

# 气候变化下干旱区地表水脆弱性评估与对策

吴洁

新疆维吾尔自治区塔城水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6647

**[摘要]** 气候变化背景下,地表水资源的脆弱性愈发明显,成为限制区域可持续发展的关键要素。基于此,本研究从自然与社会经济双重维度切入,构建了包含暴露度、敏感性与适应能力的三维评估框架,深入剖析了水资源系统对气候变化的响应机制,水资源脆弱性展现出明显的空间异质性,而且受冰川退缩、降水变动及用水结构紊乱等多方面因素影响。基于评估结果,给出了整合工程韧性提高、制度革新与生态修复的适应性治理办法,为干旱区水资源风险管理提供理论支撑与实践借鉴。

**[关键词]** 气候变化; 地表水资源; 脆弱性评估; 适应性管理

中图分类号: TV211.1 文献标识码: A

## Assessment and Countermeasures of Surface Water Vulnerability in Arid Regions under Climate Change

Jie Wu

Tacheng Hydrological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region

**[Abstract]** Under the background of climate change, the vulnerability of surface water resources in Xinjiang has become increasingly apparent and has become a key factor limiting regional sustainable development. This study constructs a three-dimensional evaluation framework that includes exposure, sensitivity, and adaptability from both natural and socio-economic dimensions, and deeply analyzes the response mechanism of the water resources system to climate change. The vulnerability of water resources in Xinjiang shows obvious spatial heterogeneity and is driven by various factors such as glacier retreat, precipitation changes, and water use structure disorder. Based on the evaluation results, adaptive governance methods integrating engineering resilience improvement, institutional reform, and ecological restoration have been proposed, providing theoretical support and practical reference for water resource risk management in arid areas.

**[Key words]** climate change; Surface water resources; Vulnerability assessment; Adaptive management

### 引言

全球气候变化借助改变水循环流程加重了干旱区水资源的供需矛盾,新疆作为中国典型的干旱地带,其地表的水资源高度仰赖冰川融水与山区的降水。而气候变暖正造成冰川缩减、径流变幅增大和极端水文事件屡屡出现,极大威胁水资源系统的平稳性,快速城镇化和农业拓展进一步加大了系统负荷。在这样的情形下,合理评估水资源脆弱性并制订适应性策略,对维护区域水安全、生态安全与粮食安全具备紧迫意义。

### 1 水资源脆弱性的概念

水资源脆弱性是一个用以度量水资源系统在内外干扰下蒙受损害概率的综合概念,其关键在于系统应对气候变化与人类活动等压力源的处理能力,这一概念一般搭建在“暴露度-敏感性-适应能力”的框架之上:暴露度展现了系统碰到的气候变化、用水压力等外部冲击的性质与程度;敏感性体现了水资源系统

自身因自然条件或社会经济结构而易于蒙受损害的内在特质,比如干旱区天然的水资源匮乏或极度依靠灌溉农业的产业格局;适应能力展现了系统借助工程、制度、技术等方式调节自身以减轻潜在危害乃至把握新契机的主动性。水资源脆弱性不是静态的结果,而是动态演进的过程,它透彻揭示了自然水循环过程与社会经济发展之间的相互作用与反馈规律。一个地方的水资源脆弱性越强,表明其水资源安全面临的威胁越甚,实现可持续发展遭遇的挑战也越艰巨。对脆弱性的精准评估是拟定科学适应性管理策略、提高区域水资源韧性的关键基础与前提<sup>[1]</sup>。

### 2 气候变化背景下新疆地表水资源脆弱性评估方法

2.1 创立“暴露度-敏感性-适应能力”(ESA)概念框架与指标体系

在气候变化背景下评估新疆地表水资源的脆弱性,最为关

键且核心的做法是搭建一个系统性的“暴露度-敏感性-适应能力”(Exposure-Sensitivity-Adaptive Capacity, ESA)概念框架,并且依此构建一套科学、全面、量化的指标体系。该框架判定,脆弱性是系统承受的气候压力(暴露度)、自身容易受损的状况(敏感性)以及应对和缓解压力的能力(适应能力)三者之间动态相互作用的结果。就新疆而言,这一框架的本地化运用十分关键,评估暴露度需重点聚焦气候变化的核心驱动要素,比如选取未来气候情景(如CMIP6的SSP-RCP情景)下降水量的时空变化比率、平均气温和最高气温的上升幅度、蒸发量的变化趋势以及极端气候事件(如干旱、暴雨)的频次和强度变化等指标,用以衡量气候变化对新疆水循环系统造成的外部压力强度。敏感性的评定则要刻画水资源系统内在的、易于遭受损害的特性,一般选取人均水资源占有量、径流深、干旱指数、生态环境需水满足率、灌溉农业用水比例等指标。这些指标体现了新疆作为干旱区,其水资源系统天生的不稳定性和对气候波动的高度敏感特性。适应能力的评定最为复杂,它涵盖社会经济与技术领域,意在衡量系统通过调整自身结构来规避或利用气候变化影响的能力,可选用单位GDP耗水量、水库调蓄能力、节水灌溉面积比例、科研投入强度、公众环境意识等指标<sup>[2]</sup>。

