

非常规水资源调度在水利水电工程管理中的应用探索

王启玉

塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心水资源调度中心, 新疆 库尔勒 841000

[摘要] 水资源的合理利用一直是全球关注的重要议题, 特别是在干旱及半干旱地区, 新疆作为中国的内陆省区, 长期面临着水资源匮乏的压力。尽管该地区拥有一定的水资源储备, 但由于气候变化及资源分布不均, 水资源短缺问题日益加剧。随着经济发展与人口增长, 用水需求不断增加, 传统的水资源管理方式已无法应对这一严峻形势。文章的研究旨在深入探讨新疆地区非常规水资源的调度技术路径, 分析在实施过程中面临的技术、管理与政策挑战, 以期对未来水资源的优化配置与可持续利用提供理论支持与实践依据。

[关键词] 非常规水资源; 水利水电工程; 分质利用; 联合调度; 新疆地区

DOI: 10.33142/hst.v8i4.16078

中图分类号: TV512

文献标识码: A

Exploration on the Application of Unconventional Water Resource Scheduling in Water Conservancy and Hydropower Engineering Management

WANG Qiyu

Water Resources Dispatch Center of Tarim River Basin Kaidu Kongque River Water Resources Management Center, Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: The rational utilization of water resources has always been an important issue of global concern, especially in arid and semi-arid regions. As an inland province in China, Xinjiang has long faced the pressure of water scarcity. Although the region has a certain amount of water resources reserves, the problem of water scarcity is becoming increasingly severe due to climate change and uneven distribution of resources. With the development of the economy and population growth, the demand for water continues to increase, and traditional water resource management methods are no longer able to cope with this severe situation. The research of this article aims to explore in depth the technical path of unconventional water resource scheduling in Xinjiang region, analyze the technical, management, and policy challenges faced in the implementation process, in order to provide theoretical support and practical basis for the optimization and sustainable utilization of water resources in the future.

Keywords: unconventional water resources; water conservancy and hydropower engineering; qualitative utilization; joint scheduling; Xinjiang region

引言

新疆是一个典型的干旱地区, 年均降水量仅为 145mm, 而蒸发量则超过 2000mm, 水资源的开发利用程度高达 75%, 远超国际警戒线 (40%)。此外, 由于季节性水源分布的错配, 春季积雪融水占据了全年径流的 70%, 然而农业用水的高峰期却出现在夏季, 导致水资源的利用效率不高。传统的水资源调度模式在这种特殊的自然条件下难以满足需求, 迫切需要新型的技术路径以优化资源配置。在此背景下, 科学管理与技术创新成为缓解水资源紧缺问题的关键。非常规水资源调度技术, 尤其是分质利用、分布式储运系统及多水源联合调度模型, 为新疆的水资源管理带来了新的突破。结合智能化技术与多元化管理手段, 极大提高了水资源利用的效率, 也为生态环境保护与经济发展提供了有效保障。

1 非常规水资源的内涵特征与技术体系

1.1 基本定义与核心属性

非常规水资源是指需要特殊处理后才能被利用的水体, 包括再生水、矿井水、苦咸水等类型, 其主要特征体

现在循环再生性、水质特异性与时空分散性。循环再生性决定了这些水源能否通过技术手段反复利用, 例如, 膜生物反应器 (MBR) 与超滤工艺能够对废水进行高效处理, 使其净化后重新投入农业灌溉或工业冷却系统, 从而缓解水资源短缺问题。水质的差异性要求针对不同水源采用适宜的处理技术, 例如, 反渗透 (RO) 工艺在海水淡化过程中得到了广泛应用, 其高效脱盐能力使水处理成本已降至每立方米 4~7 元。时空分布的不均衡性, 使得部分区域水资源供需矛盾突出。雨水与融雪水通常呈现出季节性变化, 如若不进行合理存储, 将大幅降低利用率。构建“渗、滞、蓄、净、用、排”体系, 可有效提升水资源调配能力。

