

水资源时空分布不均衡对区域供水规划的约束作用研究

扎西才旦

西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院 西藏 拉萨 850000

【摘要】西藏自治区作为我国重要的战略水源库，水资源总量丰富但时空分布极度不均，给区域供水规划带来严峻挑战。本文基于“三生”功能框架，采用实证分析与案例研究相结合的方法，系统探讨西藏水资源时空分布特征及其对供水规划的约束机制。研究表明，西藏水资源呈现“东丰西枯、夏丰冬枯”的分布格局，不均衡性导致供水工程面临冻土施工难度大、季节性缺水突出、生态保护与开发矛盾尖锐等约束。针对这些问题，本文提出“技术创新-管理优化-生态协同”三位一体的应对体系，包括高寒区光伏防冻供水技术、水资源动态调度机制、分区差异化供水模式等具体措施，并以那曲市木托村供水工程为例验证了措施的有效性。研究成果可为西藏及类似高海拔地区的供水规划提供科学参考。

【关键词】水资源；时空分布；供水规划；约束作用；西藏地区

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.046

1 研究背景

西藏自治区是我国水资源最丰富的地区之一，河川多年平均径流量达 $4.394 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占全国河川径流量的 16.5%，相当于长江上游宜昌站多年平均径流总量。境内分布着雅鲁藏布江、怒江、澜沧江等著名江河，冰川储量约 $3.0 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占全国冰川总储量的 53.6%，年融水径流量达 $3.4915 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，占西藏河川径流总量的 8.0%。然而，如此丰富的水资源却面临着严重的时空分布不均衡问题，导致西藏成为我国供水保障难度最大的地区之一。从战略地位看，西藏作为青藏高原的核心区域，其水资源安全不仅关系到当地经济社会发展和生态保护，更影响着长江、黄河等下游流域的水资源安全。随着西藏城镇化进程加快和乡村振兴战略实施，生产、生活用水需求持续增长，而水资源时空分布不均与用水需求之间的矛盾日益突出。特别是在高海拔牧区和偏远乡村，“饮水难”问题长期存在，成为制约区域发展的重要瓶颈。因此，深入研究西藏水资源时空分布特征对供水规划的约束作用，提出科学有效的应对措施，具有重要的理论价值和实践意义。

2 西藏水资源时空分布特征

2.1 空间分布特征

西藏水资源空间分布呈现显著的“东高西低”格局，与地形地貌和气候条件密切相关。受印度洋暖湿气流影响，藏东南和藏东地区降水丰富，成为河川径流的主要来源区。数据显示，藏东南林芝市的水资源承载力显著高于其他地市，其“三生”功能（生产、生活、生态）的耦合协调度达到 0.65 以上，而藏西北阿里地区仅为 0.3 左右，相差一倍以上。

从水系分布看，西藏水资源集中分布于藏东“三江”水系（怒江、澜沧江、金沙江）、藏中和藏东南雅鲁藏布江中下游水系以及喜马拉雅山南翼诸河流。这些地区森林植被茂密，冰川积雪发育，水源涵养能力突出。调查显示，藏东南亚高山云、冷杉林生态系统最大持水能力达 $3000 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 以上，全区森林生态系统年水源涵养总量约达 $3.55 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，占全区河川径流总量的 8.1%。与此形成鲜明对比的是，藏北高原和藏西地区气候干旱，降水稀少，水资源极度匮乏。那曲市北部、阿里地区等地年降水量不足 300mm，而蒸发量却高达 2000mm 以上，导致这些地区成为西藏供水最困难的区域。这种空间分布差异使得西藏供水规划必须面对“水多的地方人少，人多的地方水不够”的现实矛盾。

2.2 时间分布特征

西藏水资源在时间分配上呈现“夏丰冬枯”的显著特征，降水和径流的季节性变化极大。受季风气候影响，全区 60% 以上的降水集中在 4-9 月的雨季，其中 7-8 月降水量占全年的 40% 左右。这种高度集中的降水模式导致夏季易发生洪水，而冬季则普遍缺水。冰川融水作为西藏水资源的重要组成部分，其时间分布同样具有强烈季节性。研究表明，西藏冰川融水主要集中在 5-9 月，占全年融水量的 85% 以上，这与农业灌溉用水需求在时间上具有一定的匹配性，但与冬季生活用水需求形成矛盾。对于高海拔地区，季节性冻土的冻融循环进一步加剧了水资源时间分布的不均衡性。以那曲市为例，每年 11 月至次年 3 月，气温低至 -20°C 以下，地表以下永久冻土层厚达数十米，导致地下水无法开采，地表径流冻结，形成严重的季节性缺水。木托村村民曾长期面临冬季水井冻结、不得不跨村取水的困境，反映了时间分布不均对供水保障的严