### 2.2 基于多源数据与地理信息系统的时空动态评估与制图

新疆地域广袤,水资源的时空分布极为不均衡,故而其脆弱性评估要采用基于多源数据融合与地理信息系统(GIS)技术的时空动态评估方法。这种方法的关键在于对上述指标体系里的每一项指标进行空间离散化操作,生成高分辨率的空间栅格数据层,进而揭示脆弱性在广阔区域中的精细分布态势及随时间的演变趋势。数据来源包括地面气象水文台站的长期观测数据、遥感反演结果。利用这种可视化制图法,能够明确识别出脆弱性的热点区域,譬如天山北坡经济带可能因高暴露状况(升温突出)和高敏感状况(用水量大)而呈现出高脆弱性,而昆仑山北麓或许因极低的适应能力(基础设施滞后)同样面临高风险。通过对比不同时间段的评估结果,能够动态跟踪脆弱性的演变路径,剖析其驱动机制。例如,冰川加速消融在短期内增加了河流的径流量,但从长远来看却增加了水资源干涸的风险。这种时空动态视角为认识复杂的水文响应过程和管理措施的时效性提供了极为关键的科学支撑。

### 2.3 耦合气候-水文模型与情景模拟的未来预测性评估

要科学测评气候变化对新疆地表水资源脆弱性的长久影响,需要突破对历史现状的剖析,转向基于未来气候情景的预测性评估,这依托于耦合全球气候模型(GCMs)与区域水文模型的情景模拟途径,此评估办法是一个多阶段、整合化的过程:从CMIP6等国际计划当中筛选多个性能优异的全球气候模型,提取其典型浓度路径。由于GCMs分辨率较为粗糙,要借助统计降尺度或者动力降尺度办法把它处理成适合新疆复杂地形的高分辨率气候情景数据,把这些处理好的未来气候数据当作输入,驱动一个经过严谨率定与验证的分布式水文模型,模拟未来数十年直至本世纪末新疆主要河流流域的径流形成、汇流过程以及水资源总

量的变化情形。模型仿真的输出成果,像未来径流量的变动趋向、季节性分布的变更(春季洪峰提早、夏季基流降低)以及极端水文事件的变动,为更新前述ESA框架中的“暴露度”和“敏感性”指标提供了关键的未来数据集合,基于此情况,再结合既定的社会经济发展路径(SSP情景)来预估“适应能力”指标的可能改变,最终达成对未来时段水资源脆弱性的综合量化评定。这种模型结合与情景推演的方法,不但能够回应“未来会怎样”的疑问,还能借助设定不同减排和发展情景,对比剖析不同路径下的脆弱性差别,进而评估减缓气候变化和强化适应措施的成效,为拟定具备前瞻性和韧性的水资源适应性管理策略给予有力的决策支撑。

## 3 气候变化背景下新疆地表水资源脆弱性适应性管理对策

### 3.1 强化工程基础设施智能化与调控

针对气候变化背景下新疆地表水资源的脆弱特性,最为紧要且刻不容缓的工作是打造一个技术领先、调配灵便、具备强大抗御力和复原力的物理水网系统,其关键在于借助现代化工程与数字技术的深度融合,提高水资源系统的整体韧性与可控性。新疆水资源的主要矛盾在于其时空分配与需求极度不相符,而气候变动正急剧加剧这一矛盾,呈现为冰川消退导致长期水源基础不稳固、降水变率增大引发更频繁的旱涝急转,以及蒸发加剧提高生态耗水量。针对这种复杂情形,单一的、传统的工程举措已无法应对,要实施系统性的基础设施提升与智能化革新,这需要在关键河流的出山位置,精心谋划并建造一批具备战略价值的山区控制性水库,这些工程有别于传统以灌溉或发电为主要用途的水库,其核心功能是落实“洪水资源化”和“径流多年调节”,也就是精确拦截夏季因高温与极端降水造成的混合型洪峰径流,而后把它贮存起来,用来弥补未来或许因冰川“储水”功能消失而出现的枯水年份,从而把气候风险转化成一定的资源机遇<sup>[3]</sup>。

