

水文预报不确定性分析与集合预报方法研究进展

刘 勤

黄河水利委员会中游水文水资源局 山西 晋中 030600

摘 要: 本文聚焦于水文预报领域中的不确定性分析与集合预报方法研究。首先阐述了水文预报的重要性及其面临的不确定性来源,包括降水输入的不确定性、模型结构与参数的不确定性等。接着详细介绍了不确定性分析的主要方法,如概率统计方法、模糊数学方法、灰色系统方法等,并分析了各方法的优缺点。然后对集合预报方法的研究进展进行探讨,涵盖集合预报的构建方法以及在国内外水文预报中的应用实例。最后对未来水文预报不确定性分析与集合预报方法的发展趋势进行了展望,旨在为提高水文预报的精度和可靠性提供理论支持和实践参考。

关键词: 水文预报; 不确定性分析; 集合预报方法; 研究进展

1 引言

水文预报依据前期或现时信息,预测未来水文情势,是防洪减灾等工作的关键依据,能降低灾害损失、保障安全与发展。但水文过程复杂,受多种因素制约,存在不确定性,影响预报准确性,导致结果与实际偏差,影响决策。为此,不确定性分析与集合预报方法出现,前者识别量化不确定性,后者生成多个预报结果。近年来,随着相关技术发展,二者取得显著进展并广泛应用。本文将系统综述相关研究进展,为进一步研究和实践提供参考。

2 水文预报不确定性的来源

2.1 降水输入的不确定性

降水输入的不确定性主要来源于降水观测和降水预报两个方面。在降水观测方面,观测站点的分布密度、观测仪器的精度和可靠性、观测时间间隔等因素都会影响降水观测数据的准确性。例如,在一些地形复杂、气候多变的地区,观测站点可能无法全面覆盖,导致降水信息缺失或误差较大;观测仪器的老化、故障等问题也可能使观测数据出现偏差^[1]。在降水预报方面,目前的气象预报模型虽然能够提供一定精度的降水预报,但由于大气系统的复杂性和非线性特征,降水预报仍存在较大的不确定性。特别是对于强降水、暴雨等极端天气事件,预报的准确性和时效性更是难以保证。降水输入的不确定性会直接影响到水文模型的输入,进而影响水文预报的结果。

2.2 模型结构的不确定性

模型结构的不确定性是指由于对水文过程的认识不足或简化处理,导致所选用的模型结构不能完全准确地反映实际水文系统的特征和变化规律。例如,在构建降雨径流模型时,为了简化计算,常常会对流域的地形、

土壤、植被等因素进行一定的概化和假设,这些概化和假设可能会忽略一些重要的水文过程或影响因素,从而引入模型结构的不确定性。此外,随着对水文过程研究的不断深入,新的水文模型不断涌现,不同模型之间的差异也反映了模型结构的不确定性。选择合适的模型结构对于提高水文预报的精度至关重要,但目前尚缺乏一种普遍适用的模型选择方法和标准。

2.3 模型参数的不确定性

水文模型中包含大量的参数,这些参数用于描述流域的物理特性和水文过程的各种关系。模型参数的不确定性主要来源于参数率定和参数估值两个方面。在参数率定过程中,通常利用历史观测数据对模型参数进行优化调整,以使模型的输出结果与实际观测值尽可能吻合。然而,由于历史观测数据的有限性和不完整性,以及参数之间的相互影响和相关性,参数率定结果往往存在不确定性。此外,一些参数可能无法直接通过观测获取,需要通过间接方法进行估值,这些估值方法本身也存在一定的误差和不确定性。模型参数的不确定性会导致模型输出的不确定性,即使使用相同的模型结构和输入数据,不同的参数组合也可能产生不同的预报结果。

2.4 其他不确定性来源

除了上述主要的不确定性来源外,水文预报还受到其他因素的影响,如人类活动的影响、初始条件的不确定性等。人类活动,如水利工程建设、土地利用的变化等,会改变流域的下垫面条件和水文循环过程,从而影响水文预报的准确性。初始条件的不确定性是指水文模型在开始模拟时,流域的初始状态(如土壤含水量、河道水位等)存在一定的不确定性。由于初始条件的难以准确测定,这种不确定性会在模型模拟过程中逐渐传递和放大,影响最终的预报结果。

