

立体水网构建对云南省水资源系统韧性的提升效应

赵钟楠¹, 刘震¹, 李光轩^{1,2,3}, 陈康¹, 杨萌祺¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院; 2. 北京大学环境科学与工程学院; 3. 水沙科学教育部重点实验室)

摘要:针对变化环境下云南省水资源时空分布不均与供需矛盾加剧的问题,以重大引调水工程为骨架,确立了“一主四片、西水东引、立体调配、多源互济”的云南省现代化立体水网空间格局,构建了涵盖抵抗性、恢复性、适应性的水资源系统韧性评价指标体系,引入加速遗传算法优化的投影寻踪模型,对比分析了基准年(2021年)与规划水平年(2035年)的水资源系统韧性,量化了立体水网构建对水资源系统韧性的提升效应。结果表明:单位面积水资源总量、缺水率、灌溉水利用效率、万元工业增加值用水量、单位面积已建成水库总库容等指标对云南省水资源系统韧性的影响较大;2021年云南水资源系统韧性为1.251,呈现西南片区较高、中部片区与全省持平、西北片区偏低的空间格局;2035年立体水网建成后,云南省水资源系统韧性显著提升,全省增幅达61.6%,16市(州)增幅范围为32.9%~101.5%。

关键词:立体水网;水资源系统韧性;投影寻踪模型;云南省

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2026)05-0130-09

Improvement effect of three-dimensional water network construction on water resources system resilience in Yunnan Province//Zhao Zhongnan¹, Liu Zhen¹, Li Guangxuan^{1,2,3}, Chen Kang¹, Yang Mengqi¹(1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, MWR; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University; 3. Key Laboratory of Water and Sediment Science, Ministry of Education)

Abstract: To address the uneven spatial-temporal distribution of water resources and the intensifying contradiction between water supply and demand in Yunnan Province under changing environments, a modern three-dimensional water network spatial pattern for Yunnan Province characterized by “one main region and four sub-regions, water transfer from west to east, three-dimensional allocation and multi-source mutual replenishment” is established with major water diversion and transfer projects as the backbone. The evaluation index system for water resources system resilience covering resistance, recovery, and adaptability was established. The projection pursuit model optimized by accelerated genetic algorithm was employed to compare and analyze the water resources system resilience in the benchmark year (2021) and the planning target year (2035), quantitatively revealing the improvement effect of the three-dimensional water network construction on water resources system resilience. The results indicate that indicators such as total water resources per unit area, water shortage rate, irrigation water use efficiency, water consumption per 10000 yuan of industrial added value, and total storage capacity of completed reservoirs per unit area have significant impacts on water resources system resilience. In 2021, the water resources system resilience of Yunnan Province was 1.251, presenting a spatial pattern of higher in the southwest region, consistent with the provincial average in the central region, and lower in the northwest region. After the completion of the three-dimensional water network in 2035, the water resources system resilience of Yunnan Province will be significantly improved, with a provincial-wide increase of 61.6% and an increase range of 32.9%-101.5% across the 16 cities (prefectures).

Key words: three-dimensional water network; water resources system resilience; projection pursuit model; Yunnan Province

在全球气候变化与人类活动强化的背景下,作为我国重要的生态安全屏障和水源涵养地,云南省

水资源系统正面临严峻挑战^[1-3]。在极端气候事件频发与流域开发强度加剧的叠加影响下,云南水资

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211303);水利部水利水电规划设计总院“揭榜挂帅”项目(基于新质生产力视角的水利发展规划编制理论技术与数字信息平台构建)

作者简介:赵钟楠(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:zhaozhongnan@giwp.org.cn

通信作者:李光轩(1994—),男,工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:liguangxuan@tju.edu.cn

源调节能力不足,旱涝灾害频发且危害严重^[4-6]。《云南省第三次水资源调查评价》显示,云南省干旱具有频率高、范围广、持续久、损失重的特点,1980—2016 年年均受旱面积占农作物播种面积的 20%且造成数百万人畜饮水困难;洪涝则多由局地强降雨引发,突发性强、破坏力大,约 30%的人口、30%的耕地常年受洪水威胁,60%的工农业总产值也面临洪灾风险。同时,水生态退化风险加剧^[7-8],跨界水冲突潜在隐患增加^[9]。因此,水资源问题已成为制约云南经济社会可持续发展的关键瓶颈。

水资源系统韧性反映系统在外界扰动下的抵抗、恢复与适应能力,是实现区域水安全与水资源可持续利用的重要指标^[10-12]。随着国家水网战略的推进,构建多源互补、调控灵活的水网体系为提升水资源系统韧性提供了新路径。立体水网突破了传统“点-线”平面架构,是地表、土壤、地下互馈作用下“点-线-面-体”结合的三维立体网络,其核心内涵体现为水流立体、要素立体与功能立体^[13-14]。云南省结合自身区域特色构建现代化立体水网,以滇中引水等重大工程为“纲”、河湖水系连通为“目”、控制性水源工程为“结”,能够通过“西水东引”缓解水资源空间分布不均,通过水资源配置工程互联互通与控制性水源工程建设应对极端旱涝灾害,通过“多源互济”全面提升系统抵抗、恢复、适应能力^[15-17]。

