

基于气候变化的水资源调度优化模型及其在区域水利规划中的应用

纪伟

身份证号码: 120225198001290014

摘要: 近年来, 全球气候变化对水资源系统造成了显著冲击, 特别是在区域尺度上, 极端降水、干旱频率增加, 给传统的水资源调度与配置带来严峻挑战。论文聚焦于构建一种考虑气候变化不确定性的水资源调度优化模型, 并探讨其在区域水利规划中的应用实践。通过分析气候变化对水资源系统的多维影响, 构建以多源数据驱动的气象—水文耦合预测模型。研究结果表明, 该模型可有效提升区域调水效率和系统韧性, 为适应气候变化背景下的水资源科学管理提供了理论支持和实践路径。

关键词: 气候变化; 水资源调度; 优化模型; 区域水利规划

Water Resource Scheduling Optimization Model Based on Climate Change and Its Application in Regional Water Conservancy Planning

Wei Ji

ID No.: 120225198001290014

Abstract: In recent years, global climate change has caused a significant impact on the water resources system, especially at the regional scale, the frequency of extreme precipitation and drought has increased, which brings severe challenges to the traditional water resources scheduling and allocation. This paper focuses on constructing an optimization model of water resources scheduling that considers the uncertainty of climate change, and discusses its application practice in regional water conservancy planning. By analyzing the multi-dimensional impact of climate change on the water resource system, a coupled meteorological-hydrological prediction model driven by multi-source data is constructed. The results show that this model can effectively improve the efficiency of regional water transfer and system toughness, and provide theoretical support and practical path for the scientific management of water resources under the background of climate change.

Keywords: climate change; water resources scheduling; optimization model; regional water conservancy planning

0 前言

随着全球气温上升、降水模式变化和极端气候事件频发, 传统水资源管理模式面临巨大挑战。区域水利工程设计、运行和调度在规划初期通常以历史水文资料为基础, 而忽略了未来气候的不确定性, 极易造成调度效率低下与资源浪费。特别是在中国北方地区, 水资源时空分布极不均衡, 加之气候变化加剧了流域内洪涝与干旱并存的矛盾。为此, 科学构建考虑气候变化影响的水资源调度优化模型, 探索其在区域水利规划中的适应性应用, 对于实现“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时代水资源战略具有重要意义。

1 气候变化对区域水资源系统的影响分析

1.1 气候变化导致水资源时空分布格局发生深刻变化

气候变化最直接的影响体现在降水与蒸发时空格局的改变上, 进而影响区域水资源的形成与可利用性。在中国北方地区, 年均降水呈现总体减少趋势, 但区域分布愈发不均,

一些区域出现“旱区更早、涝区更涝”的现象。例如华北平原在 2000—2020 年期间, 降水年际波动系数由 0.17 上升至 0.23, 说明水资源供应的不稳定性显著增强^[1]。同时, 受气温上升驱动, 蒸发能力普遍增强, 导致地表水体和土壤水分加速损耗。据中国科学院地理资源所研究, 2020 年中国大多数区域潜在蒸散发量较 1980 年提高了 8%~15%, 尤其在黄淮、辽河流域影响显著。气候变化造成的降水期次错位与蒸发强化, 使得传统基于多年平均气温统计规律制定的水资源规划难以应对, 区域调水与蓄水工程面临不稳定负荷, 调度压力增大。

1.2 径流量年际波动加剧, 导致调水安全系数降低

气候变化不仅改变了降水总量, 还显著扰动了地表径流的生成规律, 使得年际之间的径流波动更加剧烈, 进而直接影响调水系统的安全裕度。以黄河上游为例, 受青藏高原气温升高和雪线后退影响, 雪融型径流峰值提前出现, 使得传统汛期调度窗口发生错位^[2]。据水利部水文局数据, 2010—2020 年黄河上游春季径流提前 8~12 天, 秋季来水量

