

多尺度水文过程耦合模拟及在水资源评估中的应用

张昊

河北昊禹工程技术咨询有限公司, 天津, 301700;

摘要: 多尺度水文过程耦合模拟是破解水资源时空异质性难题的核心技术, 通过整合微观-中观-宏观尺度的水文机制, 实现对降水截留、产汇流、地下水补给等过程的精准刻画。本文从耦合模拟的理论机制、技术方法创新及水资源评估实践三个维度, 结合长江上游、渭河流域等典型案例, 系统分析多尺度耦合模拟在水资源量评估、时空分布优化及应对气候变化中的应用价值。研究表明, 耦合模拟技术可将水资源评估误差控制在8%以内, 为流域水资源可持续利用提供科学支撑。

关键词: 多尺度水文; 耦合模拟; 水资源; 评估; 应用

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.087

引言

水是生命之源, 是人类社会发展不可或缺的重要资源。然而, 受自然地理条件、气候变化以及人类活动等多重因素影响, 水资源在时空分布上呈现出显著的异质性, 这种异质性给水资源的合理开发与高效利用带来了巨大挑战。传统水文模拟方法往往局限于单一尺度, 难以全面、精准地刻画复杂水文过程, 导致水资源评估结果存在较大误差。在此背景下, 多尺度水文过程耦合模拟技术应运而生, 它通过整合不同尺度的水文机制, 实现对降水截留、产汇流、地下水补给等过程的精准模拟, 为破解水资源时空异质性难题提供了新思路。本文旨在探讨多尺度水文过程耦合模拟的理论机制、技术方法创新及其在水资源评估中的实践应用, 以期流域水资源可持续利用提供科学依据。

1 多尺度水文过程耦合模拟的理论机制与尺度转换

1.1 水文过程的多尺度特性及耦合关系

水文过程具有显著的尺度依赖性, 不同尺度下的主导因子与作用机制存在本质差异。微观尺度($\leq 10\text{km}^2$)以植被截留、土壤入渗等点尺度过程为主, 受土壤质地、植被覆盖度等局地因素控制; 中观尺度($10\text{-}1000\text{km}^2$)聚焦坡面产汇流、河道汇流等过程, 地形地貌与河网结构成为关键驱动因子; 宏观尺度($\geq 1000\text{km}^2$)则需考虑气候系统、地下水-地表水相互作用等区域尺度过程, 受大气环流与地质构造影响显著。

多尺度水文过程的耦合核心在于“机制关联”与“能量物质传递”。例如, 微观尺度的土壤水分动态直接影

响中观尺度的坡面产流量, 而中观尺度的河道径流过程通过地下水补给与排泄, 与宏观尺度的区域水资源循环形成反馈。长江上游流域观测数据显示, 当微观尺度土壤含水率低于田间持水量的60%时, 中观尺度坡面产流系数下降40%-60%, 进而导致宏观尺度流域出口径流减少15%-25%, 凸显尺度间耦合的必然性。

1.2 尺度转换的关键技术与方法

尺度转换是多尺度耦合模拟的核心难题, 包括“升尺度”(微观 \rightarrow 宏观)与“降尺度”(宏观 \rightarrow 微观)两类路径。升尺度过程中, 采用“代表性单元体(REV)”方法, 将微观尺度的非均质参数整合为中观尺度的等效参数。以渭河流域为例, 通过野外实测获取100个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地的土壤孔隙度数据, 基于REV方法整合为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 网格的等效孔隙度, 使得中观尺度产流模拟误差从23%降至7.8%。

降尺度过程则依托气候模式输出数据, 结合统计降尺度与动力降尺度相结合的方法, 实现宏观气候数据向水文模拟所需的站点尺度数据转换。在黄河源区水资源评估中, 采用WRF模式(动力降尺度)与多元线性回归(统计降尺度)耦合方法, 将CMIP6模式输出的 25km 分辨率降水数据降尺度至 1km , 降尺度后降水数据与实测数据的相关系数从0.62提升至0.89, 满足微观尺度土壤入渗模拟的精度要求。

此外, 尺度转换中的不确定性量化是保障耦合模拟可靠性的关键。采用蒙特卡洛模拟结合贝叶斯推理方法, 对长江上游流域耦合模拟中的尺度转换参数进行不确定性分析, 结果表明, 当参数抽样次数达到1000次时, 不确定性区间覆盖率达95%, 模拟结果的置信度显著提

升。

2 多尺度水文耦合模拟模型的构建与优化

2.1 模型结构的多尺度整合设计

多尺度水文耦合模拟模型需实现不同尺度模块的有机融合,典型模型结构包括微观过程模块、中观汇流模块与宏观循环模块。微观过程模块采用物理机制性模型,如 Penman-Monteith 公式计算植被蒸散发,Green-Ampt 模型模拟土壤入渗;中观汇流模块采用分布式水文模型框架,如 TOPMODEL 基于地形指数描述坡面汇流过程;宏观循环模块则整合地下水模型(如 MODFLOW)与地表水模型(如 MIKE11),实现地下水-地表水的双向耦合。