当前,水网与水资源系统韧性相结合的研究主要从两个层面开展:①将水网相关工程与系统配置要素纳入水资源系统韧性评估指标体系;②分析水网建成后对水资源系统韧性评估指标或结果的影响,进而量化其对水资源系统韧性的提升作用^[18-23]。例如:郑小康等^[11]将龙羊峡水库补水贡献率和外调水增供贡献率纳入黄河流域水资源系统韧性评价指标体系,并提出提高系统恢复性需要重视和利用好龙羊峡水库的多年径流调节能力和国家水网南水北调东中线调水工程置换供水;王煜等^[18]以汾河流域为例,基于水资源系统复杂网络理论构建了气象-水文-社会经济-生态-工程多维评价体系,揭示了水资源系统韧性的复杂驱动机制;万芳等^[19]将水库供水量和引调水工程供水量纳入汾河流域水资源系统韧性评估指标体系,发现 2035 年水网构建初步完成后流域水资源系统韧性显著提升;冯仲恺等^[20]构建了长江流域气象-水文-社会经济-生态-水利工程多维耦合风险网络,探究了南水北调工程(国家水网中“纲”的代表)、三峡工程(国家水网中“结”的代表)等对连通性和系统韧性的提升作用;刘为锋等^[21]研究发现“荆楚安澜”现代水网建成后,湖北省水资源空间均衡状态将得到较大改善;黄生

志等^[22]以关中地区为研究区,将水网疏密度、节点间互联互通性纳入水资源系统韧性评估指标体系,发现水网工程建设后水资源系统韧性相比水网工程建设前提高了 41.59%。然而,现有研究尚存在两方面不足:①研究尺度与实践脱节,多聚焦于自然流域尺度,而国家水网建设及省(市)级水网规划多以行政单元为主体,尺度匹配性不够;②研究视角欠缺,现有研究多侧重于韧性指标的静态评价或单一工程的影响分析,缺乏对水网空间格局与系统韧性之间动态、定量耦合关系的深入探讨,难以支撑水网工程的科学布局与韧性提升的精准施策。

针对上述研究的不足,结合云南省作为我国重要的生态安全屏障和水源涵养地,但水资源系统面临严峻挑战的现实背景,本文以云南省为研究区,围绕“水网构建与水资源系统韧性提升”的核心目标,构建“水资源系统韧性评估-水网空间格局解析-水网构建对韧性影响量化”的技术框架并开展研究,以期云南省在变化环境下的水网优化布局及区域水安全保障提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

云南省地处我国西南边陲,是面向南亚东南亚和环印度洋地区开放的大通道,也是“一带一路”与长江经济带的重要交汇点,下辖 16 个市(州)(图 1)。云南省境内河流分属长江、珠江等六大水系,云南省水网是国家水网与西南区域水网的重要组成部分,云南省为国家骨干输水通道与战略储备水源接续通道所在地^[24-25]。云南省水资源总量相

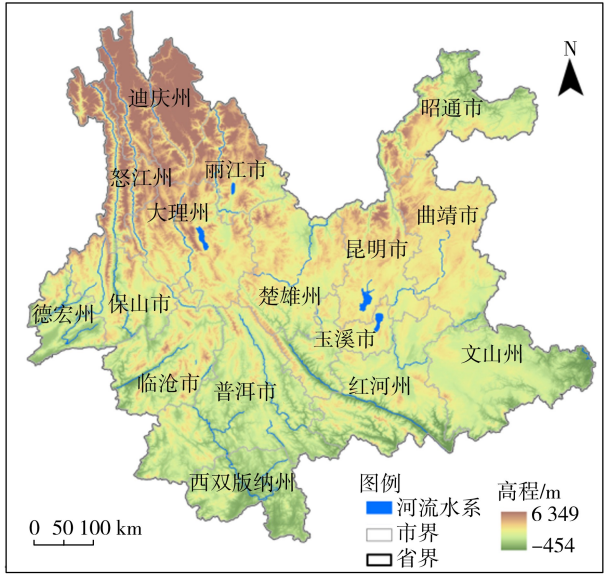


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

对丰富,多年平均降水量为 1 278.8 mm,多年平均水资源量为 2 141 亿 m³,人均水资源量为 4 565 m³,九大高原湖泊总储水量为 304 亿 m³,入境水量为 1 127 亿 m³,出境水量为 3 191 亿 m³,但时空分布不均,呈现夏汛冬枯、西多东少、南多北少的特征,区域水资源富集程度差异悬殊^[26]。加之,云南省位于我国地势第一、二级阶梯过渡地带,属典型山地高原地形,山脉高耸、河谷深切,平均海拔约 2 000 m。坝子作为云贵高原山间冲积盆地与平缓河谷地带,是区域耕地、人口与水资源集中分布核心区,其面积仅占总面积的 6%。云南省 74% 的面积为 15°以上陡坡,77% 的耕地为 6°以上的坡耕地,重点坝子与水源高程差显著,呈现“田高、人高、城高、水低”的分布格局,致使水资源开发利用难度大、成本高,是全省工程性缺水突出、水网构建难度大的根本地形条件,也凸显了立体水网建设的必要性与重要性。

1.2 数据来源

本文搜集整理了云南省 16 市(州)的气象、水文、社会经济、水网建设等数据,来源于第三次全国水资源调查评价、《云南省水资源公报》《云南省水网建设规划》等。其中,各市(州)未来的降水量和水资源总量数据以第三次全国水资源调查评价中 1956—2016 年降水量和水资源总量数据为基础,利用随机森林模型预测得到,具体过程见文献[27-28]。

2 研究方法

本文首先从立体水网视角界定水资源系统韧性的内涵;其次引入加速遗传算法优化的投影寻踪模型,构建涵盖抵抗性、恢复性、适应性的水资源系统韧性评价指标体系;进而详细阐述云南省现代化立体水网体系的空间布局及水资源优化配置思路;最后通过对比基准年(2021 年)与规划水平年(2035 年)的水资源系统韧性评价结果,系统分析云南省立体水网构建对 16 市(州)水资源系统韧性的提升效应,并识别关键影响因子与空间差异特征。研究流程见图 2。

2.1 立体水网视角下的水资源系统韧性内涵界定

韧性一词最初源于物理学,指物体受外力挤压后的回弹特性,现已广泛应用于经济学、地理学、生态学、环境科学等领域,通常被定义为系统在遭受冲击后所具备的抵抗、恢复、适应与转变的能力^[11]。流域水资源系统是气象水文、水网、经济社会、生态环境相互耦合的复杂系统,当前立体水网建设已深度融入区域水资源开发利用与调控全过程,成为水资源系统中的关键组成部分^[19]。基于此,本文将立