1.2 新疆地区资源分类

位于干旱半干旱区的新疆, 拥有丰富的非常规水资源, 不同地区的开发利用模式存在较大差异。在乌鲁木齐市, 再生水回用率已超过 30%, 广泛应用于工业冷却及绿化灌溉, 从而缓解了市政供水压力。矿井水的利用也取得了显著成效, 例如, 准东煤田每年排放矿井水约 2.5 亿 m^3 , 若经超滤技术处理后应用于生态补水, 不仅减少了环境污染,

还提升了水资源利用率。塔里木盆地分布广泛的浅层微咸水(矿化度 3~5g/L),在经过咸淡混灌技术调控后,可用于棉花种植,为农业生产提供了稳定的水源支持。天山北坡的融雪水占全年径流总量的 60%,由于主要集中在春季,如不加以合理储存,将难以在后续干旱季节提供充足水源。建设分布式蓄水系统,可在径流量充沛时进行有效储存,以缓解春旱带来的影响。尽管新疆不沿海,但借鉴渤海湾海水淡化的经验,仍可在苦咸水淡化技术方面开展深入研究,为水资源优化配置提供技术支撑。

1.3 技术发展沿革

非常规水资源的开发利用水平,随着技术的不断升级而持续提升。膜分离技术经历了多轮迭代,从电渗析(ED)发展至纳滤(NF)与正渗透(FO),脱盐率已提升至 99%,水资源回收效率显著提高,同时降低了能耗与运行成本^[1]。信息技术的应用,使水资源监测管理逐步向智能化迈进。依托 BIM 与数字孪生技术构建的智能监测系统,可实现水质实时追踪与风险预警,从而提升水处理过程的稳定性与安全性。

2 新疆地区水资源调度特殊性分析

2.1 地理气候约束条件

新疆位于干旱及半干旱区域,降水稀少且蒸发强烈,使得水资源自然补给能力极为有限。年均降水量仅 145mm,而蒸发量超过 2000mm,远高于降水补给水平,长期导致水资源供需紧张。水资源开发率已达到 75%,远超国际公认的 40%警戒线,表明对水资源的高度依赖已成为区域性特征。降水的时空分布极不均衡,不同地区水资源可利用性差异显著。新疆水资源主要依赖高山冰川融水补给,然而,受季节性波动影响,春季融雪径流占全年总量的 70%,而农业用水高峰则集中在夏季。由于这一时空错配,融雪水未能充分储存与调配,利用率不足 50%。在干旱区,这一问题不仅增加了农业灌溉压力,也加剧了生态环境的水资源短缺。提升水资源调配能力、提高融雪水的利用效率,已成为区域水资源管理的核心任务之一。

2.2 传统调度系统瓶颈

新疆水资源调度受地理环境、国际河流管理及区域经济发展等多方面因素影响,协调难度较大。伊犁河、额尔齐斯河等国际河流的跨境流量已超过 60%。由于流域涉及中哈两国,水资源分配必须依据《中哈水资源分配协议》进行管理,不仅需满足本地用水需求,还需履行国际责任,使水量调控的复杂性进一步增加。与此同时,绿洲经济带的水资源矛盾愈发突出,尤其是天山北坡城市群。近年来,工业化进程的加速,推动了城市用水需求的持续攀升,生态基流逐步减少。例如,艾比湖作为新疆典型的内陆湖泊,长期受上游水资源过度开发影响,湖泊面积已缩减 60%,生态系统稳定性遭到破坏。水资源调度不合理,进一步削弱了绿洲生态环境的稳定性,也使生态退化风险加剧。传统水资源调度模式在平衡经济增长与生态保护方面已难以满足现实需求,优化水资源配置、增加生态补水比例成为水资源管理体系调整的重点方向。

2.3 政策导向需求

国家生态文明建设的推进,对新疆水资源调度提出更严格的政策要求。根据《全国重要生态系统保护修复重大工程规划》,到 2025 年,新疆生态补水比例需提升至 15%。这一目标的设定,既反映出国家对西部生态安全的重视,也意味着水资源管理模式必须向生态优先的方向转型^[2]。在水资源紧缺背景下,农业和工业用水方式需要进行调整,以确保生态环境的可持续性。与此同时,丝绸之路经济带的建设,也对沿线产业集群的水资源稳定供给提出更高要求。中欧班列沿线产业带快速发展,工业园区对水资源的依赖程度不断提高。在有限的水资源条件下,非常规水资源的开发利用已成为缓解供需矛盾的重要路径。新疆提出非常规水资源替代率目标为 20%,即通过再生水回用、苦咸水淡化等方式,降低地表水及地下水的直接取用。政策导向促使非常规水资源开发成为区域水资源管理的关键内容。

