

山地地区水资源综合利用与水利工程规划的协同优化研究

纪伟

身份证号码: 120225198001290014

摘要: 山地地区由于地形复杂、水资源分布不均、开发难度大等特点,在水资源综合利用和水利工程规划方面面临诸多挑战。论文立足于中国典型山地区域,通过系统分析水资源的时空特性、供需矛盾与生态安全问题,提出一种以综合利用为导向、以协同优化为路径的水利工程规划模式。从水资源现状分析、综合利用策略、水利工程规划优化路径及协同机制构建四个方面展开研究,并通过引入典型案例和相关数据,论证该模式的科学性与实践可行性。研究表明,协同优化模式有助于提高水资源配置效率、保障生态用水安全,具有重要的理论价值与推广意义。

关键词: 山地地区; 水资源综合利用; 水利工程; 协同优化; 规划策略

Research on the Coordinated Optimization of Comprehensive Utilization of Water Resources and Water Conservancy Project Planning in Mountainous Areas

Wei Ji

ID No.: 120225198001290014

Abstract: Due to the complex terrain, uneven distribution of water resources and difficult development, mountainous areas face many challenges in the comprehensive utilization of water resources and water conservancy project planning. Based on the typical mountainous areas in China, this paper systematically analyzes the spatial and temporal characteristics of water resources, the contradiction between supply and demand and the ecological security problems, and puts forward a water conservancy project planning mode with comprehensive utilization as the guidance and collaborative optimization as the path. The research is conducted from four aspects: the analysis of water resources status, comprehensive utilization strategy, water conservancy project planning optimization path and coordination mechanism construction, and the scientific and practical feasibility of this model is demonstrated by introducing typical cases and relevant data. The results show that the collaborative optimization mode is helpful to improve the efficiency of water resources allocation and ensure the safety of ecological water use, which has important theoretical value and popularization significance.

Keywords: mountain area; comprehensive utilization of water resources; water conservancy project; co-optimization; planning strategy

0 前言

山地地区在中国国土面积中占据约 69%, 其在国家生态安全屏障、水资源涵养和能源开发中具有重要战略地位。然而,山地水资源开发利用受到地形条件、水系结构、生态脆弱性和经济发展水平等多因素制约,亟需系统化、集成化的工程规划与资源利用模式。传统水利工程往往以单一目标为导向,忽视了区域整体系统的协同发展,导致水资源浪费、生态破坏、供需失衡等问题频发。因此,论文旨在探索一套适用于山地地区的“综合—协同—优化”水资源管理思路,为水利工程的高质量发展提供理论支撑与技术路径。

1 山地地区水资源现状分析与挑战识别

1.1 水资源时空分布不均, 调控难度大

山地地区降水具有显著的季节性集中特征, 尤其在中

国西南及中部山地带, 年降水 80% 以上集中于汛期, 造成水资源“丰时无用、枯时紧缺”的结构性矛盾。例如, 贵州省年均降水约为 1100 毫米, 但集中于 5 至 9 月, 枯水期(12 月至次年 2 月)降水量占比不足 10%, 形成水资源调蓄困难的局面。此外, 由于山地地形高差大、地势起伏剧烈, 地表径流流速快、水体滞留能力差, 不易形成有效水源。根据中国水资源公报(2022 年), 中国西南山区水资源年可利用率仅为 37.5%, 远低于全国平均水平的 48%^[1]。在这种空间地貌与水文特征的共同作用下, 构建具有季节弹性与高位蓄能能力的水利调控系统面临极大挑战, 见表 1。

1.2 工程设施布局滞后, 开发利用效率低

山地地区水资源的开发依赖于系统性强的工程支撑体系, 由于地形复杂、交通不便, 水利设施建设成本高昂, 工程覆盖率低, 导致大量资源未被有效利用。以广西北部山区

为例,当地多年平均水资源总量为 320 亿立方米,实际开发利用量仅为 87 亿立方米,利用率不足 30%。受限于施工难度,部分山区甚至连基础蓄水设施(如小型水库、塘坝)都未能普及,区域性缺水问题突出。此外,已建工程多为单一功能、