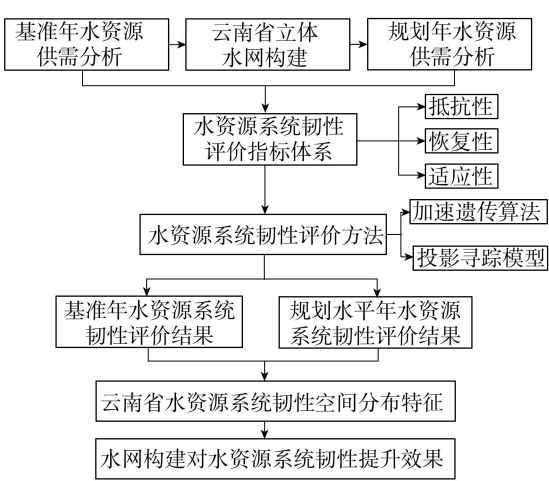


图 2 研究流程

Fig. 2 Research process

体水网视角下的水资源系统韧性界定为:在气候变化、干旱枯水等外部扰动下,系统依托立体水网的水流调配、要素耦合与功能协同机制,通过动态调控与自适应调整维持结构稳定、功能持续与服务可靠的综合能力,主要包括扰动前维持系统稳态的能力以及扰动后通过多源补给、工程调度与协同调控快速适应并恢复至稳定运行状态的能力^[11]。

立体水网视角下的水资源系统韧性具有多维度交织、动态传递与非线性演化的复杂特征,受系统、空间、时间多重因素共同影响。系统维度上,气象水文、经济社会、基础设施等网络要素联动决定韧性基础;空间维度上,区域发展差异、水资源短缺、水灾害与水环境问题共同构成主要扰动;时间维度上,极端天气等急性冲击与经济社会发展、供需结构变化等慢性压力共同驱动韧性演变。由于立体水网具备网络化传导特性^[11-12],单一节点或维度的风险易引发连锁扩散,进而影响整体供需平衡与系统韧性,从理论层面凸显了立体水网在提升区域水资源系统韧性中的关键作用^[18-19,22]。

2.2 水资源系统韧性评价指标体系构建

图 3 为云南省水资源系统韧性评价指标体系。准则层划分为抵抗性、恢复性、适应性 3 个维度,分别对应云南省水资源系统应对干旱、洪涝等外部扰动时的基础防御能力、扰动后功能回补能力及系统长期动态适配能力,契合云南省立体水网“水流立体、要素立体、功能立体”的构建逻辑,同时兼顾区域工程性缺水突出、水资源开发利用难度大的现实特征。其中,抵抗性表征云南省水资源系统在面对气候变化、枯水缺水等扰动时,依托自然资源禀赋与基础供水保障能力,维持系统平衡、抵御扰动影响的基础能力,主要考虑天然水文禀赋、人口资源匹配度、水资源供需基础状态等影响因素;恢复性表征云

南省水资源系统受扰动导致性能降低后,通过优化用水结构、提升用水效率等社会经济维度的干预调整,回补供水缺口、恢复正常运行状态的能力,主要考虑用水结构优化、水资源利用效率提升等核心影响因素;适应性表征云南省水资源系统在长期扰动下,依托水利工程建设、生态用水保障、水资源循环利用等立体水网工程与管理措施,实现系统结构、功能与外部环境动态适配的可持续调节能力,主要考虑生态用水保障、水利工程调控、水资源循环利用及河网连通性等影响因素。

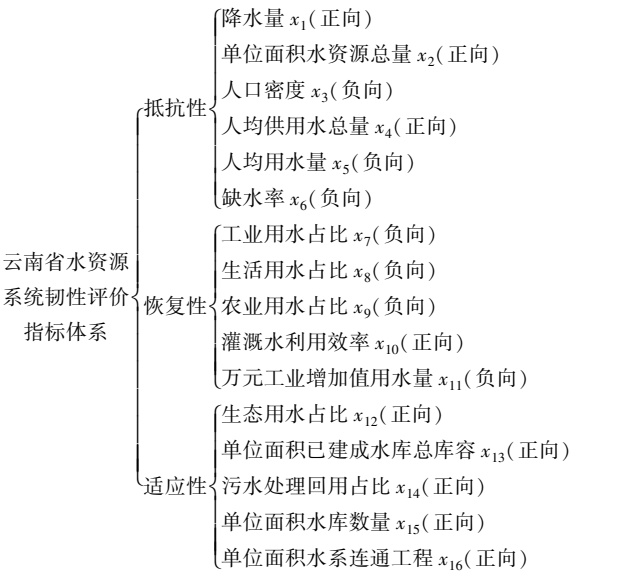


图3 云南省水资源系统韧性评价指标体系

Fig.3 Evaluation index system of water resources system resilience of Yunnan Province

指标层基于云南省水资源开发利用实际与数据可得性,参照相关研究成果^[11-12,18-19,22]建立。共选取16项指标,全面覆盖准则层3个维度,正向指标的指标值越大水资源系统韧性水平越高,负向指标的指标值越大水资源系统韧性水平越低。抵抗性维度的降水量、单位面积水资源总量为自然资源禀赋类指标,直接反映区域水资源自然抵抗基础;人口密度、人均供用水量、人均用水量、缺水率从人口资源匹配、供水保障、用水消耗、供需缺口角度体现系统应对扰动的基础保障能力。恢复性维度的5项指标聚焦用水结构优化与水资源利用效率提升,直接反映系统受扰动后通过用水调控回补效能的潜力。适应性维度的5项指标紧扣云南立体水网工程建设、生态水资源保障与水资源循环利用核心要求,从生态保障、工程调控、循环利用、水系连通等角度,体现系统长期适配外部环境的可持续调节能力。