工程的成效最终反映在用户的终端使用效率上,一定要开展一场覆盖全部区域的、完全的灌区现代化改造工作,这绝非仅仅是安装滴灌管道,而是涵盖渠系防渗、田间标准化打造、用水计量设施全面覆盖以及自动化控制闸门在内的整个输配水系统的智能化革新,目的是达成从“水源地”到“作物根系”的全流程精准控水,最大程度减少渗漏和蒸发损耗。更高级别的层面而言,应当创建一个高度智能的“水联网”系统,该系统借助北斗卫星遥感、地面传感器网络、无人机巡测等“空-天-地”一体化监测技术,实时捕捉全省域的水文气象信息;再借助5G/光纤网络把海量数据汇集到云端超算中心,运用融合了AI算法和水文模型的数字孪生流域平台,实施未来7-30天的来水预报以及多行业需水测算,并在此基础上模拟和优化不同调度计划的经济、生态和社会成效,最终得出最优抉择。

### 3.2 深化制度创新与市场机制建设

精良的硬件装备若没有精良的软件制度做搭配,其功能会明显减弱,处理水资源脆弱性的第二大关键举措是推动一场深

度的水治理变革,利用制度创新与市场机制构建,破解“公地悲剧”困境,引发全社会节水的内部动力,把水资源从低效能领域引领到高效能领域,实现社会福利最大化。新疆水资源管理长期碰到“九龙治水”的体制性障碍和“水价扭曲”的市场性障碍,应当推进一场系统性的水治理现代化革新,其关键是进一步拓展和精准化最严格水资源管理制度,不仅要牢牢恪守总量和强度“双控”红线,更要引入“气候风险红线”的动态调整机制,即根据未来气候情景的预测,按时科学评估和更改各地的可用水量 and 生态流量底线,让管控目标自身拥有气候适应性。

制度革新的关键切入点在于构建归属清晰、权责明确、流转顺畅的水权体系,一定在完成初始水权确权给各县市、主要灌区甚至是农民用水合作组织的条件下,构建一个公开、公平、公正的水权交易平台,且拟定细致的风险监管规则,准许并激励农业用户依靠持续性的实际节水,把其节省下来的水权经由市场交易转卖给急需发展用水的工业园区或城市,政府再从交易中收取一定的资源税用于生态补偿,这一过程不但赋予了水资源实际的资产价值,弥补了节水者的付出,还从宏观层面推动了水资源向高产产业的优化调配,是促成区域产业结构调整与升级的关键手段。

### 3.3 推进生态修复与基于自然的解决方案

从久远和基础上看,最奢华、最稳固的灰色基础设施也不能取代健康生态系统所给予的免费、持久且多元的水服务功能,降低水资源脆弱性的顶级战略是转变为生态优先的治理理念,主动投入资源并修复自然水循环构架,借助提升自然自身的稳定性与恢复能力来为人类社会给予根本性保障,这正是基于自然的解决方案(NbS)的核心要义,新疆的水资源起始于山区,最终受困于荒漠的围困,故而适应性管理必须依照这一自然地理格局实施系统性布局。

战略关键应当从传统的“以需定供”转变为“以水定绿”“以水定地”“以水定人”,把水生态系统的健康当作一切发展的绝对前提,在河流上游的山区范围,需开展最严苛的生态保护,

把关键的水源涵养区、冰川永久积雪带划设为生态禁区,借助推行退牧还草、开展封山育林、构建生态防护林体系等办法,最大程度地保育和恢复森林、草原、湿地等天然“绿色水库”的固土、蓄水、净化功能,这是维持径流稳定性和水质安全性的根基。在绿洲与荒漠的过渡地带,首要任务是抢救式恢复和守护天然绿洲生态屏障,尤其是在塔里木河流域下游,需借助生态闸口开展有规划的地表水漫溢补给,拯救濒危的胡杨树林,抑制土地沙化和盐碱化,这道天然绿色屏障是阻挡沙漠合拢、守护人工绿洲的最后一道防线,其生态价值远超短期内开垦更多农田所取得的经济收益<sup>[4]</sup>。

## 4 结语

新疆地表水资源脆弱性治理要兼顾自然规律与社会需求,创建多尺度协同的适应性管理体系,未来要深化冰川-河流-绿洲的系统性保障,利用智能调控与生态修护提高系统韧性,同时要完备水权市场与气候适应型制度设计,研究给出的三维框架和治理路径能为中亚干旱区给予参考,最终达成水资源可持续利用与区域协调发展。

### [参考文献]

[1]杨月华,孟辉.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2021(2):1.

[2]夏军.气候变化背景下流域水资源的脆弱性评估与适应对策研究[C]//中国自然资源学会2011年学术年会.中国自然资源学会,2011.

[3]常秀荣.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识探析[J].建筑工程技术与设计,2019(32):2314.

[4]杨新军,温晓金,陈佳.脆弱性与恢复力整合:社会—生态系统可持续性研究转型与挑战[J].人文地理,2024,39(2):21-30.

### 作者简介:

吴洁(1987—),女,锡伯族,新疆塔城人,本科,中级职称,研究方向:水文水资源分析评价。