

# Analysis on the Multiple Development Paths of County Small Hydropower under the Green and Low-carbon Transition

Shun Li

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Zhaotong, Yunnan, 657000, China

## Abstract

As the green and low-carbon transition advances, county-level small hydropower, a vital component of the clean energy system, faces challenges in maximizing its ecological and economic value through traditional single-generation models. This study highlights the urgency and significance of exploring diversified development pathways. By integrating current analysis, pathway construction, and case validation, we systematically examine the development status and transformation challenges of county-level small hydropower. The research proposes diversified development strategies from two dimensions—energy complementarity and functional expansion—while discussing implementation approaches through typical cases. The findings indicate that synergizing small hydropower with renewable energy sources like solar and wind, along with expanding non-electric services such as eco-tourism and agricultural irrigation, are key pathways to value enhancement. Policy mechanism innovation and technological advancement serve as critical supports. The conclusion emphasizes that diversified development of county-level small hydropower in energy transformation is an inevitable choice, requiring coordinated planning and policy incentives to ensure successful implementation.

## Keywords

green and low-carbon transition; small hydropower in county; diversified development; path analysis; energy complementarity

## 绿色低碳转型下县域小水电多元发展路径探析

李顺

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南 昭通 657000

## 摘要

在绿色低碳转型深入推进且县域小水电作为清洁能源体系重要组成部分、传统单一发电模式难以充分释放生态与经济价值的背景下,探索其多元发展路径的紧迫性和重要意义凸显。本研究旨在通过采用现状分析、路径构建与案例验证相结合的方法,系统梳理县域小水电发展现状与转型挑战,进而从能源互补与功能拓展两个维度论证其多元发展路径,并结合典型案例探讨实施策略,以探析适应绿色低碳要求的小水电多元化发展新路径,推动其可持续转型升级。研究表明,推动小水电与光伏、风电等能源形式协同及拓展生态旅游、农业灌溉等非电服务功能为实现其价值提升的关键路径,政策机制创新与技术创新为重要支撑。结论认为县域小水电在能源变革中多元发展为必然选择,需通过统筹规划与政策激励保障路径实施。

## 关键词

绿色低碳转型; 县域小水电; 多元发展; 路径探析; 能源互补

## 1 引言

在全球气候变化挑战日益严峻、推动绿色低碳转型成为国际社会普遍共识和战略行动,且我国提出碳达峰碳中和目标,构建新型能源体系为实现该目标核心环节的宏观背景下,作为历史悠久、分布广泛清洁能源的县域小水电,其发展正站在新的历史节点。小水电曾是解决偏远地区用电问题的重要支撑并为农村经济社会发展作出积极贡献,但面对新时代绿色低碳发展更高要求,传统以单一发电为主的小水电

发展模式逐渐显现局限性,许多小水电设施面临设备老化、能效不高、对生态环境影响考虑不足等问题,其经济效益和社会效益有待进一步提升,同时风电、光伏等可再生能源的快速发展也对小水电传统市场地位构成挑战。

## 2 县域小水电发展现状与绿色低碳转型挑战

### 2.1 小水电资源分布与开发概况

我国县域小水电的开发格局与自然地理条件深刻契合,呈现出鲜明的区域集聚特征。长江流域及其以南地区,特别是四川、云南、湖南等省份的丘陵山地,得益于充沛的降水和较大河流落差,成为小水电资源最富集的区域。这些地区的小水电不仅数量庞大,且单站装机容量相对较大,多年平均利用小时数较高,在地方能源结构中占据重要地位。福建、

【作者简介】李顺(1994-),男,中国云南鲁甸人,本科,助理工程师,从事特定区域小水电转型与发展技术研究。

浙江等东南沿海省份虽然开发较早，资源潜力已得到较充分挖掘，但技术管理水平普遍较高。相比之下，西北干旱半干旱地区的小水电资源有限，发展相对滞后。从开发历程看，我国小水电经历了从解决偏远农村地区用电需求的“光明工

程”，到促进地方经济发展的“造血工程”，再到如今服务碳中和目标的“绿色工程”的阶段演变<sup>[1]</sup>。对资源禀赋和运营现状的准确把脉，是推动其转型升级的逻辑起点，代表性区域县域小水电开发运营特征对比结果如表1所示。

表1 代表性区域县域小水电开发运营特征对比表

区域类型	代表省份	资源特点	开发程度	典型单站容量	普遍技术状况
西南丰水山区	云南、四川	水头高、流量较稳定	中等，环保约束增强	0.5-2万千瓦	设备新旧并存，自动化改造需求迫切
东南沿海丘陵	浙江、福建	开发早，密度大	高度开发，接近饱和	0.1-0.5万千瓦	技术管理水平相对先进，面临生态化改造压力
东北山区	吉林、黑龙江	季节性径流，冰期影响	较低，发展缓慢	0.05-0.2万千瓦	设备老化严重，冬季运行效率低