2.3 水资源系统韧性评估方法

投影寻踪模型作为无先验分布假设的统计工具,能够有效适配高维、非正态、非线性特征的数据

集分析,最大特点是不要求数据服从正态分布,其核心思想在于通过降维与寻优的双向过程,挖掘高维数据中隐藏的有价值结构信息^[29]。传统高维数据处理方法常因维度灾难导致信息冗余或有效信号被掩盖,而投影寻踪模型通过构建合理的投影准则与优化算法能够有效解决这一问题^[30]。加速遗传算法是在传统遗传算法基础上,针对其迭代收敛速度慢、易陷入局部最优等缺陷提出的改进型智能优化算法,核心思路是通过优化种群生成机制与搜索空间收缩策略加快收敛速度、提高全局寻优能力,在保证寻优精度的同时大幅提升计算效率,尤其适用于投影寻踪模型中高维投影方向的快速搜索任务^[31-32]。本文采用加速遗传算法优化投影寻踪模型,用于评估水资源系统韧性^[31-33]。首先,对不同量纲评价指标做标准化处理以剔除量纲影响;其次,构建投影指标函数,要求投影点局部高度集聚成团、团间充分离散,并依托投影方向计算样本投影值;再次,利用加速遗传算法求解投影指标函数最大值对应的最优投影方向,该方向可充分表征多维数据结构特征;最后,将标准化指标值代入模型,以最优投影方向作为指标权重,从而得到投影值,即水资源系统韧性值。参照以往研究^[21,29],根据水资源系统韧性值对水资源系统韧性等级进行划分:0~1、>1~1.5、>1.5~2、>2分别为低、较低、较高、高等级。

3 结果与分析

3.1 指标权重分析

表1为云南省水资源系统韧性评价指标权重。不同指标的权重呈显著差异化特征,其分布从抵抗性、恢复性、适应性3个维度揭示了各指标对水资源系统韧性的贡献水平。抵抗性作为系统抗干扰稳定能力(防御基础),缺水率权重最大,值越低则系统抵抗用水短缺的能力越高,是防御基础的核心决定因素;单位面积水资源总量次之,作为关键存量指标,充足的水资源禀赋为系统抵御干旱、用水需求激增等干扰提供核心支撑,显著提升抗压阈值;降水量第三,通过影响水资源补给稳定性作用于抵抗性;人均供用水量权重最小。恢复性聚焦系统扰动后修复效率,灌溉水利用效率占据主导地位,该指标数值越高,扰动发生后农业用水供需压力越小,系统恢复稳态的速度越快;万元工业增加值用水量次之,其为负向指标,值越低意味着工业用水效率越高,系统面临工业用水短缺或污染扰动时,恢复正常生产用水的压力越小,修复效率越高;工业、生活、农业用水占比对修复速度影响有限,权重均较低。适应性反映系统调整结构或策略以适应环境变化的能力,单位

面积已建成水库总库容权重最大,通过基础设施投入增强系统水资源分配调整能力,提升面对气候变化、区域用水失衡等环境变化的适应潜力;单位面积水系连通工程与单位面积水库数量权重差距有限,前者优化水资源空间配置,后者提升调蓄灵活性,二者协同强化系统调整能力;污水处理回用占比权重较小,通过水资源循环利用的结构调整,助力系统适应水资源短缺环境;生态用水占比权重最小。

表 1 云南省水资源系统韧性评价指标权重
Table 1 Weights of evaluation indicators for water resources system resilience of Yunnan Province

抵抗性指标		恢复性指标		适应性指标	
指标	权重	指标	权重	指标	权重
x_1	0.201	x_7	0.155	x_{12}	0.053
x_2	0.354	x_8	0.152	x_{13}	0.267
x_3	0.102	x_9	0.062	x_{14}	0.185
x_4	0.072	x_{10}	0.467	x_{15}	0.188
x_5	0.146	x_{11}	0.372	x_{16}	0.252
x_6	0.428				

3.2 立体水网构建

3.2.1 总体思路

以云南省现有河湖水系分布和水利基础设施为基础,针对其山高坝少、水土资源开发利用难度大的特点,坚持高水高用、自流为主、适度提水的原则,提出“一主四片、西水东引、立体调配、多源互济”的现代化立体水网空间架构^[15]。其中,“一主四片”明确了水网的空间核心与分区架构,“一主”聚焦滇中区域,作为水网配置的核心枢纽,“四片”涵盖滇东北、滇东南、滇西北、滇西南四大片区,实现对全省重点区域的水资源覆盖;“西水东引”以重大的滇中引水工程为核心干线,着力将金沙江流域的优质水资源定向输送至滇中地区,破解该区域的水资源供需矛盾;“立体调配”遵循水流自然演进规律,确定自流引水与适度提水的合理比例,通过立体化的水资源调度模式,一方面逐步保障不同海拔区域的城乡生活用水与高原特色农业灌溉需求,另一方面着力改善高原河湖生态环境质量,同时科学规划重点区域的洪涝排水通道,确保水网综合效能的充分发挥;“多源互济”则着眼构建多元化的水资源保障网络,以滇中引水等跨区域引调水工程为核心水源,辅以大中型水电站的水资源综合利用项目及中小型水库等设施作为重要补充,最终形成联网联供、多源互济、调配自如、保障有力的现代化配置体系。