3 非常规水资源调度的关键技术路径

3.1 分质利用技术体系

在水资源管理中,分质利用技术的核心在于通过对水源的水质特征进行精准分类与处理,以应对不同领域的用水需求。以克拉玛依石化园区为例,该园区通过将再生水按化学需氧量(COD)进行分级管理,分别为低于 30mg/L 和 30~50mg/L 两个等级,用于不同的工艺需求。这一措施的实施使得园区的水资源回用率达到了 85%。同时,生态补水也在不断推进,在这一过程中,采用了人工湿地与臭氧氧化组合工艺进行矿井水的处理。该技术使矿井水中的总磷(TP)含量控制在 0.5mg/L 以下,达到了湖泊补水标准,进而将矿井水转化为可用的生态补水资源。

3.2 分布式储运系统

分布式储运系统的实施,通过模块化设备与智能化技术的有机结合,使得水资源能够在更广泛的区域范围内得到有效处理与传输,尤其适用于环境复杂、地理条件较为特殊的区域。例如,在南疆地区,推广使用集装箱式 RO(反渗透)设备处理苦咸水,每台设备的日处理能力达到 200m³,且吨水能耗低于 3kWh。这一技术的应用,不仅有效提升了水处理效率,还降低了能源消耗,为偏远地区提供了更为便捷的水处理解决方案。同时,乌鲁木齐市通过智能管网的建设实现了水资源输送的智能化,特别是在再生水管网的漏损控制方面取得了显著成效。应用水力模型和变频泵站的组合技术,将再生水管网的漏损率从 25%有效降低至 12%,大幅提升了水资源的利用率与输送效率,减少了资源的浪费。

3.3 多水源联合调度模型

为应对日益严峻的水资源短缺问题,单一水源调度模式已逐步显现出其局限性,促使多水源联合调度模型的提出。通过将地表水、地下水与再生水三类水源进行优化配置,形成多水源联合调度系统,能够有效提高水资源的利用效率。吐鲁番示范区的实践中,通过构建水文-经济耦合算法,实现了“地表水-地下水-再生水”三水源的优化管理。该优化模型的应用使得水资源的节水效益提高了

30%，提高了供水保障水平。此外，引入风险约束优化配置技术，结合蒙特卡洛模拟方法对干旱等极端气候情景进行评估，确保了供水保证率维持在90%以上。

4 管理机制创新与实践策略

4.1 制度保障体系

一个高效、可持续的水资源管理体系离不开坚实的制度保障。新疆在此方面不断完善相关的法律与管理体系，为水资源的合理调配与高效利用提供了制度支持。水权交易市场的培育无疑是这一体系中的重要组成部分。参照《新疆水权交易管理办法》，新疆各地已逐步开展农业节水指标的跨行业转让，伊犁州在2024年水权交易量已达到500万 m^3 ，标志着水权交易市场在新疆地区的逐步成熟。此外，自治区还成立了非常规水源管理办公室，协调水利、环保、住建等部门，进行资源整合与职责划分。通过这一跨部门协作机制，各相关部门的职能得到有效整合，水资源管理的效率得到了显著提升，为非常规水源的管理提供了强有力的保障。

4.2 智慧化管理平台

随着科技的迅速发展，数字化与智能化技术的应用为水资源管理提供了更加精准、高效的支持。在新疆，数字孪生技术与水质动态监测系统的建设推动了水资源管理向更智能化的方向发展。玛纳斯河的数字镜像系统便是智慧化水资源管理中的一个成功应用^[3]。依托阿里云平台，该系统能够实时获取与分析水流量、降水量等关键数据，提升了洪水预报的准确性，使预报精度达到90%。这一技术的应用有效增强了洪水预警与应急响应能力，确保了水资源调度能够及时有效地应对突发灾害。此外，水质动态监测网络的建设也取得了显著成果。目前，全疆已布设2000个物联网传感器，实时监测水质中的COD、电导率等12项重要指标，为水资源管理的科学性与精准性提供了数据支撑。通过这些智能化技术的引入，新疆在水资源管理中取得了显著的进展，推动了水资源的精细化管理。