以长江上游多尺度耦合模型为例,模型分辨率从微观的 $10\text{m} \times 10\text{m}$ (土壤-植被模块)逐步过渡至中观的 $1\text{km} \times 1\text{km}$ (坡面-河道汇流模块),再到宏观的 $10\text{km} \times 10\text{km}$ (区域水循环模块)。通过数据同化技术(如集合卡尔曼滤波)实现不同尺度模块的参数共享与结果反馈,例如将微观模块模拟的土壤含水率数据同化至中观汇流模块,调整产流系数;中观模块的河道径流数据则用于校准宏观模块的地下水补给量,形成闭环耦合。

2.2 模型参数的率定与验证

参数率定与验证是模型优化的核心环节,需采用多尺度观测数据进行约束。微观尺度参数(如土壤饱和和导水率、植被叶面积指数)通过野外实测获取,例如在渭河流域设置3个观测站,采用双环入渗仪实测土壤饱和和导水率,获取120组有效数据,为微观模块参数初始化提供基础;中观尺度参数(如河道糙率、坡面汇流速度)采用水文站实测径流数据进行率定,采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)作为评价指标;宏观尺度参数(如地下水渗透系数、含水层厚度)则结合地下水水位观测数据与遥感蒸散发数据进行联合校准。

长江上游耦合模型的率定与验证结果显示,率定期(2010-2015年)内,中观尺度出口断面径流模拟的NSE系数为0.86,径流深相对误差为6.2%;验证期(2016-2020年)NSE系数为0.82,相对误差为7.9%,满足水文模拟精度要求。此外,通过遥感数据(如MODIS蒸散发产品、GRACE陆地水储量数据)对模型宏观过程进行独立验证,结果表明,模拟的区域蒸散发与MODIS产品的相关系数为0.83,陆地水储量变化与

GRACE数据的均方根误差为2.1cm,验证了模型在宏观尺度的可靠性。

2.3 模型耦合的关键技术突破

模型耦合的核心技术在于解决不同模块间的数据交互与时空匹配问题。采用基于“时间步长嵌套”的耦合策略,微观模块采用小时步长模拟土壤水分动态,中观模块采用日步长进行汇流计算,宏观模块采用月步长模拟区域水循环,通过数据插值与时间尺度转换实现不同步长模块的衔接。在渭河流域模型中,微观模块的小时尺度土壤含水率数据通过滑动平均转换为日尺度数据,再输入中观汇流模块,转换后的数据分析误差小于3%。

此外,基于GIS与遥感技术的空间数据支撑体系是模型耦合的重要保障。通过ArcGIS软件实现地形、土壤、植被等空间数据的预处理与网格化,采用遥感反演技术获取植被覆盖度、地表温度等动态参数,为多尺度模块提供时空连续的输入数据。在黄河源区模型中,采用Landsat 8遥感影像反演的植被覆盖度数据(空间分辨率30m),通过重采样转换为不同尺度模块的输入数据,使得微观模块的植被蒸散发模拟精度提升12%,中观模块的坡面产流模拟精度提升8%。

3 多尺度耦合模拟在水资源评估中的应用实践

3.1 流域水资源量精准评估

多尺度耦合模拟通过整合不同尺度的水文过程,有效提升水资源量评估的精度,尤其适用于复杂地形流域。以长江上游流域(面积约 100万 km^2)为例,采用多尺度耦合模型对2010-2020年水资源量进行评估,结果显示,流域多年平均水资源总量为9750亿 m^3 ,其中地表水资源量8920亿 m^3 ,地下水资源量2860亿 m^3 ,地表水与地下水重复计算量2030亿 m^3 。与传统单一尺度模型相比,耦合模型评估的水资源总量误差从11.3%降至6.8%,地下水资源量评估误差从18.5%降至7.2%,显著提升了评估结果的可靠性。

在干旱区流域(如塔里木河流域),多尺度耦合模拟有效解决了“绿洲-荒漠”异质景观下的水资源评估难题。模型通过微观模块模拟绿洲区农田蒸散发与荒漠区裸土蒸发的差异,中观模块刻画绿洲边缘地下水溢出过程,宏观模块整合冰川融水与地下水补给机制,评估得出塔里木河流域多年平均可用水资源量为435亿 m^3 ,

其中冰川融水占比 28%，地下水补给占比 35%，为流域水资源分配提供了科学依据。此外，耦合模型还能精准识别水资源量的时空分布特征，长江上游流域评估结果显示，水资源量空间分布呈现“东南多、西北少”的格局，时间分布呈现“夏秋季多、冬春季少”的特征，汛期（6-9月）水资源量占全年的 65%，与实测数据的吻合度达 92%。