峻挑战。

2.3 气候变化的影响

在全球气候变化背景下,西藏水资源的时空分布正在发生深刻变化,进一步加剧了其不均衡性。研究显示,西藏冰川退缩速度加快,近30年来冰川面积减少了约15%,这导致冰川融水在短期内有所增加,但长期来看将面临枯竭风险。冰川融水占河川径流比重较高的藏西北地区,未来可能面临更为严重的水资源短缺。气候变化还导致降水格局发生改变,藏东南地区降水呈现增加趋势,而藏北地区降水变化不明显,这种差异将进一步拉大区域水资源差距。同时,极端天气事件频率增加,旱涝交替更加频繁,给供水系统的稳定性和可靠性带来更大挑战。

3 水资源时空分布不均衡对供水规划的约束机制

3.1 自然条件约束

(1)地形地质约束是西藏供水规划面临的首要自然障碍:西藏平均海拔超过4000米,地形复杂,高山峡谷与高原盆地交错分布,导致水源地与用水区距离遥远,输水成本高昂。在藏北高原,广袤的草原上居民点分散,单村供水人口少但覆盖范围大,使得供水工程投资效益比偏低。

(2)冻土问题对供水工程建设和运行构成严重制约:那曲市水利局副局长胡春雨指出:“高海拔地区的永久冻土层特别厚,给供水造成很大困难”。在冻土区进行管道铺设,面临三大难题:一是深埋管道开挖困难,“一铁锹下去就是冻土”;二是浅埋管道冬季易冻结,导致供水中断;三是冻融循环造成管道破裂,维护成本高昂。木托村曾多次尝试打井和铺设管道均告失败,反映了冻土约束的严重性。

(3)气候条件对供水系统运行影响显著:高海拔地区昼夜温差大,极端低温可达-30°C以下,普通供水设备难以适应。同时,强紫外线辐射加速设备老化,大风天气增加管道维护难度。这些气候因素不仅提高了供水工程的建设标准,也增加了长期运行成本。

3.2 工程技术约束

水资源时空分布不均衡给供水工程技术选择带来诸多限制。在空间分布方面,藏东南地区虽水资源丰富,但地形陡峭,建设大型蓄水工程难度大、成本高;而藏西北地区水源匮乏,跨区域调水工程面临距离长、扬程高的技术挑战。在时间调节方面,季节性缺水要求供水系统具备足够的调蓄能力,但西藏大部分地区缺乏适宜建设大型水库的地形条件。小型蓄水工程则因冬季严寒易结冰,调蓄效果受限。那曲市木托村曾

采用运水车储水的方式应对冬季缺水,但这种方式成本高、供水不稳定,并非长久之计。技术适应性是另一大挑战。常规供水技术在西藏特殊环境下往往“水土不服”。例如普通塑料管道在低温下易脆裂;传统水处理设备在低气压环境下效率下降;电力供应不稳定地区难以保障抽水设备运行。这些问题要求供水技术必须进行针对性创新和改造。

3.3 经济社会约束

(1)经济成本约束十分突出:西藏地广人稀,供水工程单位投资远高于内地。以农村饮水工程为例,西藏单户供水成本是全国平均水平的3-5倍。那曲市“十四五”期间投入1.95亿元实施农村饮水维修养护建设2131处,平均每处投资约9.15万元,仅受益13.2万人口,人均投资达1477元。水资源分布不均导致的“近水楼台”与“远水解不了近渴”现象,进一步加剧了供水成本的区域差异。

(2)人口分布与用水需求的不匹配:西藏人口主要分布在河谷地带和城镇周边,而这些地区往往不是水资源最丰富的区域。牧区居民逐水草而居,定居点分散且季节性变动,给集中供水规划带来困难。正如木托村作为牧业村,村民需要将水龙头设在室外方便喂养牲畜,这与冬季防冻要求形成矛盾。

(3)生态保护约束日益趋紧:西藏作为重要的生态安全屏障,水资源开发受到严格限制。雅鲁藏布江、怒江等国际河流的开发需考虑跨境影响;藏北高原湖泊湿地是重要的生态系统,水资源利用不能破坏其生态功能。这种生态约束使得许多潜在水源地无法开发,加剧了水资源供需矛盾。

