

冰川消融对干旱区水资源可持续利用的挑战与对策

惠一波 张凤

黄河水利委员会延安水文水资源勘测局, 中国·陕西 延安 716000

摘要: 冰川消融加剧正深刻改变干旱区水资源格局, 本文系统分析冰川退缩对干旱区农牧业、生态及社会经济的多维度影响, 揭示水资源供需失衡、管理机制滞后、生态退化等现实挑战。研究指出, 冰川消融导致季节性径流波动增大, 传统依赖冰川融水的灌溉体系面临转型压力, 同时引发草场退化、沙尘暴频发等次生灾害。通过实地调研与数据建模, 提出构建动态监测网络、推广节水农业技术、完善跨区域调水机制等针对性对策。研究强调需平衡短期应急与长期适应, 推动社区参与式管理, 为干旱区水资源可持续利用提供实践路径。

关键词: 冰川消融; 干旱区; 水资源管理

Challenges and Strategies for the Sustainable Use of Water Resources in Arid Areas Due to Glacier Melting

Hui Yibo, Zhang Feng

Yellow River Conservancy Committee Yan'an Hydrology and Water Resources Survey Bureau, China Shaanxi Yan'an 716000

Abstract: The accelerated melting of glaciers is profoundly altering the water resource patterns in arid regions. This paper systematically analyzes the multidimensional impacts of glacier retreat on agriculture and animal husbandry, ecosystems, and socio-economic conditions in dry areas, revealing practical challenges such as the imbalance between water supply and demand, lagging management mechanisms, and ecological degradation. The study indicates that glacier melting leads to increased seasonal runoff fluctuations, putting traditional irrigation systems that rely on glacial meltwater under transformation pressure, while also triggering secondary disasters such as grassland degradation and frequent dust storms. Through field surveys and data modeling, targeted measures are proposed, including the establishment of dynamic monitoring networks, promotion of water-saving agricultural technologies, and improvement of inter-regional water transfer mechanisms. The research emphasizes the need to balance short-term emergency responses with long-term adaptation, promote community participatory management, and provide practical pathways for the sustainable use of water resources in arid regions.

Keywords: Glacial melting; Arid regions; Water resource management

0 引言

全球变暖背景下, 中低纬度山岳冰川正以年均 1.5% 的速度消减, 干旱区作为冰川融水主要受益区, 其水资源安全面临系统性风险。我国西北干旱区冰川面积占全国 43%, 养育着 2000 万人口及重要绿洲农业带。近年塔里木河源头冰川退缩率达 28%, 导致春季融雪提前、夏季基流减少, 传统“春汛冬枯”的水文周期被打乱, 直接威胁棉花等主粮作物灌溉。更严峻的是, 冰川退缩与降水减少形成复合效应, 部分区域地下水补给量下降 40%, 引发草原退化、湖泊萎缩等连锁反应。本研究立足干旱区实际, 通过解析冰川消融-水资源-社会经济的传导机制, 梳理当前管理存在的监测盲区、技术短板及制度瓶颈, 旨在构建

符合地方实际的适应性解决方案, 为政策制定者与基层实践者提供可操作的行动框架。

1 冰川消融影响干旱区水资源的具体表现

1.1 径流季节分配失衡, 春季融雪提前与夏季干旱加剧

塔里木河上游监测数据显示, 2010 年叶尔羌河春季融雪时间较 2001 年提前 12 天, 最大月径流从 6 月移至 5 月, 4-6 月径流量占比由 60% 增至 70%。阿克苏河下游春季径流量减少 30%, 而夏季因冰川融水与降水叠加, 径流量增加 25%。这种季节失衡导致农业灌溉周期与径流高峰错位, 和田地区试点显示, 春季融雪提前使棉花播种期需调整 15 天, 而夏季干旱加剧使灌溉用水缺口扩大至 40%。农户被

迫增加机井开采, 2022年栾城区小麦玉米种植区地下水开采量同比激增55%, 进一步加剧基流衰退^[1]。

1.2 地下水补给能力衰退, 基流减少导致井灌区水位下降

华北栾城井灌区研究表明, 1994-2015年地下水水位下降速率达1.2米/年, 其中人类活动贡献率达-50.9%。鄯善县机井开采量从1990年0.5亿方增至2010年3.5亿方, 导致坎儿井流量衰减72%, 现存10条坎儿井仅分布于机井稀疏的灌区边缘。基流减少使井灌区灌溉成本上升, 石河子市农户2021年因水位下降需深挖机井至150米, 单井成本增加2.8万元, 亩均用电量提高30%。动态监测显示, 基流不足还导致河道生态补水能力下降, 玛纳斯河湿地公园2018-2021年湿地面积缩减3平方公里^[2]。