减少约 18%。这种变化不仅加剧了供水计划的调整难度，还影响下游生态水量的保障。在缺乏实时反馈机制的调水系统中，往往导致供水与实际需求错配，从而形成“调得多、用不掉”或“调得少、不足用”的局面。此外，地下水补给能力也因降水减少和土壤干化而受限，导致地下水回补周期延长，形成表一地下水双重紧张局面。因此，在未来区域水资源调度中，必须将气候不确定性纳入模型约束，以提升系统的鲁棒性与动态响应能力。

1.3 水资源供需矛盾加剧，调度系统面临复合压力

气候变化与人类用水需求的持续增长叠加，造成区域水资源供需矛盾愈加突出。尤其是在经济快速发展的城市群和灌溉农业区，水资源负荷已逼近或超过生态承载极限。例如，北京市 2020 年总用水量为 38.2 亿立方米，其中自有水资源量仅占不足 20%，绝大部分依赖南水北调和地下水超采。若考虑气候变化情景 RCP8.5 路径预测，到 2050 年北京年均降水将减少 6.5%，而农业灌溉用水需求可能增长 10% 以上，城市工业及生态用水需求亦将持续扩大。这种趋势使得传统以“历史统计+规则调度”为基础的模式面临失效风险。由于降水极端性增强，洪涝灾害频次增加，而干旱年际出现间距缩短，调水系统需在保障安全、效率和韧性之间做出更复杂的权衡，如何协调“供”“需”“保”三者关系成为区域水资源管理的核心难题。

1.4 气候变化加剧生态系统脆弱性，倒逼调度模式转型

气候变化对区域生态系统的影响日益显著，特别是在水资源依赖性强的湿地、湖泊和河流生态系统中表现突出。以三江平原和鄱阳湖区为例，近年来由于上游来水量减少和干旱频发，湿地面积锐减、水体连通性下降，造成候鸟栖息地萎缩、水生生物种群锐减。据 2022 年生态环境部通报，鄱阳湖连续多年进入“枯水期提前、断流频繁”的状态，生态水位保障率下降至 60% 以下。传统水资源调度往往以供水优先为目标，忽视生态需水的时序性和敏感性，进一步放大了系统脆弱性。气候变化的外部扰动作用使得“人水争夺”问题更为激烈，这迫使水资源调度模式从“工程主导型”向“生态适应型”转型。在未来区域水利规划中，应将生态水量保障纳入刚性约束条件，推动建立“生态—经济—社会”多目标调度模型，实现生态系统的韧性恢复与水资源配置系统的可持续转型^[3]。

2 基于气候驱动的水文预测模型构建

2.1 构建以气候因子驱动的水文预测模型框架

在气候变化背景下，传统以历史径流资料为基础的水文模型已难以应对未来气象条件的不确定性。为提高预测的科学性与前瞻性，需构建以气象驱动因子为核心的水文预测模型。本研究采用了广泛应用于流域水文模拟的 SWAT 模型，其能够在空间尺度上细化土地利用、土壤类型与气象输入，

并模拟水循环各过程。模型驱动变量包括年均气温、年降水量和潜在蒸散发等。以华北某典型流域为例，2000 年至 2020 年年均气温由 11.2℃ 上升至 13.8℃，年降水量波动较大，从 468 毫米上升至 502 毫米后又下降至 460 毫米；与此同时，潜在蒸散发增加了 13.2%。这种趋势在表中可见，说明气候变化显著影响水循环系统。因此，SWAT 模型引入这些气候因子后可更真实地反映未来水文情势，有助于提升区域水资源管理的科学决策基础。

2.2 多源气象数据集成与预处理方法

为了确保模型输入的准确性与代表性，气候驱动型水文模型必须依赖多源异构数据的融合处理。在本研究中，选用国家气象信息中心发布的地面气象观测站点数据作为基础，包括气温、降水、湿度和风速等；同时辅以 MODIS 卫星遥感产品用于验证地表蒸散发和土地利用变化趋势。数据集成过程中需进行格式统一、缺失值填补与空间插值等处理。气象数据采用 IDW 反距离加权法进行空间插值，确保在流域尺度上分布均匀；遥感影像则通过 NDVI 指数提取植被覆盖，进而推导实际蒸散发因子。处理后数据可与 SWAT 模型输入格式匹配，保证气候驱动变量与水文过程耦合紧密。数据预处理后的质量控制也显示，气象站点日降水误差控制在 ± 5%，数据可用性达 97% 以上，具有较高的可信度，为模型后续模拟与调度决策奠定了坚实的数据基础，见表 1。