分散运行,缺乏统一调度与维护机制,资源利用效率亟待提升。调查显示,西南山区中小型水库中,有 42.6% 存在淤积严重、调蓄能力下降等问题,无法有效保障农业灌溉与农村供水,尤其在极端干旱年份,农村饮水安全问题频发,见表 2。

表 1 中国水资源公报

地区	年均降水量 (mm)	汛期降水占比	枯水期降水占比	可利用水资源率
贵州山区	1100	83%	9%	38%
云南滇中	1050	79%	11%	36%
陕西秦岭南麓	780	75%	13%	41%
全国平均	645	65%	15%	48%

表 2 山地地区水资源的开发

地区	年可利用水资源量 (亿 m ³)	实际利用量 (亿 m ³)	利用率	水库设施完好率
广西北部	320	87	27%	61%
四川凉山	260	92	35%	69%
云南怒江	190	50	26%	58%

1.3 生态脆弱性高, 水资源开发与环境承载失衡

山地地区的生态系统对水资源变化高度敏感,稍有扰动即可能引发连锁性生态退化问题。典型如喀斯特地貌区,由于岩溶发育,土壤覆盖薄弱,水土流失与石漠化问题严重。数据显示,贵州喀斯特地区已有石漠化面积达 4.5 万平方公里, 占全省总面积的 25% 以上,其中 50% 以上的区域与不合理开发、过度抽水、生态用水缺乏保障有关。部分水利工程建设未充分考虑生态需水,截断了原有水系连通性,导致河道断流、湿地萎缩、水生生物多样性下降。以云南红河州为例,某支流在修建引水隧道后,连续 3 年出现枯季断流,导致珍稀鱼类繁殖失败,生态保护与水资源开发的矛盾日益凸显,亟须通过科学规划实现用水与环境的协同。

1.4 社会经济发展不平衡, 水资源管理基础薄弱

山地地区多为民族聚居或经济欠发达区域,产业结构单一、财政能力薄弱,严重制约水资源科学管理和工程系统建设的能力。根据《中国水利年鉴 2023》,西部山区农村自来水普及率仍低于全国平均 8%,部分高寒高海拔村落甚至依赖河沟取水或融雪饮水^[2]。部分地区技术人才匮乏,缺乏专业的水利规划设计队伍,造成水利项目重复建设、功能冗余或运行效率低下的问题突出。在政策推动方面,山地县市因财政自主能力差,对上级专项资金依赖较高,一旦补助断档,许多工程陷入“建得起、养不起、管不好”的困境。因此,必须从制度建设、人才培养、财政保障等多方面提升水资源管理的整体能力与系统韧性。

2 水资源综合利用的策略体系构建

2.1 分层分类调蓄体系建设

山地地貌的典型特征是地形落差大、水源分布零散,传统集中式调蓄难以适应此类地理环境。为提升水资源的调控能力,应因地制宜推行“高山—中坡—谷底”分层分类调蓄体系,构建覆盖全域的多级调蓄网络。具体做法包括:

高山区建设小型高位水库或蓄水池,用于雨季积水与高效输送;中坡区域布局梯级拦水坝与集水池,承接高位溢水并服务周边灌溉;谷底地带则设大型库容水库,统筹区域性水资源调配,承担防洪、供水等复合功能。例如,湖南武陵山区通过构建“塘库堰渠井”五级调蓄体系,科学利用地势高差,实现各级水体联通与梯级利用,年供水保障率由 74% 提升至 92%,农业灌溉覆盖率提升近 18%,有效解决了枯水期农田“望天田”问题。该系统以小而密、互联互通为核心,有效分散了极端天气对单一蓄水点的冲击,为山地水资源利用提供了强有力的基础工程支撑。