3.2.2 构建方案

立足云南省高原地形特征与水资源时空分布不均的实际,紧扣全省经济社会高质量发展对水安全保障的迫切需求,以“节水优先、空间均衡、系统治

理、两手发力”的治水思路为指引,坚持工程措施与非工程措施相结合,以重大引调水、重点水源、水电站综合利用工程为骨干,以城乡供水一体化、特色农业灌溉为延伸,构建现代化立体水网体系,全面提升水资源优化配置能力、供水保障能力和水生态保护能力。

a. 推进重大引调水工程建设。重大引调水工程是现代化立体水网的“大动脉”,核心功能是跨流域统筹调配水资源,其作用在于强化骨干支撑、畅通调配通道、夯实互联互通基础。加快推进滇中引水工程建设,同步推进牛栏江德泽水库引水济曲等工程,适时开展跨流域跨区域水资源配置工程前期论证和建设工作,着力增强流域间、区域间水资源统筹调配能力,并夯实城乡供水保障基础。

b. 加强重点水源工程建设。充分挖掘现有水源工程供水潜力,最大化提升工程使用效率与效益,实现存量提质升级。加快推进已建大中型水库清淤扩容、供水配套设施改造,积极推进已规划的桃源水库等大中型水库建设;在此基础上,提前谋划重点水源工程前期工作,强化项目储备。

c. 加快水电站综合利用工程建设。通过优化调度模式,有效衔接水力发电与水资源优化配置功能,将水电站水资源综合利用作为盘活现有水电资源、优化区域水资源配置的有效手段。重点推进龙开口、鲁地拉等水电站水资源综合利用工程建设,着力提升区域供水安全保障能力。

d. 构建城乡供水新格局。依托现有城乡供水体系,以基础设施均等化为导向,加强重大引调水及重点水源等骨干工程的延伸配套,扩大农村人饮供水覆盖范围,逐步替代受水区水井等分散式水源。因地制宜建设应急备用水源,完善极端情况供水应急预案。推进城镇供水管网延伸、配套改造与连通并网,提高农村自来水普及率和供水保证率。实施总投资 573 亿元的城乡供水一体化行动,推进建设项目数量达到 3 729,力争解决 2 041 万人高品质供水问题^[15]。

e. 推进高原特色农业灌溉发展。以高原特色现代农业发展需求为牵引,契合“五区四带”农业空间格局,坚持宜坡则坡、宜梯则梯,依托水网骨干工程提升灌溉供水保障能力,建设旱能灌、涝能排的高原特色现代化灌区,打造水土平衡、灌排得当、生态绿色、立体调配、节约高效的新时代元阳梯田模式。规划实施总投资 1 600 亿元的弥泸灌区、宣威灌区、潞江坝灌区、罗师灌区等 37 个大型灌区,建成后将新增和改善灌溉面积 1 万 km² 以上^[15]。

3.3 水资源系统韧性提升效果

表 2 为云南省及各市(州)基准年与规划水平年水资源系统韧性对比。由表 2 可见,基准年云南省整体韧性值为 1.251,区域韧性水平呈现显著的空间分异特征。在 16 个市(州)基准年评估结果中,德宏州韧性值达 1.650,位居全省首位;临沧市、普洱市、文山州、保山市韧性值均不低于 1.3;昆明市、玉溪市、丽江市、红河州、西双版纳州韧性值与全省平均水平大体相当;曲靖市、大理州、昭通市、怒江州、楚雄州韧性值介于 1.051~1.081 之间;迪庆州韧性值是全省唯一韧性值低于 1 的市(州),水资源系统抵御各类扰动的能力偏弱。规划水平年的评估结果中,立体水网构建使全省水资源系统韧性水平由 1.251 提升至 2.022,整体提升幅度达 61.6%,达到高韧性水平。就空间演化特征而言,所有市(州)均呈正向演进态势。昆明、曲靖、保山、普洱、怒江 5 市(州)由较低韧性提升至高韧性;玉溪、昭通、丽江、临沧、楚雄、红河、文山、西双版纳、大理 9 市(州)由较低韧性提升至较高韧性;德宏州由较高韧性提升至高韧性;迪庆州由低韧性提升至较高韧性。

表 2 云南省及各市(州)基准年与规划水平年
水资源系统韧性对比

Table 2 Comparison of water resources system resilience between reference year and planning level year in Yunnan Province and each city (prefecture)

行政区	基准年		规划水平年		立体水网 提升效应/%
	韧性值	韧性等级	韧性值	韧性等级	
昆明市	1.256	较低	2.087	高	66.2
曲靖市	1.080	较低	2.013	高	86.4
玉溪市	1.251	较低	1.986	较高	58.8
保山市	1.300	较低	2.118	高	62.9
昭通市	1.067	较低	1.874	较高	75.6
丽江市	1.251	较低	1.663	较高	32.9
普洱市	1.394	较低	2.103	高	50.9
临沧市	1.447	较低	1.991	较高	37.6
楚雄州	1.051	较低	1.897	较高	80.5
红河州	1.251	较低	1.985	较高	58.7
文山州	1.359	较低	1.873	较高	37.8
西双版纳州	1.251	较低	1.911	较高	52.8
大理州	1.081	较低	1.910	较高	76.7
德宏州	1.650	较高	2.228	高	35.0
怒江州	1.066	较低	2.148	高	101.5
迪庆州	0.861	低	1.539	较高	78.7
云南省	1.251	较低	2.022	高	61.6

进一步分析驱动因素,从权重最高的 4 项核心指标(灌溉水利用效率、缺水率、万元工业增加值用水量和单位面积水资源总量)来看,德宏、普洱、临沧等市(州)水资源系统韧性较高,主要得益于其地处滇西南湿润多雨区,分别是怒江、澜沧江等国际河流干流或重要支流流经区域,单位面积水资源总量