3 水文预报不确定性分析方法

3.1 概率统计方法

概率统计方法是水文预报不确定性分析中常用的方法之一,它基于概率论和数理统计理论,通过对观测数据的统计分析,建立不确定性变量的概率分布模型,进而评估不确定性的大小和影响程度。常用的概率统计方法包括误差分析、置信区间估计、蒙特卡洛模拟等。误差分析通过对预报值与观测值之间的误差进行统计分析,计算误差的均值、方差、标准差等统计量,以评估预报的准确性和精度。置信区间估计则是根据样本数据构建一个区间,使得总体参数落在这个区间内的概率达到一定的置信水平,从而为预报结果提供一个合理的范围。蒙特卡洛模拟是一种通过随机抽样来模拟不确定性变量分布的方法,它可以生成大量的随机样本,将这些样本代入水文模型中进行模拟计算,从而得到预报结果的概率分布,进而分析不确定性的特征和影响。概率统计方法的优点是理论基础扎实,计算方法相对简单,能够直观地反映不确定性的统计特征^[2]。然而,该方法需要大量的观测数据作为支撑,对于数据稀缺的地区或水文事件,其应用受到一定的限制。此外,概率统计方法通常假设不确定性变量服从一定的概率分布,但在实际情况下,这种假设可能并不完全成立,从而影响分析结果的准确性。

3.2 模糊数学方法

模糊数学方法是处理模糊性和不确定性问题的有效工具,它引入了模糊集的概念,将不确定性的描述从精确的数值范围扩展到模糊的隶属度函数。在水文预报不确定性分析中,模糊数学方法可以用于处理那些难以用精确数值描述的不确定性因素,如降水等级、洪水风险等级等。通过建立模糊隶属度函数,将不确定性变量映射到 $[0,1]$ 区间上,表示其属于某一模糊集合的程度。然后利用模糊运算规则,对多个不确定性因素进行综合分析,得到预报结果的模糊描述。模糊数学方法的优点是能够处理模糊性和不确定性问题,符合人类对复杂系统的认知方式。它不需要大量的精确数据,对于数据质量要求相对较低。然而,模糊数学方法也存在一些不足之处,如隶属度函数的确定具有一定的主观性,不同的确定方法可能会导致不同的分析结果;模糊运算规则的选择也会影响最终的分析结果,目前尚缺乏统一的标准和规范。

3.3 灰色系统方法

灰色系统方法是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的方法,它将部分信息已知、部分信息未知的系统

称为灰色系统。在水文预报中,由于观测数据的有限性和不完整性,水文系统可以看作是一个灰色系统。灰色系统方法通过对已知信息的生成和开发,提取有价值的信息,建立灰色预测模型,对系统的未来发展趋势进行预测。常用的灰色预测模型包括GM(1,1)模型、GM(1,N)模型等。同时,灰色系统方法还可以用于不确定性分析,通过计算灰色关联度、灰色绝对关联度等指标,分析各因素之间的关联程度和不确定性对预报结果的影响。灰色系统方法的优点是能够在少数据、贫信息的情况下进行预测和不确定性分析,对数据的要求相对较低。它不需要大量的历史数据,计算简单,易于实现。然而,灰色系统方法的理论基础相对薄弱,模型的精度和可靠性有待进一步提高。此外,灰色系统方法在处理复杂系统时,可能会忽略一些重要的信息和因素,导致分析结果存在一定的偏差。

3.4 其他不确定性分析方法

除了上述方法外,还有一些其他的不确定性分析方法在水文预报中得到了应用,如贝叶斯方法、人工神经网络方法等。贝叶斯方法是一种基于贝叶斯定理的不确定性分析方法,它将先验信息和样本信息结合起来,通过更新后验概率分布来评估不确定性。在水文预报中,贝叶斯方法可以用于模型参数的估计和不确定性分析,通过引入先验分布,将参数的不确定性信息纳入到模型中,从而提高预报的准确性和可靠性^[3]。人工神经网络方法是一种模拟人类神经系统结构和功能的计算模型,它具有强大的非线性映射能力和自适应学习能力。在水文预报不确定性分析中,人工神经网络可以用于建立降水、径流等变量之间的非线性关系模型,通过对大量数据的学习和训练,自动提取数据中的特征和规律,从而对不确定性进行模拟和预测。

4 集合预报方法研究进展

4.1 集合预报的构建方法

4.1.1 多初值扰动法

多初值扰动法是集合预报中常用的一种方法,它的基本原理是通过对水文模型的初始条件进行多次随机扰动,生成多个不同的初始状态,然后将这些初始状态分别代入模型中进行模拟计算,得到多个预报结果。由于初始条件的不确定性会在模型模拟过程中逐渐传递和放大,不同的初始状态会导致不同的预报结果,从而形成一个预报集合。多初值扰动法的优点是实施相对简单,计算量较小,能够较好地反映初始条件不确定性对预报结果的影响。然而,该方法主要考虑了初始条件的不确定性,对于其他不确定性来源(如模型参数不确定性、