4 应对水资源时空分布不均衡的多措施体系

4.1 工程技术措施创新

高寒区特色供水技术体系建设是突破自然约束的关键。针对冻土问题,可采用“光伏+防冻”一体化技术方案,那曲市木托村的实践证明了其有效性。该方案包括三个核心部分:一是高寒型光伏自动净化水站,利用太阳能提供动力,解决无电地区供水问题;二是新型光伏防冻管道,通过沿管道布设小型太阳能光伏板加热,确保管内温度在冰点以上;三是光伏防冻取水桩,采用夹层设计并灌注保温材料,配合光伏加热确保冬季不结冰。这种技术体系特别适合高海拔牧区分散供水需求。

水源开发技术方面,应根据区域特点差异化选择。藏东南地区可发展引水工程,利用丰富的径流资源;藏西北地区重点开发地下水,采用抗冻深井技术;而

藏中地区则应建设水库和塘坝，增强季节性调蓄能力。对于冰川融水丰富的区域，可建设适当的拦截工程，提高利用率。

节水技术推广是缓解供需矛盾的重要手段。农业领域应推广适合高原特点的滴灌、喷灌技术，减少蒸发损失；生活用水方面普及节水器具，建设中水回用系统；工业用水则应提高循环利用率。在水资源极度匮乏的藏西北地区，可考虑推广苦咸水淡化技术，拓展水源渠道。

4.2 管理机制优化

水资源统一调度机制建立是应对时空不均的制度保障。应建立覆盖全区的水资源管理信息系统，实时监测降水、径流、冰川融水等情况，实现水资源动态调度。在时间维度上，丰水期蓄水、枯水期科学配水；在空间维度上，统筹调配跨区域水资源，实现“丰蓄枯用、东水西补”。

专业化管护体系建设可提高供水工程效益。借鉴那曲市“第三方公司+水管员”的模式，实行供水工程专业化运营维护。每个区县设立农村供水运行管护站，每个村培训1-2名专职“水管员”，负责日常检查和简单维修，复杂问题由专业公司处理。这种模式既可提高维护效率，又能创造本地就业岗位。

水价形成机制改革有助于促进节约用水。应建立反映水资源稀缺程度和供水成本的阶梯水价制度，对高耗水行业实行累进加价。在牧区和偏远地区，可采用“基本水价+计量水价”的方式，保障基本用水需求的同时促进节约。水价收入应专项用于供水工程维护，形成良性循环。

4.3 政策与生态措施

(1) 分区差异化供水规划政策可提高规划科学性：根据水资源承载力空间差异，将西藏划分为优化开发、重点开发、限制开发和禁止开发四类区域。藏东南优化开发区可适度扩大供水规模；藏中重点开发区应提高水资源利用效率；藏西北限制开发区需严格控制用水增长；生态脆弱的禁止开发区则应考虑生态移民，减少人为干扰。

(2) 生态补偿机制建立能协调开发与保护关系：对重要水源涵养区实行生态补偿，鼓励保护行为；对水资源调出区给予经济补偿，平衡区域利益；建立跨境河流生态影响评估机制，确保开发活动的可持续性。通过生态补偿，使保护者受益、使用者付费、破坏者赔偿。

(3) 科技支撑与人才培养是长期保障：应设立西

藏供水技术研发专项，重点攻关冻土区供水、光伏提水、高原节水等关键技术。建立本地技术人才培养基地，加强供水从业人员培训，提高操作和维护技能。同时，加强与内地科研机构合作，引进先进技术和管理经验。

5 案例研究

5.1 工程背景与挑战

木托村位于西藏那曲市色尼区古露镇，海拔近4800米，是一个典型的牧业村。在供水工程实施前，村民长期面临严重的用水困难：冬季需凿冰取水，水质差且极不方便；后来的村中心水井在严寒天气经常冻结，村民不得不前往十几公里外的邻村取水。多次尝试铺设管道均因冻土问题失败，冬季只能依赖运水车供水，成本高昂且不稳定。木托村供水面临的核心挑战包括：