表 1 某区域 2000—2020 年主要气象因子年均值变化趋势

年份	年均气温（℃）	年降水量（mm）	潜在蒸散（mm）
2000	11.2	468	820
2005	11.9	502	845
2010	12.3	476	870
2015	13.1	489	905
2020	13.8	460	928

2.3 模型参数校准与验证提升预测精度

为确保模型预测结果的准确性，必须对水文模型进行参数校准与验证。本研究以 2010—2015 年为校准期，2016—2020 年为验证期，选取实测径流数据作为对比基准。采用 SWAT-CUP 工具对模型敏感参数（如土壤饱和导水率、地表径流初亏量、潜在蒸发系数等）进行 SUFI-2 算法自动校准，结果显示模型纳什效率系数（NSE）在校准期达到 0.83，验证期为 0.81，说明拟合效果良好，能准确反映气候变化条件下的径流变化趋势。进一步分析模型对不同气候情景的响应能力发现，SWAT 模型能在气温升高、降水变异的情况下稳定运行，对温度和降水的敏感性系数分别为 0.61 和 0.78，表明模型输出对气候输入高度敏感，适合用于气候情景预测下的水资源调度分析^[4]。

2.4 模型在中长期调度预测中的适用性评估

在区域水利规划中，预测中长期水文变化趋势是保障供水安全的重要基础。通过构建以气候变化路径 RCP4.5 和 RCP8.5 为驱动的未来情景，模型模拟了 2030 年与 2050 年

区域年径流变化趋势。结果显示,受气温升高与降水时空分布变化的共同影响,2030 年区域总径流量在 RCP4.5 情景下将减少 6.3%,而 RCP8.5 下减少幅度达 11.5%;至 2050 年,最严重情景下年径流减少幅度可能超过 15%。这种趋势将在农田灌溉、城市供水和生态补水中形成显著挑战。模型模拟还发现,汛期径流峰值将提前约 10 天,水库调蓄窗口缩短,极端干旱年份频率提升。因此,将气候驱动型水文模型嵌入水资源调度系统中,不仅可以提升预测的前瞻性,还能在不同情景下提供动态的调度边界,为未来水利设施扩容、供水系统升级等规划提供可靠依据。

3 水资源调度优化模型构建与算法设计

3.1 多目标调度模型的目标函数与约束体系设计

水资源调度系统本质上是一个多目标、受约束的复杂优化问题,其调度效果不仅需要满足多类型用户的用水需求,还必须兼顾系统运行成本、生态流量安全与应对气候波动的能力。为此,论文构建了基于三维目标的优化模型,目标函数包括:①最小化供水缺口总量;②最大化调水系统年均可靠率;③最小化系统运行成本(包括泵站能耗和输水损耗)。约束条件则主要涵盖:①水源点最大供水能力;②管道和水库的调蓄与输水能力;③下游生态最小需水量(生态流量下限);④区域用水优先级排序。模型采用年、季、月三级时间尺度,结合气象预测结果动态调整边界条件。通过数学表达,整个模型形成一个典型的多目标非线性优化问题,为求解提供了明确的框架与基础。

3.2 引入模糊数字处理气候不确定性

气候变化所带来的未来降水、径流和蒸散发的不确定性,构成了水资源调度优化中的关键挑战。传统确定性模型往往难以对极端年份做出合理响应,导致系统在高风险情景下效率低下。为克服这一问题,论文引入模糊多目标规划方法,将气候预测数据的不确定性以三角模糊数方式表达,建立“模糊满意度函数”对不同情景的可接受调度方案进行筛选与评分^[9]。对未来降水量预测采用区间估计(如 2025 年降水量介于 410~520mm),系统将所有满足“中等满意度以上”的可行解纳入调度集。该方法不仅提升了模型对极端情况的适应能力,也在科学层面增强了调度方案的容错性与鲁棒性,适用于面对不确定性增强的区域水利规划。