## 2.2 绿色低碳转型对小水电的新要求

绿色低碳转型战略的深化实施，正从根本上重塑着小水电的价值评判标准和发展导向。新时期对小水电的要求已超越其传统的单一发电功能，转而强调其作为区域清洁能源系统和生态系统有机组成部分的综合价值。在碳减排维度，小水电需要证明其全生命周期内的低碳属性，并积极与风电、光伏等波动性可再生能源进行协同运行。这意味着小水电要承担更多的调峰、调频辅助服务责任，通过灵活性改造提升响应电网需求的能力，从而支撑更高比例的可再生能源并网消纳。在生态保护维度，要求发生了从底线约束到积极贡献的质的飞跃。最新的环保法规和流域管理政策强制要求保障河道生态流量，并非简单地泄最小流量，而是需要模拟自然水文情势的泄流方式。

## 2.3 当前面临的主要挑战

县域小水电在拥抱绿色低碳转型的征途中，正遭遇着技术、经济、环境与管理等多重因素交织形成的现实困境。技术代差是核心制约，大量运行超过三十年的电站其水轮机模型效率低下，发电机绝缘老化，控制系统停留在继电器逻辑水平，导致综合效率较现代化电站低百分之十五至二十，且无法实现远程监控和优化运行，安全隐患突出。经济可持续性面临严峻考验，在平价上网政策和发电成本刚性上升的夹击下，很多电站的电费收入仅能勉强维持基本运维，对于动辄数百万元的机组增效扩容改造或生态流量监测与泄放设施安装等投入心有余而力不足，缺乏有效的融资渠道和投资回报机制。

## 3 小水电多元发展路径分析

### 3.1 能源互补型路径

能源互补型路径的核心在于突破小水电单一运营模式，将其主动融入区域新型能源系统，通过与光伏、风电等可再生能源形成多能协同体系，有效解决新能源发电的间歇性与波动性问题，从而提升能源综合利用效率与系统稳定性。具体实践中，小水电的稳定出力 and 快速调节能力成为其参与互补的优势基础<sup>[2]</sup>。在丰水期，小水电可承担基荷供电任务，保障区域用电需求。而在枯水期或夜间，当其发电能力下降时，可依托白天光伏发电或夜间风力发电进行有效补充，实

现不同能源品种在时间尺度上的耦合。技术上，可以探索“小水电+光伏”的模式，利用水库消落区、边坡、厂房屋顶等空间布置光伏板，形成内源性互补。亦可发展“小水电+风电”的模式，在风能资源丰富的山区，将风电接入小水电的升压站和送出线路，实现资源共享与汇集外送。

### 3.2 功能拓展型路径

功能拓展型路径的本质是超越小水电传统的单一发电功能定位，深度挖掘其在生态、社会、经济等多维度的潜在价值，通过与文化旅游、生态农业、乡村休闲等产业的融合发展，将水电站及其周边环境打造成为一个多功能聚合体，实现从“能源生产者”到“综合服务提供者”的角色转变。此路径要求对小水电站的基础设施、水域空间和周边景观进行系统性再规划和价值重塑。在生态功能拓展上，严格保障生态流量下泄并优化泄放方式，建设高效过鱼设施，实施河道形态修复与滨岸带植被恢复，将电站区域建设成为小型湿地公园或水生生物保护区，提升流域生物多样性和生态系统服务功能。在文旅休闲功能融合上，可利用水库水面发展垂钓、观景、亲水娱乐等项目，结合厂房和水利设施开展水电科普教育、工业遗产旅游，将电站融入区域旅游线路，打造特色水电文化小镇或研学基地<sup>[3]</sup>。在农业与服务功能结合上，可利用电站尾水或水库水源发展高附加值的水产养殖、灌溉高品质经济作物，利用电站富余电力或稳定可靠的电力供应为周边乡村提供冷链仓储、农产品加工等公共服务，甚至结合数据中心等新兴用电需求探索绿色供电合作。

## 4 多元发展路径的实施策略与案例研究

### 4.1 政策支持与机制创新

推动县域小水电多元发展的关键在于构建一个多层次、精准高效的政策支持与市场机制创新体系，这一体系的核心目标是将小水电的绿色低碳转型和多元发展所产生的外部效益内部化，形成可持续的商业模式。在顶层设计层面，国家能源主管部门可联合生态环境部、水利部共同制定《小水电绿色低碳多元化发展指导意见》，明确其在新时期的功能定位、发展目标和重点任务，为地方实践提供清晰的政策预期。价格机制改革是突破口，应推行“基准电价+绿色溢价”的激励性电价政策，对严格保障生态流量、安装鱼类洄游通