(1) 永久冻土层厚，打井和管道深埋困难。

(2) 冬季极端低温（-20°C以下）导致管道和水井冻结。

(3) 牧民室外用水需求与防冻要求的矛盾。

(4) 地处偏远，电力供应不稳定。这些挑战集中体现了西藏高海拔牧区供水的典型难题，是研究水资源时空分布约束的理想案例。

5.2 技术方案与实施过程

针对木托村的特殊情况，工程采用了“光伏驱动+防冻设计+智能控制”的综合技术方案。取水端建设高寒型光伏自动净化水站，利用太阳能发电驱动取水和净化设备，解决电力供应问题。水源选择深层地下水，通过专业钻探技术穿透冻土层，确保水源稳定。

输水系统采用新型光伏防冻管道，沿管道每隔一定距离布设小型太阳能光伏板，产生的电能用于管道加热，确保管内温度始终在冰点以上。管道虽因冻土限制只能浅埋，但通过保温和加热结合，有效解决了冻结问题。用水端设计了光伏防冻取水桩，采用特殊夹层结构并灌注保温材料，配合光伏加热系统，确保即使在极端低温下也能正常取水。取水桩位置兼顾了牧民喂养牲畜的便利性，平衡了生活与生产用水需求。

工程实施分三阶段进行，第一阶段（2022年）完成水源勘察和技术试验，解决冻土钻井和管道防冻的关键技术问题；第二阶段（2023年）建设取水和净化设施，铺设主干管道；第三阶段（2024年）安装入户管道和取水桩，进行系统调试和村民培训。整个过程历时近三年，期间多次调整优化技术方案，最终实现

稳定供水。

5.3 实施效果与经验启示

木托村供水工程的成功实施，彻底改变了村民的用水状况。村民桑杰扎西表示：“饮水有保障了，心里暖啊！”从凿冰取水到家中接水，从四处奔波到打开龙头就有水，工程显著提升了村民生活质量。更重要的是，该工程在2024-2025年冬季经历了-25°C极端低温考验，供水系统运行正常，证明了技术方案的可靠性。经济社会效益方面，工程虽初期投资较高，但长期运行成本低，光伏供电基本实现能源自给。专业管护体系的建立确保了工程可持续运行，村民满意度达95%以上。工程实施后，木托村告别了冬季雇车拉水的历史，每年节约运输成本约5万元。该案例的经验启示主要有三点，一是技术创新必须因地制宜，不能简单照搬内地经验，而应针对高原特殊环境进行适应性改造；二是系统思维至关重要，从取水、输水到用水的每个环节都需统筹考虑，形成完整解决方案；三是群众参与是保障，工程设计应充分考虑当地生产生活习惯，加强村民培训，提高管护能力。这些经验对西藏其他地区的供水工程建设具有重要借鉴意义。

6 结论

本文通过对西藏水资源时空分布特征及其对供水规划约束作用的系统研究，西藏水资源时空分布不均衡特征显著，空间上呈现“东丰西枯”的格局，藏东南水资源承载力是藏西北的5-8倍；时间上表现为“夏丰冬枯”，60%的降水集中在4-9月，冰川融水占河川径流的8%。这种分布格局是由地形地貌、气候条件和生态环境共同作用的结果，并在气候变化影响下进一步加剧。

水资源时空分布不均衡对西藏供水规划形成多维度约束：自然条件方面，冻土、地形和极端气候增加了工程难度；技术层面，常规供水技术适应性差，特殊技术研发滞后；经济社会领域，成本高、人口分布散、生态约束紧等问题突出。那曲市木托村的案例充分反映了这些约束的叠加影响。应对这些约束需要构建“技术创新-管理优化-生态协同”的多措施体系。工程技术上，应发展光伏防冻供水、深井取水等特色技术；管理机制上，需建立水资源统一调度、专业化管护和合理水价制度；政策层面，应实施分区规划和生态补偿。这些措施在木托村等案例中已取得良好效果。

参考文献：

- [1] 陈桂顶,朱建国,蒋彬,等.基于聚类分析法的江苏省城乡统筹供水规划模式研究[J].给水排水,2024,60(08):1-5.
- [2] 徐娜.流域综合规划实施对区域生态环境的影响研究[J].环境与发展,2020,32(12):1-2.
- [3] 周斌,汤其辉.上海地区城中村改造区域供水规划方案[J].净水技术,2017,36(S2):136-138.
- [4] 张水平,崔利军.城郊区域供水系统建设规划研究[J].轻工科技,2016,32(02):77+112.
- [5] 马明,涂向阳,邢军,等.城乡统筹视角下的寿县供水规划实践探索[J].宿州学院学报,2019,34(06):74-79.