相对充裕,同时受地形与人口分布影响,水资源供需矛盾相对缓和,缺水率控制在较低水平,灌溉水利用效率与万元工业增加值用水量也处于稳健区间,优越的天然水资源禀赋与相对较低的开发利用压力共同筑牢了系统抗扰动基础。而迪庆、楚雄、怒江等市(州)水资源系统韧性偏低,楚雄州由于地处滇中干旱区,降水偏少且河流量有限,水资源本底薄弱,加之工业布局集中但节水技术应用滞后,万元工业增加值用水量偏高;迪庆州地处高寒山区,怒江州地处高山峡谷区,两地均受复杂地形制约,农业生产条件受限,水利基础设施薄弱,灌溉水利用效率排名靠后,工程性缺水问题与生态脆弱性叠加。

图 4 为云南省水资源系统韧性等级空间分布。由图 4 可见,云南省水资源系统韧性呈现“西南片区较高、中部片区与全省持平、西北片区偏低”的空间格局。整体来看,缺水矛盾的有效缓解是多数市(州)水资源系统韧性提升的核心驱动之一,本质上是云南省现代化立体水网“一主四片、西水东引、立体调配、多源互济”建设布局落地见效的体现。滇

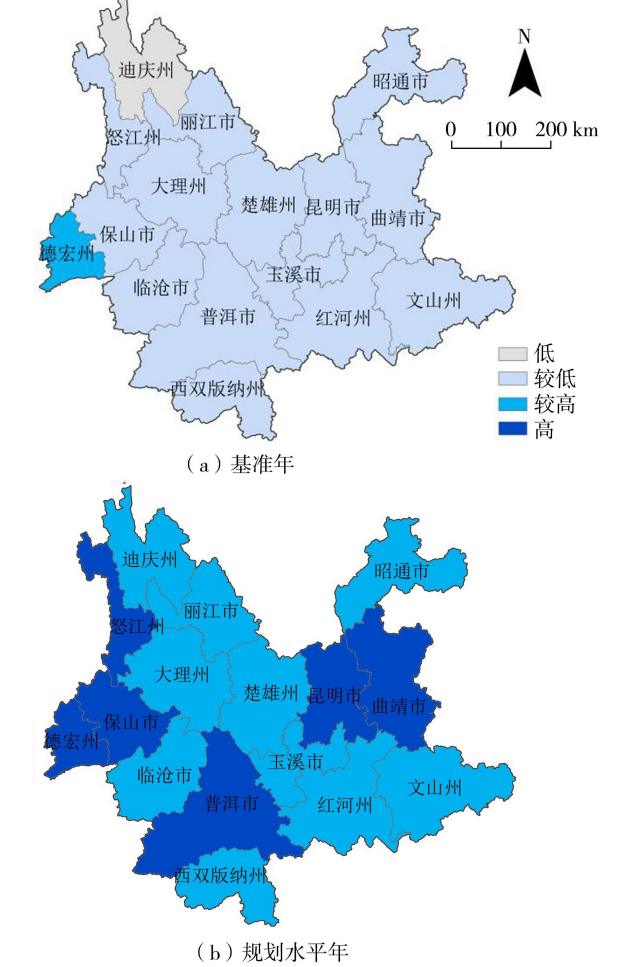


图 4 云南省水资源系统韧性等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of resilience levels of water resources system in Yunnan Province

中引水等重大引调水工程畅通了跨流域配置通道,重点水源与水电站综合利用工程盘活了存量水资源,立体调配与多源互济策略破解了高原地形导致的“水低田高”开发难题;与此同时,灌溉水利用效率提升与万元工业增加值用水量下降则与高原特色现代化灌区建设、城乡供水一体化改造及工业节水技术推广深度绑定。在水资源刚性约束趋紧背景下,各市(州)依托现代化立体水网建设,针对不同缺水类型精准施策,更加注重水资源高效利用与供需匹配,最终推动全省水资源系统韧性整体提升。

从规划水平年相对于基准年的提升幅度差异来看,以曲靖、大理、昭通、怒江为代表的市(州)提升幅度尤为显著(增幅超 75%),主要因其基准年水利基础设施短板突出、工程性缺水严重,韧性基础薄弱,依托立体水网建设补齐水源工程短板后实现显著提升;楚雄州提升幅度同样显著(增幅 80.5%),但其成因不同,地处滇中干旱核心区,通过滇中引水工程从根本上缓解了资源性缺水;迪庆州虽初始韧性值全省最低,但依托立体水网建设破解高寒山区水利瓶颈,提升幅度达 78.7%。相比之下,德宏、临沧、文山、丽江等市(州)因基准年多项核心指标已处于较优水平,水网建设以单点巩固和提升为主,整体改善空间相对有限,提升幅度相对较小(增幅 32.9%~37.8%)。

4 讨 论

从水资源系统韧性评估过程来看,本文采用“抵抗性-恢复性-适应性”框架,核心内涵与现有水资源韧性研究一致,但各维度核心驱动指标具有区域特色,差异源于研究区水资源禀赋、工程基础及用水结构的区域特征。抵抗性维度,云南省以缺水率和单位面积水资源总量为核心,系统防御能力取决于缺水状态与水资源禀赋;黄河流域则聚焦农业及河道内生态水量可压缩率,根源在于前者主要为工程性缺水,后者主要为资源性缺水,抵抗性主要依赖缺水条件下水资源的可压缩性^[11]。恢复性维度,云南省以灌溉水利用效率和万元工业增加值用水量为主,侧重内部用水效率提升;关中地区以地下水供水占比和非常规水供水比例为关键,体现重大跨流域调水工程实施后,区域供水转向“外部补给为主、本地水源为补充”的特征^[22]。适应性维度,云南省以单位面积已建成水库总库容、单位面积水系连通工程为核心,聚焦本地调控;汾河流域则强调引调水工程供水量,凸显外源补给的重要性^[19],这与两地水资源格局密切相关,云南水资源丰沛但时空分布不均,汾河流域水资源短缺。