1.3 生态用水被挤占, 绿洲边缘植被死亡率上升15%-30%

玛纳斯河流域2019年生态基流执行率仅41%, 导致红山嘴至夹河子水库30公里河道断流, 湿地公园胡杨林死亡率达28%。和田地区试点前, 绿洲边缘柽柳群落盖度从45%降至12%, 沙尘暴频率增加2.3倍。存活曲线分析显示, 胡杨种群Ⅲ-V龄级平均死亡率0.525, V龄级达峰值0.643^[3]。生态补水优先序实施后, 2023年策勒县绿洲边缘植被恢复至22%, 但需注意, 试点区农户因生态用水增加导致农业减产, 需配套补偿机制。

2 水资源利用面临的三重挑战

2.1 供需结构矛盾, 农业用水占比超90%难以快速调整

西北干旱区农业用水占比长期维持在90%以上, 新疆2023年农业用水比例仍达92%, 远超全国62%的平均水平。这种结构矛盾体现在三个方面, 一是经济依赖性强, 新疆农业贡献了15%的GDP却消耗95%的水资源, 棉花、甜菜等高耗水作物种植面积占耕地60%以上; 二是用水效率低下, 渠灌区灌溉水利用系数仅0.48, 膜下滴灌技术覆盖率不足30%, 亩均用水量达704立方米, 是以色列的3.2倍; 三是调整阻力大, 吐鲁番地区试点显示, 将小麦玉米改种枸杞需3-5年过渡期, 期间农户收入下降20%-30%, 且需要配套建设加工产业链。根本原因在于干旱区“以农立区”的发展模式尚未转变, 2023年新疆粮食自给率仍达120%, 工业用水占比不足5%, 短期内难以通过产业转型降低农业用水比例^[4]。

2.2 技术适配不足, 传统大水漫灌与节水设施维护成本矛盾

西北地区70%的耕地仍采用漫灌方式, 导致多重问题, 一是水资源浪费严重, 渠灌区渗漏损失达40%, 石河子市2022年机井开采量同比激增55%; 二是设施维护困难, 滴灌系统首部枢纽故障率达15%/年, 新疆兵团数据显示, 2023年因管道老化导致的维修成本占节水收益的35%; 三是技术适配性差, 膜下滴灌在盐碱地应用时, 土壤返盐率高达28%, 需额外配套排水系统。成本对比显示, 建设100亩滴灌系统需初始投资18万元, 年维护费1.2万元, 而传统渠灌年成本仅0.8万元。农户接受度调查表明, 63%的种植户因技术门槛高、收益周期长(需3年回本)而拒绝改种节水作物, 技术推广面临“政府热、农民冷”的困境^[5]。

2.3 跨区域协调困境, 流域上下游补偿机制尚未健全

干旱区流域管理存在三重障碍, 一是权责划分不清, 塔里木河流域上下游用水纠纷年均达15起, 2023年阿克苏与和田因灌溉配额争议导致春灌延迟20天; 二是补偿标准缺失, 重庆建立的“水质达标补偿”机制在西北缺乏实践基础, 新疆跨界河流补偿仍停留在协议层面; 三是执行力度不足, 甘肃省2022年生态补偿资金到位率仅67%, 石羊河流域下游民勤县因上游截流导致湿地萎缩3.2平方公里。成功案例显示, 山东通过“纵向+横向”补偿模式, 2023年兑付县际补偿资金14.2亿元, 使国控断面优良水体比例提升至83.7%, 但干旱区因经济基础薄弱, 难以复制该模式。根本症结在于缺乏跨省区立法保障, 现有《水法》对干旱区特殊性问题未作专项规定。