4.3 生态协同发展模式

在水资源调度中，生态保护与资源利用的协调性日益重要。新疆采取了一系列措施推动生态与经济的双赢，特别是在地下水回补与盐碱化防控方面，取得了积极进展。地下水回补措施的实施，严格按照《地下水管理条例》执行，结合河道渗滤井等设施，确保了地下水资源的持续回补，回补量每年达到1.2亿 m^3 。这一措施有效应对了地下水资源过度开发带来的问题，提升了地下水的可持续利用水平。此外，盐碱化防控方面也取得了积极进展。通过设定土壤安全阈值（含盐量低于0.3%），并推广暗管排盐技术，有效避免了盐碱化的加剧，为土壤和生态环境的健康发展提供了保障。这些生态协同发展的举措为水资源管理提供了新思路，确保了生态环境的稳定与水资源的可持续发展。

4.4 经济激励机制构建

为了促进节水技术的推广与水资源的高效利用，经济激励机制的建设显得尤为重要。乌鲁木齐市在这一方面采

取了阶梯水价制度，通过对工业用水的超定额部分实施加价200%的政策，成功地提升了企业的节水意识。同时，对于农业节水用户，政府还提供了0.15元/ m^3 的补贴，进一步激励农业生产者使用节水技术。在技术补贴方面，新疆设立了专项财政补贴，针对滴灌设备的购买提供30%的补贴，昌吉州的农户参与率已达到75%。这些措施通过经济激励，促进了节水技术的推广应用，有效减少了水资源的浪费，为水资源的可持续利用奠定了基础。

4.5 社会共治网络建设

社会共治网络的建设为水资源的管理提供了强大的社会支持与动力。在新疆，政府与社会各界的合作日益紧密，推动了水资源的共同管理与节水意识的普及。例如，喀什地区通过成立“用水者协会”，推动社区节水公约的实施，并制定了再生水灌溉轮换制度，增强了公众的节水责任感。此外，企业也逐渐成为水资源管理中的重要参与者。许多企业已将非常规水源的利用率纳入其环境、社会与治理（ESG）报告^[4]。例如，中泰化学公司在2023年发布的ESG报告中披露了100%的非常规水源利用率。社会各方的共同参与为水资源管理提供了更多的视角与力量，推动了水资源的合理配置与高效利用。

5 结语

水资源的有效利用对于新疆及其他干旱地区的社会经济可持续发展至关重要。通过非常规水资源调度技术，不仅能够解决水资源短缺问题，还可以促进环境保护与经济的协调发展。新疆地区的调度技术涵盖了水质分级回用、智能管网与多水源联合调度等创新措施，显著提升了水资源的配置效率。但在实际操作过程中，技术的成熟度、管理体制的完善与政策支持力度仍然是亟待解决的挑战。因此，加强技术研发、优化政策支持与推动跨部门合作，将是未来非常规水资源调度成功实施的关键。随着技术的不断进步与管理体系的逐步完善，水资源的调度将更加高效与智能，进而为新疆乃至其他干旱地区的可持续发展提供坚实保障。

[参考文献]

- [1] 郑富玲, 陈娴, 韩莉, 等. 非常规水源推动下水资源价格系统动力学模型的构建——以宁夏地区为例[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(24): 38-41.
 - [2] 李自明, 刘斌, 景明, 等. 黄河流域非常规水源开发利用现状分析与思考[J]. 中国水利, 2025(1): 54-59.
 - [3] 周唐汉, 钟泽荟, 魏琦. 非常规水资源水权交易在南方丰水地区的实践和应用[Z]. 水利发展研究, 1-6[2025-03-14].
 - [4] 张佩瑶. 南方某市城区非常规水源利用现状与优化策略研究[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(2): 115-117.
- 作者简介: 王启玉(1990.2—), 毕业院校: 国家开放大学, 所学专业: 水利水电工程, 当前就职单位名称: 塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心水资源调度中心, 就职单位职务: 一般干部, 职称级别: 工程师。