从水资源系统韧性评估结果来看,各地研究均验证了水网建设对水资源系统韧性的核心支撑作用。黄河流域水资源系统韧性主控因子包含了外调水增供贡献率等外部补给型指标,证明其主要利用水网工程中的跨流域调水弥补资源性缺水^[11];关中地区引入水网疏密度和节点重要性等网络结构型指标,反映重大引调水工程构建水网骨架后对互联互通的更高要求^[22];汾河流域通过水网体系加强地表水和地下水统一调配,扩大引黄工程规模,聚焦工程供水保障能力的直接提升^[19]。本文中,云南省则通过立体水网建设,依托水库群调蓄与河网连通优化本地水资源时空配置。这一对比表明,水网工程是提升区域水安全韧性的共性手段。

5 结 论

a. 构建了云南省水资源系统韧性评价指标体系。云南省水资源系统韧性指标权重呈显著差异化特征,单位面积水资源总量、缺水率、灌溉水利用效率、万元工业增加值用水量和单位面积已建成水库总库容对水资源系统韧性的影响较大。

b. 进一步阐明了以重大引调水工程为骨架、调蓄水库为节点,集水资源优化配置、水生态保护与防洪减灾功能于一体的云南省现代化立体水网体系,确立了“一主四片、西水东引、立体调配、多源互济”的空间优化格局。

c. 2021 年云南省水资源系统整体韧性值为 1.251,空间分布呈西南高、中部持平、西北低的特征;2035 年立体水网建设使全省韧性增幅达 61.6%,16 市(州)韧性均显著提升,验证了立体水网的核心支撑作用。

d. 通过与以往研究的对比分析,明确了水网工程是提升水资源系统韧性的共性手段,提升路径需适配区域水资源禀赋。

参考文献:

[1] 张洪森,角媛梅,陈凡,等. 云南九大高原湖泊流域人类活动强度对水质的多尺度影响[J]. 湖泊科学,2024,36(2):430-442. (Zhang Hongsen, Jiao Yuanmei, Chen Fan, et al. Multi-scale impacts of human activity intensity on water quality in nine plateau lake basins in Yunnan Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2):430-442. (in Chinese))

[2] 刘小刚,普嘉鹏,韩焕豪,等. 未来气候变化下中国西南地区节水抗旱稻适生区变化特征研究[J]. 农业机械学报,2025,56(7):618-626. (Liu Xiaogang, Pu Jiapeng, Han Huanhao, et al. Suitability area of water-saving and drought-resistant rice cultivation in Southwest China under

- future climate scenarios [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56 (7) : 618-626. (in Chinese))
- [3] 马杏,何燕,何雁东,等. 气候变化对云南省水资源影响研究进展综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015,37(4):516-525. (Ma Xing, He Yan, He Yandong, et al. On the impact of climate change on water resources in Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan University, 2015,37(4):516-525. (in Chinese))
- [4] 杨云源,彭海英,陈瑞,等. 基于 CSPI 的云南省 1961—2016 年六大流域季节干旱差异分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41 (8) : 130-138. (Yang Yunyuan, Peng Haiying, Chen Rui, et al. Seasonal droughts from 1961 to 2016 in the six basins across Yunnan Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(8):130-138. (in Chinese))
- [5] 金燕,况雪源,晏红明,等. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象, 2018, 44 (9) : 1169-1178. (Jin Yan, Kuang Xueyuan, Yan Hongming, et al. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44 (9) : 1169-1178. (in Chinese))
- [6] 唐露芳,黄义忠. 基于气象—农业综合干旱指数的云南省干旱时空演变特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56 (12) : 54-66. (Tang Lufang, Huang Yizhong. Spatiotemporal evolution characteristics of drought in Yunnan Province based on meteorological-agricultural comprehensive drought index [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56 (12) : 54-66. (in Chinese))
- [7] 皇甫萌娜,李冲,赵乾佐,等. 西南地区不同下垫面干旱传播特征及差异分析[J]. 水资源保护, 2026, 42 (5) : 108-119. (Huangfu Mengna, Li Chong, Zhao Qianzuo, et al. Characteristics and differences analysis of drought propagation under various underlying surfaces in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2026, 42 (5) 108-119. (in Chinese))
- [8] 石朋,唐汉,瞿思敏,等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1) : 49-56. (Shi Peng, Tang Han, Qu Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1) : 49-56. (in Chinese))
- [9] 王思涵. 澜沧江-湄公河跨界水污染防治机制研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.
- [10] Scanlon B R, Fakhreddine S, Rateb A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4 (2) : 87-101.
- [11] 郑小康,王煜,张迪,等. 黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略[J]. 水利学报, 2025, 56 (10) : 1253-1266. (Zheng Xiaokang, Wang Yu, Zhang Di, et al. Driving factors and regulation strategies for resilience of water resources system in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (10) : 1253-1266. (in Chinese))
- [12] 张小丽,姜力荣,马睿,等. 基于可变毕达哥拉斯模糊和 VIKOR 耦合方法的冀中南地区水资源系统韧性评价[J]. 水资源保护, 2026, 42 (2) : 190-198. (Zhang Xiaoli, Jiang Lirong, Ma Rui, et al. Evaluation of water resources system resilience based on variable Pythagorean fuzzy and VIKOR coupling method in central and southern regions of Hebei Province [J]. Water Resources Protection, 2026, 42 (2) : 190-198. (in Chinese))
- [13] 严登华,袁喆,严登明,等. 立体水网理论内涵、功能特征及技术框架[J]. 水科学进展, 2026, 37 (1) : 1-12. (Yan Denghua, Yuan Zhe, Yan Dengming, et al. Theoretical connotations, functional characteristics, and technical framework of Three-Dimensional Water Network [J]. Advances in Water Science, 2026, 37 (1) : 1-12. (in Chinese))
- [14] 王建华,刘欢,胡鹏,等. 水网的科学内涵解析与形成演变机制探究[J]. 水利学报, 2026, 57 (1) : 128-140. (Wang Jianhua, Liu Huan, Hu Peng, et al. Analysis of the scientific connotation of water networks and exploration of their formation and evolution mechanisms [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2026, 57 (1) : 128-140. (in Chinese))
- [15] 胡朝碧. 加快实施“兴水润滇”工程奋力开创云南水利新局面[J]. 中国水利, 2023 (24) : 80. (Hu Zhaobi. Accelerate implementation of “Revitalizing Water and Moisturizing Yunnan” project and strive to create a new situation in Yunnan’s water conservancy [J]. China Water Resources, 2023 (24) : 80. (in Chinese))
- [16] 王梦晗,严登华,张鑫,等. 水网工程高质量发展若干关键问题的思考[J]. 水资源保护, 2025, 41 (1) : 35-41. (Wang Menghan, Yan Denghua, Zhang Xin, et al. Thoughts on key issues for high-quality development of water network projects [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1) : 35-41. (in Chinese))
- [17] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3) : 1-7. (Guo Xuning, Li Yunling, Chang Tong, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu’ anlan” modern water network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3) : 1-7. (in Chinese))
- [18] 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. (Wang Yu, Wan Fang, Wang Weihao, et al. Complex network characteristics and resilience-driving mechanisms of water resource systems in river basin [J]. Advances in