2.2 多源联合与非常规水资源开发

在水资源紧缺与传统开发受限的背景下,山地地区应主动拓展水源来源,通过多源联合与非常规水资源开发提高整体供水能力。第一,可推广雨水集蓄系统,如屋顶集雨、山地集流平台与人工蓄水池,提升雨季降水的就地利用率。第二,可对山泉、小溪等分布广但规模小的天然水体进行截引整合,通过细管网输送至村庄、农田,补充日常生活与生产用水。此外,中水回用技术也应适度引入,特别是在旅游景区、集中居住点,通过生态湿地、人工快渗与膜技术回收生活污水,用于冲厕、绿化与道路洒水等非饮用用途。以重庆黔江区为例,当地推行屋顶集雨与生态净化系统相结合的方案,平均每年可回用雨水达 120 万立方米,占全区生活用水的 12%。该项目投资回收期仅 5 年,并有效降低了对天然水源的依赖,显示出山地地区发展非常规水源的巨大潜力与经济性。

2.3 生态用水与产业用水统筹

实现山地水资源可持续利用,必须处理好生态保护与产业发展的关系。当前不少山地工程规划中生态用水常被忽略,导致河道断流、湿地退化、水体富营养化等问题频发。因此,应依据流域自然水文过程与生态系统承载力,科学设

定生态用水红线,保障最低生态基流维持,优先满足森林涵养、湿地恢复及水生生物栖息需求。在此基础上,结合区域经济定位与水资源可支配量,统筹安排农业、旅游与轻工业等产业用水总量与结构。例如,云南大理洱海保护区通过设定年生态用水标准 3.1 亿立方米,并严格控制新增用水项目审批,确保湖泊水体维持 II 类水质标准。5 年来,洱海水体透明度提升近 40%,蓝藻暴发次数下降至个位数,充分体现了生态优先与用水统筹的现实成效。未来山地水资源管理,应将“生态安全阈值”纳入水资源论证与工程审查程序,防止开发行为突破生态底线。

2.4 智能调度与信息化管理体系

传统山地水资源管理多依赖人工巡查与经验调度,效率低下、信息滞后,难以应对极端气候频发与用水需求多样化的双重挑战。因此,推进水资源管理的信息化、智能化转型势在必行^[1]。建议在山地流域构建“智慧水务平台”,集成遥感监测、物联网传感、水质自动分析、用水行为追踪与水库调度模型,实现对降水、流量、蓄水、水质等关键参数的实时监控和预警反馈。此外,通过构建水资源“数字孪生体”模型,可在线仿真预测流域用水变化、调度影响与极端事件响应,为工程调度和风险管控提供科学依据。以陕西安康地区为例,当地采用“流域信息一张图”系统,通过手机端+卫星遥感+自动站融合,实现对 36 座小水库和 118 条山溪的联动监控与调度,使调蓄响应时间缩短 30%,旱涝交替期农业受灾面积下降 20%。该案例表明,智能调度是提升山地水资源配置效率与安全保障能力的关键技术路径,值得在全国山地地区加快推广。

3 水利工程规划的协同优化路径

3.1 多目标工程规划方法的应用

在山地地区的水利工程实践中,长期存在“重供水、轻生态”“重建设、轻效益”的问题,许多项目在规划之初仅以供水或防洪单一目标为导向,导致运行过程中生态失衡或投资效益不达预期。多目标规划方法(Multi-objective Optimization, MOP)正是一种突破传统模式的有效工具,其核心在于在多个相互冲突或制约的目标之间寻求最优平衡,构建“Pareto 最优解集”,供决策者在多方案之间灵活选择。以某典型山地流域为例,在其水利工程初步设计阶段引入供水效益、生态需水满足度、投资回报率与社会满意度四项指标,构建多目标函数与权重系数组合,通过遗传算法进行模型求解,最终筛选出三套优解方案。项目实施后,不仅年均供水量提高了 14%,生态用水合规率也由原来的 68% 提升至 92%。该案例表明,多目标优化不仅提升了系统运行效率,更实现了工程与自然、经济与生态的协调共赢,为今后山地水利工程提供了科学化、系统化的规划范式。