降水输入不确定性等)的考虑相对较少,因此其预报结果的准确性有一定的局限性。

4.1.2 多模型集合法

多模型集合法是将多个不同的水文模型进行组合,生成多个预报结果。不同的水文模型具有不同的结构形式和假设条件,对水文过程的描述和模拟也存在差异。通过将多个模型的预报结果进行集合,可以综合考虑不同模型的优势和不确定性,提高预报的准确性和可靠性。多模型集合法的实施方法有多种,如简单平均法、加权平均法、贝叶斯模型平均法等。简单平均法是将多个模型的预报结果进行算术平均,得到集合预报结果;加权平均法则是根据各模型的性能和可靠性,为每个模型分配一个权重,然后对模型的预报结果进行加权平均;贝叶斯模型平均法是一种基于贝叶斯理论的模型集合方法,它通过计算各模型的后验概率,将模型的不确定性纳入到集合预报中,从而得到更准确的预报结果。多模型集合法的优点是能够充分利用不同模型的信息,提高预报的鲁棒性^[4]。然而,该方法需要选择多个合适的模型,并对模型的性能进行评估和比较,实施过程相对复杂,计算量较大。

4.1.3 参数扰动法

参数扰动法是通过在水文模型的参数进行多次随机扰动,生成多个不同的参数组合,然后将这些参数组合分别代入模型中进行模拟计算,得到多个预报结果。由于模型参数的不确定性会导致模型输出的不确定性,通过参数扰动法可以生成多个可能的预报结果,形成一个预报集合,从而反映参数不确定性对预报结果的影响。参数扰动法的关键在于确定参数的扰动范围和扰动方式,常用的扰动方式包括均匀分布扰动、正态分布扰动等。参数扰动法的优点是能够直接考虑模型参数的不确定性,实施相对简单。然而,该方法可能会生成一些不合理的参数组合,导致模型模拟结果出现偏差,因此需要对扰动后的参数进行一定的筛选和验证。

4.2 集合预报在水文预报中的应用案例

4.2.1 国内应用

在国内,集合预报方法已经在水文预报领域得到了广泛的应用。例如,在长江流域的洪水预报中,研究人员采用多模型集合法,将新安江模型、陕北模型等多个水文模型进行组合,构建了长江流域洪水预报集合模型。通过对历史洪水资料的验证和实际洪水预报的应

用,结果表明,集合预报模型的预报精度明显高于单一模型,能够更准确地预测洪水的发生时间、峰值和流量过程,为长江流域的防洪减灾工作提供了有力的支持。此外,在黄河、珠江等流域,也有研究人员开展了集合预报方法的研究和应用,取得了良好的效果。

4.2.2 国外应用

在国外,集合预报方法同样得到了广泛的研究和应用。例如,美国国家气象局(NWS)在其洪水预报系统中采用了集合预报技术,通过多初值扰动法和多模型集合法相结合的方式,生成多个洪水预报结果,形成一个预报集合。该集合预报系统能够实时提供洪水预报信息,包括洪水的可能发生范围、峰值流量、到达时间等,为美国的洪水预警和防洪减灾工作发挥了重要作用。此外,欧洲、日本等国家和地区也在水文预报中广泛应用了集合预报方法,不断提高水文预报的准确性和可靠性。

结语

水文预报不确定性分析与集合预报是提升预报精度与可靠性的关键。本文详述了不确定性来源,如降水、模型结构及参数的不确定性等,介绍了概率统计、模糊数学等分析方法及其优缺点,探讨了集合预报的概念、构建及应用实例。展望未来,多源数据融合、高性能计算、人工智能及跨学科融合将是发展方向。随着科技进步,这些方法将不断完善,为防洪减灾等工作提供更准确信息,未来需加强技术研发,注重学科交叉,提升预报水平。

参考文献

- [1]殷兆凯.多源因素影响下的水文预报不确定性及水文集合预报研究[D].天津大学,2020.
- [2]周鹏.季节性水文气象集合预报的可利用性[D].浙江大学,2024.
- [3]许银山,兰岚,张潇.三峡水库短中期水文气象预报不确定性及预报调度风险分析[C]//《中国防汛抗旱》杂志社,中国水利学会水利水电风险管理专业委员会,水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心.水利水电风险管理理论与应用创新论文集.长江水利委员会水文局;武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,2021:184-193.
- [4]钟华昱.考虑水文预报不确定性的跨流域调水工程优化调度研究[D].西安理工大学,2021.