3.2 水资源时空分布优化与调控

多尺度耦合模拟为水资源时空分布优化提供了技术支撑，通过模拟不同调控方案下的水文过程响应，识别最优水资源配置方案。以渭河流域（跨甘肃、陕西、宁夏三省区）为例，针对流域水资源供需矛盾突出的问题，构建多尺度耦合模型模拟“节水灌溉-水库调度-地下水开采调控”联合方案的效果。结果显示，在实施节水灌溉（农田灌溉水利用系数从 0.55 提升至 0.68）、水库联合调度（3 座大型水库年调节水量增加 8 亿 m^3 ）与地下水限采（年开采量从 12 亿 m^3 降至 8 亿 m^3 ）的联合方案后，流域枯水年（保证率 75%）水资源供需缺口从 15.6 亿 m^3 降至 4.2 亿 m^3 ，平原区地下水位平均回升 0.35m，生态流量保证率从 62% 提升至 85%。

在跨流域调水工程影响评估中，多尺度耦合模拟发挥了重要作用。以南水北调中线工程对汉江流域的影响评估为例，模型通过宏观模块模拟调水后汉江流域的区域水循环变化，中观模块刻画河道径流与地下水补给的响应，微观模块分析沿岸植被生态需水变化，评估得出调水工程实施后（年调水量 95 亿 m^3 ），汉江中下游流域多年平均径流量减少 18%，但通过优化水库调度与生态补水方案，可将沿岸湿地生态需水保证率维持在 90% 以上，地下水水位下降幅度控制在 0.5m 以内，实现了调水与生态保护的协调发展。

3.3 气候变化下水资源动态评估与适应

多尺度耦合模拟能够有效刻画气候变化对不同尺度水文过程的影响，为水资源适应策略制定提供科学支撑。基于 CMIP6 气候模式的中高排放情景（SSP5-8.5），采用多尺度耦合模型对长江上游流域 2030-2050 年水资源量进行预测，结果显示，未来流域年平均气温将上升 1.8-2.2 $^{\circ}C$ ，年降水量将增加 5%-8%，但降水时空分布差异加剧，汛期降水量增加 10%-12%，枯水期降水量减少 3%-5%。受此影响，流域未来多年平均水资源总量将增加 4.2%，但枯水年水资源量将减少 7%-9%，水资源短

缺风险有所上升。

在气候变化适应策略制定中，耦合模拟结果为工程措施与非工程措施的优化组合提供了依据。以渭河流域为例，模拟结果显示，未来 50 年流域干旱发生频率将增加 20%-30%，针对这一趋势，提出“水库扩容-地下水储备-节水农业”的适应方案。模型模拟表明，实施该方案后，流域旱早期水资源保障率从 70% 提升至 88%，粮食产量稳定在 280 万吨以上，生态用水量保证率从 65% 提升至 90%。此外，耦合模拟还能评估不同适应措施的成本效益，长江上游流域模拟结果显示，水库扩容工程的单位供水成本为 1.2 元/ m^3 ，节水农业的单位节水成本为 0.8 元/ m^3 ，地下水储备工程的单位储备成本为 1.5 元/ m^3 ，为适应策略的优先级排序提供了量化依据。

4 结论与展望

多尺度水文过程耦合模拟通过整合微观、中观、宏观尺度的水文机制，解决了传统单一尺度模型难以刻画水资源时空异质性的难题，显著提升了水资源评估的精度与可靠性。本文通过理论机制分析、模型构建优化与应用实践验证，证实了耦合模拟技术在流域水资源量评估、时空分布优化及气候变化适应中的核心价值，典型案例数据显示，耦合模拟可将水资源评估误差控制在 8% 以内，为水资源可持续利用提供了强有力的技术支撑。

未来研究应聚焦三个方向：一是深化“水文-生态-社会经济”多系统耦合机制研究，拓展耦合模拟的应用边界；二是结合人工智能技术（如深度学习）提升尺度转换与参数率定的效率，构建智能化耦合模拟平台；三是加强全球变化背景下极端水文事件的模拟与预测，为水资源风险防控提供更精准的技术支撑。随着技术方法的不断创新，多尺度水文过程耦合模拟将在水资源安全保障、水生态保护修复等领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 王凌河; 严登华; 龙爱华; 杨舒媛;. 流域生态水文过程模拟研究进展[J]. 地球科学进展, 2009(08): 51-58.
- [2] 高真; 黄本胜; 陈晓宏; 邱静;. 多源遥感降水评估及其在水文模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2021(04): 32-37.
- [3] 骆然;. 基于耦合模型的超采区地下水储量变化分析[J]. 地下水, 2024(03): 75-77+112.