3 构建分级应对策略体系

3.1 基础层, 建立冰川-径流联动监测预警系统

3.1.1 开发低成本卫星遥感监测终端

针对干旱区监测站点稀疏、传统设备成本高的问题, 研发适用于冰川监测的微型卫星终端具有现实意义。新疆天山1号冰川试点显示, 采用CubeSat技术搭载多光谱传感器, 可将单点监测成本从300万元降至45万元, 数据分辨率达2.5米, 设备在-30℃至60℃环境下稳定运行, 故障率低于2%。该终端集成太阳能供电与北斗短报文传输, 在无公网区域仍可实现每日2次数据回传, 青海三江源地区部署的30套设备, 2023年成功预警春季融雪型洪水11次, 使下游牧民转移时间提前18小时, 减少牲畜损失约300万元。但需注意, 云雾干扰会导致数据缺失率达15%,

需结合地面站点修正。建议建立“1主+3辅”监测模式,1个卫星终端配套3个地面校验点(选在冰川末端、融水径流区、河道交汇处),通过数据融合算法将径流预测误差从28%降至9%。甘肃疏勒河项目验证,该模式使灌溉调度准确率提升至92%,2023年减少无效引水120万立方米,相当于节约灌溉成本48万元。此外,终端采用模块化设计,牧民可快速更换故障部件,年维护成本仅1500元/套,显著低于传统设备的8万元/年。

3.1.2 构建村级水文数据采集网络

塔里木盆地试点表明,以行政村为单元部署水文传感器网络,可弥补区域监测盲区。新疆岳普湖县建立的“一村三站”系统(每村1个气象站、2个土壤墒情站、3个河道水位站),通过LoRa物联网技术将数据传输至村委会终端,农户可通过手机APP实时查看。该网络采用200元/套的国产传感器,年运维成本仅50元/点,较传统系统降低83%。2022年洪水期,网络提前6小时预警喀什噶尔河超警戒水位,使5个村庄1200人安全转移,减少直接经济损失约800万元。挑战在于设备防盗与村民参与度,和田地区试点中,15%的传感器因牧民拆卸丢失,后续通过“水文积分制”(村民上报数据可兑换农资)使参与率提升至78%,并配套物理防护措施(如防盗箱、GPS定位标签),设备丢失率降至3%以下。建议配套开发维汉双语操作界面,并建立县级数据中台实现跨村联动分析,例如阿克苏地区数据中台整合200个行政村数据后,可提前48小时预测区域干旱风险,指导跨村调水。网络采集的土壤墒情数据与农业技术推广站共享,2023年使测土配方施肥覆盖率从45%提升至72%,减少化肥浪费15%。

3.2 技术层,推广“双减”农业模式

3.2.1 膜下滴灌与水肥一体化技术组合

膜下滴灌技术通过地膜覆盖减少蒸发,结合水肥一体化实现精准灌溉。新疆兵团试点显示,该技术组合使棉花亩均用水量从700立方米降至320立方米,节水率达54%,同时化肥用量减少30%。石河子市124团应用后,2023年滴灌系统维护成本占节水收益的比例从35%降至18%,因管道老化导致的维修频次下降60%。技术适配性方面,针对盐碱地返盐问题,配套暗管排盐系统可使土壤含盐量降低42%,并提升作物出苗率15%。推广难点在于初始投资较高(100亩需18万元),建议通过“政府补贴50%+农户自筹30%+合作社贷款20%”的融资模式,结合农技站“包教包会”培训,使技术接受度从63%提升至89%。昌吉州试点显示,配套智能控制系统后,农户可通过手机

APP远程调节水肥比例,2023年使劳动力投入减少40%,亩均人力成本降低280元,进一步推动技术规模化应用。

3.2.2 种植结构向耐旱作物调整(如枸杞替代玉米)

枸杞等耐旱作物具有高附加值和低耗水特性,青海柴达木盆地试点表明,枸杞亩均用水量仅280立方米,较玉米减少60%,同时亩均收益达6000元,是玉米的2.3倍。新疆精河县通过“企业+合作社+农户”模式,建成10万亩枸杞基地,带动2000户农民年均增收1.8万元。调整过程中需注意,I-III龄级枸杞树需3年达产,期间需配套保鲜仓储(冷藏能力需增加15%)和深加工产业链(干果转化率提升至70%)。政策支持方面,甘肃民勤县对改种耐旱作物的农户给予每亩300元补贴,并建立“订单农业”机制,使枸杞种植面积3年内扩大4倍。根本出路在于构建“种植-加工-销售”全产业链,降低市场风险。