道、参与电网调峰调频的小水电站给予每千瓦时 3-5 分钱的电价附加补贴,使其环保投入获得合理回报。同时,积极探索小水电项目纳入国家核证自愿减排量市场的路径,开发小水电 CCER 方法学,使其清洁发电量能够转化为可交易的碳资产,开拓新的收入来源。在金融支持方面,建议国家绿色发展基金下设小水电转型升级专项,为符合条件的项目提供不超过总投资 40%、期限可达 15 年的低息贷款。鼓励开发“小水电设备更新改造贷”、“小水电+文旅”融合发展贷等特色金融产品。

#### 4.2 技术创新与智能化管理

小水电的多元发展必须依靠新一代信息技术、先进材料技术和智能控制技术的深度融合与系统性应用,其目标是实现电站的“感知、分析、决策、执行”全流程智能化,从传统的水力发电单元升级为智慧能源系统的节点。硬件层面的创新是基础,重点研发和应用适用于低水头、小流量的超高效率、宽范围运行的转轮模型,采用复合材料减轻叶片重量、提高抗空蚀和磨损性能,使机组加权平均效率提升 3-5 个百分点。在智能运维层面,构建基于工业互联网的小水电智能集控平台是核心。通过在电站关键部位部署振动、摆度、压力、温度、局放等智能传感器,并结合高清视频监控和无人机定期巡检,实现对设备健康状态的实时感知与趋势预测<sup>[4]</sup>。利用数字孪生技术,在虚拟空间中构建与物理电站完全对应的动态模型,可以模拟不同来水条件、不同负荷下的运行状态,进行故障预警和运行优化仿真,将计划性检修转变为预测性维护,大幅降低非计划停运时间和维护成本。在调度运行层面,开发嵌入人工智能算法的小水电群协同优化调度系统,能够自动接收气象水文预报、电网调度指令和市场需求信息,智能决策单站及电站群的启停和负荷分配,并与周边的分布式光伏、风电、小型储能装置实现“源网荷储”互动,最大化整体运行效益。

#### 4.3 典型案例分析

实践探索为理论路径提供了最具说服力的验证,国内外一些先锋地区的成功实践揭示了小水电多元发展的可行模式与巨大潜力。浙江省金华市婺城区沙畈乡的小水电集群改造项目是一个生态价值和经济价值协同提升的典范。该区域数座小水电站联合开展了以生态流量保障为核心的流域系统性修复,不仅安装了高精度的生态流量在线监测与自动

泄放设施,还统一建设了符合鱼类习性的仿自然通道,并对近十公里脱水河段进行了生态护坡和植被恢复。这一系列举措使得河流生态系统得到显著改善,水生生物多样性恢复,进而带动了沿岸乡村民宿和生态观光业的发展<sup>[5]</sup>。电站自身则因严格执行环保标准获得了额外的电价补贴,并因环境改善带来的区域品牌增值而间接受益,形成了“绿水青山”与“金山银山”的良性循环。在云贵高原的澜沧江支流,某县探索的“小水电+现代农业”模式则展现了能源与产业融合的深度。当地一座小水电站利用其稳定低廉的电力资源和水库的调温效应,在电站周边建设了现代农业产业园,发展高品质的温室果蔬种植和冷水鱼养殖,并利用余热为温室供暖。

### 5 结语

本文在系统分析县域小水电发展现状与挑战基础上,深入探析其绿色低碳转型背景下多元发展路径、论证能源互补与功能拓展两大方向可行性与价值并提出涵盖政策、技术、管理具体实施策略,为面临转型困境的县域小水电提供清晰可操作发展框架,且在理论层面路径构建及为地方政府和电站经营者指明将生态约束转化为发展机遇、将单一能源资产升级为综合效益平台实践方向,对推动县域能源结构优化、生态保护与乡村振兴协同发展有直接参考价值。

#### 参考文献

- [1] 张凯.数字化转型驱动制造业绿色低碳发展的内在机理研究[J].现代商贸工业,2025,(24):1-3.
- [2] 何艳艳,张钰.高质量发展背景下消费方式绿色低碳转型的理论逻辑、价值意蕴及实践路径[J/OL].贺州学院学报,1-11[2025-11-26].
- [3] 孙洪武,张倩.科技驱动农业绿色低碳转型的动力机制:创新链、产业链与政策链的同构演进[J/OL].农业科技管理,1-7[2025-11-26].
- [4] 黄宏斌,王思丹,李育洋.低碳转型对企业绿色创新持续性的影响——基于低碳城市试点政策的准自然实验[J/OL].金融理论与实践,2025,(09):60-77[2025-11-26].
- [5] 夏子惠,古丽娜尔·玉素甫.数字经济赋能低碳转型的双重效应与跃迁趋势——基于双边随机前沿和Markov链的分析[J].技术经济与管理研究,2025,(11):114-121.