3.3 采用滚动优化机制实现动态调度更新

在应对逐年或逐季水文条件变动时,静态水资源调度方案难以长期适应,而动态优化成为提升系统韧性的重要手段。论文引入滚动时域优化策略(Rolling Horizon Optimization),通过实时获取气象和水文预测数据,周期性更新调度边界条件和目标参数,实现“计划—实施—反馈—再优化”的闭环机制。模型每季度运行一次,更新未来 12 个月调水策略,并与上期方案进行调整对比,从而实现自适应更新。以华北某城市群模拟数据为例,引入滚动优化后系统平均供水缺口从 4.7 亿立方米降至 2.9 亿立方米,调水成本下降 11.2%。该机制特别适用于干旱频发、需求波

动大的区域,显著提升了调水系统对未来不确定性的响应效率,是未来区域水资源动态管理的重要发展方向。

4 模型实证应用与区域水利规划建议

为验证所构建模型的实际应用价值,论文选取华北地区某典型缺水流域作为实证对象。该区域长期面临水资源紧张、供需矛盾突出的问题,兼具代表性与复杂性。研究设置三种气候情景:常规气候、温升 1.5℃与温升 2℃;同时,叠加两种用水需求增长路径:缓慢增长与快速增长,形成六种复合模拟情景。在此基础上,利用 SWAT 模型对未来降水、蒸发及径流情况进行驱动模拟,并将结果输入水资源调度优化模型中,输出相应的调水策略。模拟结果表明,在升温 2℃叠加快速增长的最不利情景下,若采用传统静态调度模式,到 2035 年区域水资源年缺口将扩大至 6.2 亿立方米,系统年均供水可靠性仅为 68%;而采用论文构建的动态优化模型,年缺口可控制在 2.3 亿立方米以内,供水系统可靠性提升至 93%,显著降低了气候波动带来的风险。基于此结果,提出以下水利规划优化建议:一是推进弹性调水工程布局,在供水脆弱区增设应急调水支点和水源转换设施,提升系统灵活性与应急响应能力;二是建立生态水量分级保障机制,将生态流量细化为一级、二级保障门槛,优先确保枯水年份下游生态用水刚性需求;三是构建“气象—水利”联动机制,推动气象预测结果实时接入调度模型,实施滚动优化更新,确保调度方案与气候现实同步调整,增强整体管理系统的适应性和前瞻性。

5 结语

论文构建了一个面向气候变化背景的区域水资源调度优化模型,融合了水文模拟、模糊多目标优化与实时更新机制。通过对华北典型流域的实证研究,验证了模型在提升调度效率、降低资源浪费与增强系统韧性方面的显著优势。未来应进一步提升模型对极端事件的响应能力,扩展其在城市供水、生态补水等多元场景中的应用。同时,需加强水文与气候数据共享机制,构建区域层面统一调度平台,真正实现“智慧水利”与“气候适应型管理”的深度融合。

参考文献:

- [1] 梁宇航.耦合水动力与水库调度的潮白河流域洪水资源化研究[D].西安:西安理工大学,2024.
- [2] 李佳婧.考虑双重跨流域调水工程群调节能力的引汉济渭调度研究[D].西安:西安理工大学,2024.
- [3] 潘滢.变化环境下海河流域生态径流指标的水文情势变化研究[D].邯郸:河北工程大学,2024.
- [4] 王鲁军.基于 Visual Modflow 的民勤盆地地下水位数值模拟研究[D].兰州:甘肃农业大学,2024.
- [5] 马程.基于 HEC-HMS 模型的山丘区小流域洪水预报应用研究[D].济南:济南大学,2024.

作者简介:纪伟,男,中国天津人,从事水利规划和智慧水利研究。