3.2 工程布局与地理信息集成分析

山地水利工程建设面临地形复杂、水源点分布分散、土地资源紧张等突出问题,因此科学确定工程布局位置,

是提高资源配置效率与经济性的关键。基于地理信息系统(GIS)与遥感技术,可对区域内的地形、地貌、水文、土地利用及人口分布等空间数据进行叠加分析,实现“数据驱动”的工程选址与布局优化。例如,贵州铜仁在小流域综合治理中,基于数字高程模型(DEM)数据进行库容—集水面积—地质稳定性三要素耦合分析,识别出最适宜建设调蓄工程的微地形单元,在不新增征地成本的前提下,优化了 35 个小型水库的布局点位,使单位蓄水成本降低了 12%,年蓄水总量提升约 20%。同时,结合用水热点空间分析,精准配置灌区与供水区域,有效减少了无效覆盖与工程冗余。该方法充分体现了“数据+空间”的协同优势,是推动山地水利从经验型走向精细化、科学化的核心技术路径。

3.3 建设周期与运维成本的协同控制

山地水利工程普遍面临建设周期长、施工风险高、后期运行维护困难等问题,如何在保证质量与功能的前提下控制周期与成本,是当前规划阶段必须优先考虑的要素。协同控制的关键在于在设计、施工、运行三个阶段联动优化,通过模块化设计、区域协同施工与智能化管理技术降低总体投入。例如,陕西汉中某山区引水项目在初期即采用泵站模块化设计,预制化组件提前在工厂加工并现场快速拼装,施工周期由原计划 18 个月缩短至 11 个月,节约工程成本约 15%。在后期运维中,引入远程监测与智能预警系统,对设备运行状态、水位变化及故障进行自动识别与响应,大大减少了人力成本与停运损失。此外,通过对不同阶段成本敏感性分析与生命周期成本模型的应用,进一步优化了资金分配结构,使整体项目经济性和可持续性显著增强^[4]。协同控制思路不仅适用于大中型项目,也为偏远山地的小型水利设施提供了低成本、高效率的建设路径。

3.4 气候变化与水资源变化适应性设计

气候变化正在深刻影响山地地区的降水格局、水文过程与水资源可持续,表现为极端降雨增多、干旱频率加剧、融雪时段提前等不确定性增强的问题。这一变化趋势要求水利工程从传统的静态设计模式转向动态适应性设计。建议引入“情景模拟+风险评价+弹性设计”三位一体方法,在工程设计阶段即嵌入未来气候模型输出的水文预报,评估不同气候情景下的蓄水压力、下泄流量及生态风险。例如,云南怒江流域某引水项目在设计中使用 2020—2050 年四种气候情景下的降水模拟结果,调整库容配置与溢洪道断面设计,提升极端年份调蓄能力 30%,有效应对未来可能出现的洪旱交替问题。同时,采用“可扩展调蓄模块”,在未来水资源形势发生变化时可快速实施工程扩容或调整运行参数,确保工程具备长期服务能力。这一模式为山地地区提供了高度灵活、风险韧性强的工程解决方案,值得在类似区域推广应用^[5]。

4 结语

山地地区水资源综合利用与水利工程规划是一项系统

性、长期性工程，亟需打破传统思维，从协同优化的视角出发，实现资源—工程—生态—社会的有机融合。论文通过对山地水资源现状分析、综合利用策略设计、水利工程优化路径研究与协同机制构建等多角度论证，提出了具有实践价值的解决思路。未来应在技术集成、体制创新与公众参与等方面持续深化，推动山地水利高质量、可持续发展，为构建人与自然和谐共生的山区社会奠定坚实基础。

参考文献：

[1] 刘志宗,王晟,刘奇,等.西盟佤族自治县土壤硒元素空间分异特征及影响因素[J].土壤,2024,56(5):1111-1119.

[2] 范颖.“生态康养+”生态产品价值实现路径研究——以海南省保

亭县为例[J].四川农业科技,2024(11):130-135.

[3] 陈亦钦.基于Klein-Hay模型的分布式屋顶光伏发电固定式阵列安装最佳倾角计算[J].电器工业,2024(11):61-65.

[4] 陈浮,蒋非非,孙君,等.“大占补”改革背景下耕地保护转型的逻辑与创新实践[J].中国土地科学,2024,38(10):12-24.

[5] 谭经恒,喻阳,章伟.秦台河河岸带结构对植被分布的影响分析[J].中国资源综合利用,2024,42(7):102-104.

作者简介：纪伟，男，中国天津人，从事水利规划和智慧水利研究。