework and multidimensional attributes (covering resource, environmental, ecological, and managerial dimensions) of the coupled system comprising water resources, water environment, and water ecology (collectively referred to as the “three waters”). It defines the scientific connotation of its resilience. This resilience is characterized by the organic integration of the system’s disturbance resistance, adaptive regulation capability, steady-state recovery capacity, and transformative potential, under dual pressures of natural variation and human activities, through the coupling mechanism of sustainable water resource allocation, positive water environmental cycles, and the co-evolution of aquatic ecosystems. Based on this foundation, and by incorporating dynamic coupling theory in complex systems, this study develops a resilience assessment index system for the three-water coupled system, which is structured around the criteria layers of driving forces, pressures, states, impacts, responses, and management. The aim is to provide a scientific foundation for the quantitative assessment of resilience capacity and to support the implementation of the ecological civilization strategy.

Keywords: water resources-water environment-water ecology coupled system; connotation analysis; resilience assessment; index system

(责任编辑 史小丽)