- Water Science,2025,36(2):190-203. (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 Fang, Wang Yu, Wang Weihao, 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] 冯仲恺,杨晓静,牛文静,等.长江流域复杂水资源系统风险网络特征的工程影响解析[J].水资源保护,2026,42(3):9-22. (Feng Zhongkai, Yang Xiaojing, Niu Wenjing, et al. Project impact analysis on risk network features of the Yangtze River Basin complex water resources system[J]. Water Resources Protection,2026,42(3):9-22. (in Chinese))
- [21] 刘为锋,郭旭宁,李云玲,等.基于水资源空间均衡评价的“荆楚安澜”现代水网优化布局与组网方案研究[J].水资源保护,2025,41(4):27-32. (Liu Weifeng, Guo Xuning, Li Yunling, et al. Study on optimized layout and networking scheme of “Jingchu Anlan” modern water network based on spatial equilibrium evaluation of water resources[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):27-32. (in Chinese))
- [22] 黄生志,闫俊,郭怵,等.面向陕西水网韧性提升的水库群优化调配研究[J].水资源保护,2025,41(5):258-267. (Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):258-267. (in Chinese))
- [23] 余运磊,曹一一,周琪,等.国家水网对中国地级市水资源短缺的缓解效果评估[J].水利学报,2025,56(4):531-540. (She Yunlei, Cao Yiyi, Zhou Qi, et al. Assessment the impact of the National Water Network on water shortages in Chinese prefecture-level cities[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(4):531-540. (in Chinese))
- [24] 张珂,刘林鑫,晁丽君,等.2000—2014年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化[J].水资源保护,2019,35(5):1-5. (Zhang Ke, Liu Linxin, Chao Lijun, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 1-5. (in Chinese))
- [25] 贾丽,陆健健.旱灾的生态学影响因素:以云南省旱灾为例[J].水资源保护,2012,28(2):54-56. (Jia Li, Lu Jianjian. Ecological factors of drought: a case study in Yunnan Province[J]. Water Resources Protection,2012,28(2):54-56. (in Chinese))
- [26] 云南省水利厅.2024年云南省水资源公报[R].昆明:云南省水利厅,2025.
- [27] 袁维,孙瑞峰,钟辉亚,等.阶跃型滑坡综合变形预测及监测预警方法研究[J].水利学报,2023,54(4):461-473. (Yuan Wei, Sun Ruifeng, Zhong Huiya, et al. Research on comprehensive deformation prediction and monitoring and early warning method for step-like landslide[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(4):461-473. (in Chinese))
- [28] 周满国,黄艳国,段锦锋.基于GRU-RF模型的太阳辐照度短时预测[J].太阳能学报,2022,43(7):166-173. (Zhou Manguo, Huang Yanguo, Duan Jinfeng. Short term prediction of solar irradiance based on GRU-RF model[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2022,43(7):166-173. (in Chinese))
- [29] 金菊良,刘东平,周戎星,等.基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J].水资源保护,2021,37(3):1-6. (Jin Juliang, Liu Dongping, Zhou Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):1-6. (in Chinese))
- [30] 郭文强,韦星羽,雷明.“双碳”目标下数字技术赋能农业碳生产率的影响[J].环境科学,2026,47(3):1486-1497. (Guo Wenqiang, Wei Xingyu, Lei Ming. Impact of digital technology on agricultural carbon productivity under the dual-carbon goal[J]. Environmental Science,2026,47(3):1486-1497. (in Chinese))
- [31] 王成祥,阳恩慧,韩峰,等.红色发展导向的铁路线路多属性决策模型研究[J].铁道科学与工程学报,2026,23(4):1908-1920. (Wang Chengxiang, Yang Enhui, Han Feng, et al. A study on multi-attribute decision-making model for railway location oriented by red development[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2026,23(4):1908-1920. (in Chinese))
- [32] 张晏维,卢新海.基于加速遗传算法投影寻踪模型的耕地保护政策执行评估研究[J].中国生态农业学报(中英文),2026,34(3):621-636. (Zhang Yanwei, Lu Xinhai. Evaluation of policy implementation for cultivated land protection based on accelerating genetic algorithm projection pursuit model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2026,34(3):621-636. (in Chinese))
- [33] 李华,贺鹏举,景丽婷,等.基于RAGA-PPM的电能质量综合评估方法[J].电工技术学报,2013,28(增刊2):349-353. (Li Hua, He Pengju, Jing Liting, et al. The method of power quality comprehensive evaluation based on projection pursuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(Sup2):349-353. (in Chinese))

(收稿日期:2026-01-12 编辑:王芳)