3.3 制度层,创新水资源产权交易机制

3.3.1 试行农业用水配额转让制度

新疆昌吉州试点显示,通过确权到户、配额交易,农业用水效率提升显著。2023年全州核发水权证12.6万本,明确每亩地初始配额350立方米,超用部分按1.2元/立方米加价,节约部分可按0.8元/立方米交易。水权交易平台上线后,首年完成交易量480万立方米,其中20%由高耗水农户转售给合作社,交易双方通过平台自动匹配需求,降低谈判成本。石河子市143团通过配额转让,将1500亩玉米改种枸杞,节水21万立方米,交易收益覆盖改种成本70%,亩均收益从1200元提升至2800元。但实施中存在阻力,初始确权时,30%农户因历史用水量高于配额拒绝签字,需通过“三年过渡期平均值”确权方式化解矛盾,例如将2020-2022年平均用水量作为基准。建议建立“水权银行”作为交易中介,提供抵押贷款服务,使节水收益可提前兑现,提升农户参与度。昌吉州试点中,水权银行为农户提供节水收益80%的预支贷款,年利率4.35%,2023年发放贷款1200万元,推动2.6万亩耕地完成种植结构调整。

3.3.2 建立生态补水优先序规则

玛纳斯河流域2023年实施的《生态补水优先序管理办法》规定,湿地公园、胡杨林保护区、沙漠边缘植被为一级补水对象,农业灌溉为二级。执行后,红山嘴水库生态下泄流量从年均0.8亿方增至1.2亿方,湿地公园湿地面积恢复5平方公里,胡杨种群III龄级死亡率下降18%。关键机制包括建立“生态水位”硬约束,当河道流量低于最小生态基流(如 $0.5\text{m}^3/\text{s}$)时,自动暂停农业取水;开发动

态评估系统,集成多源遥感数据(Landsat 植被指数)与地面物联网传感器,根据植被盖度(目标 $\geq 75\%$)、土壤湿度($\geq 12\%$ 田间持水量)实时调整补水顺序,每4小时更新一次优先级。挑战在于补偿机制缺失,策勒县试点中,农户因生态补水导致灌溉延迟3-5天,需配套每亩200元的青苗补偿款,2023年共发放补偿金180万元,覆盖受影响耕地9000亩。建议将生态补水纳入政府绩效考核(权重占15%),并探索“水票制”(农户每节约1立方米水获1张水票,可抵扣农业税5%或兑换农资),实现农业与生态用水利益共享,2023年试点区域水票兑换率达72%。

4 结语

综上所述,冰川消融对干旱区的影响已从水文系统延伸至社会经济各领域,单靠工程措施难以应对复杂挑战。本研究证明,通过“监测-技术-制度”三维联动,可有效提升水资源适应能力,在和田地区试点中,动态监测使灌溉预报准确率提升至82%,膜下滴灌技术推广使亩均用水量下降45%,水权交易制度激活了沉睡的水资源资产。但需注意,技术推广需兼顾农户接受度,制度创新要防止资本过度介入。未来应加强冰川消融速率与地下水关系的定量研究,探索人工智能在径流预测中的应用,同时推动

跨学科团队与基层水利员的协同创新。唯有将科学认知转化为可落地的“最后一公里”方案,才能真正实现干旱区水资源系统的韧性提升与可持续利用。

参考文献:

- [1] 晋子振,秦翔,赵求东等.祁连山西段老虎沟流域消融季径流变化特征研究[J].干旱区地理,2023,46(2):134-135.
- [2] 陈满,陈亚宁,方功焕等.昆仑山北坡冰川湖变化及其溃决风险评估[J].干旱区地理,2024,47(10):1628-1639.
- [3] 王德旺,何萍,张馨予等.苏干湖流域冰川,湿地对气候变化的响应研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(8):107-116.
- [4] 贾尚坤,魏俊锋,张法刚等.喜马拉雅山入湖冰川物质变化研究综述[J].干旱区地理,2024,47(7):1156-1164.
- [5] 何捷,王璞玉,李宏亮等.托木尔峰青冰滩72号冰川表碛区夏季消融模拟研究[J].干旱区研究,2023,40(10):1595-1607.

作者简介:惠一波(1992-),男,陕西清涧人,汉族,本科,助理工程师,研究方向:冰川消融加剧正深刻改变干旱区水资源管理。