

基于贝叶斯定理的流域推演模型研发

孔德彬¹ 崔德新² 孙钦永¹ 刘新明¹ 张文丽²

1. 中科星图亿水(四川)科技有限公司 四川 成都 610299

2. 内蒙古自治区水利科学研究所 内蒙古 呼和浩特 010060

摘要: 本文旨在探讨基于贝叶斯定理的流域推演模型的研发。通过构建具有物理机制的分布式水文模型,并结合贝叶斯理论对模型参数进行不确定性分析,以提高流域水文过程的模拟精度。文章详细介绍了模型的理论基础、构建过程及优势,为流域水资源管理和水环境保护提供科学依据。

关键词: 贝叶斯定理; 流域推演模型; 不确定性分析; 分布式水文模型

引言

流域水文过程是一个复杂的动态系统,涉及多种自然和人为因素的相互作用。为了准确模拟和预测流域水文响应,需要研发高效且精确的水文模型。近年来,基于物理机制的分布式水文模型因其能够更真实地反映流域内部的空间变异性而受到广泛关注。然而,模型参数的不确定性和输入资料的误差往往导致模拟结果与实际存在偏差。因此,本文提出基于贝叶斯定理的流域推演模型,旨在降低模型中的不确定性,提高模拟精度。

1 贝叶斯定理概述

贝叶斯定理是一种基于概率统计的不确定性分析方法,通过先验概率和样本信息计算后验概率,从而实现未知参数的推断。在水文模型中,贝叶斯定理可以有效融合模型参数、输入数据和观测信息,提高模型推演结果的准确性和可靠性。

2 流域水文模型的不确定性分析

流域水文模型的不确定性主要来源于模型结构、参数和输入数据等方面。模型结构的不完善、参数的不准确以及输入资料的误差都会导致模拟结果与实际结果的偏差。因此,需要采用贝叶斯定理对模型的不确定性进行量化和分析,以提高模型的模拟效果。

3 基于贝叶斯定理的流域推演模型构建

3.1 模型框架设计

3.1.1 降雨-径流模拟

降雨-径流模拟是流域推演模型中的核心环节,它涉及对降雨量、降雨强度、地形、土壤特性以及植被覆盖等多重因素的考量。在这一模拟环节中,首先要收集并分析长期和实时的降雨数据,以确定降雨的时空分布特征。这些数据不仅包括降雨量,还包括降雨的持续时

间、强度以及间隔时间等关键参数。模拟过程中,需要详细分析流域的地形特征,特别是地形坡度和流向,因为这些因素直接影响径流的形成和流向。土壤类型和渗透率也是重要的考量因素,因为它们决定了地表水和地下水的分配比例。在模拟降雨-径流过程时,模型还需考虑植被覆盖对水文过程的影响。植被可以减少雨水径流,增加地下水补给,并通过蒸腾作用影响流域的水文循环^[1]。为了提高模拟的准确性和可靠性,模型引入了贝叶斯定理来进行不确定性分析。具体而言,贝叶斯方法被用于更新和修正模型参数,以反映实际观测数据中的不确定性。这种方法结合了先验知识和实时观测数据,通过概率分布来描述模型参数的不确定性,并随着新数据的加入不断更新这些分布。此外,降雨-径流模拟模块还需要与流域推演模型的其他部分(如地下水模拟、水质模拟等)紧密集成,以实现全面的流域水文过程模拟。这种集成允许模型更准确地预测降雨事件对整个流域生态系统的综合影响。

3.1.2 蒸散发计算

蒸散发计算是流域推演模型中不可或缺的一部分,它对于准确模拟和预测流域内的水文循环过程至关重要。蒸发是指水体从地表和植被表面转化为水蒸气的过程,包括土壤蒸发和植物蒸腾两部分。这一环节的计算涉及多种复杂因素,如气温、湿度、风速、太阳辐射以及土壤和植被的特性等。在蒸散发计算模块中,首先需要收集并分析气象数据,特别是温度、湿度、风速和太阳辐射等关键参数。这些数据对于准确估算蒸散发量至关重要。模型需根据这些气象条件,结合流域内的植被类型和覆盖情况,来估算每日或每小时的蒸散发量。植被的蒸腾作用是蒸散发计算中的重要部分。不同植被类型具有不同的蒸腾速率,这取决于其叶片结构、气孔密度以及生理特性。因此,模型需要详细记录流域内各种

基金项目: 数字孪生窟野河流域建设关键技术研究及在水旱灾害防御中的应用(NSK202301)

植被的分布情况,并根据其特性来估算蒸腾量。土壤蒸发是蒸散发的另一重要组成部分。土壤蒸发的速率受到土壤湿度、土壤类型以及土壤表面温度等因素的影响。为了准确计算土壤蒸发量,模型需要整合土壤湿度观测数据和土壤类型信息。为了提高蒸散发计算的准确性,模型还引入了贝叶斯定理来量化不确定性。由于气象条件、土壤和植被特性的观测数据都存在一定的误差和不确定性,因此,通过贝叶斯方法,模型能够将这些不确定性纳入计算中,从而得出更为可靠的蒸散发量估算。

3.1.3 土壤水分动态模拟

土壤水分动态模拟是流域推演模型中的关键环节,对于理解和预测流域内的水文响应机制具有重要意义。土壤水分的动态变化直接影响到植被生长、蒸发过程以及地表水和地下水的交互,因此,准确模拟土壤水分动态至关重要。在土壤水分动态模拟模块中,首先需要构建一个能够反映土壤水分运移和存储的数学模型。这个模型需要综合考虑土壤的物理性质,如土壤类型、质地、孔隙度以及水力传导率等,这些都是影响土壤水分动态的关键因素。此外,模型的构建还需融入降雨入渗、蒸散发、地下水补给等多种水文过程,以全面反映土壤水分的实际动态。降雨入渗是土壤水分增加的主要途径之一。模拟时需要详细考虑降雨量、降雨强度以及降雨历时等因素,以准确估算入渗到土壤中的水量^[2]。同时,蒸散发过程会导致土壤水分的减少,其速率受到气象条件、植被类型和土壤湿度等多重因素的影响。为了更精确地模拟土壤水分动态,该模块还需整合地下水对土壤水分的影响。地下水位的变化会直接影响土壤湿度,特别是在干旱季节或降雨稀少地区,地下水可能成为土壤水分的重要来源。在模拟过程中,为了提高精度和可靠性,模型运用了贝叶斯定理来进行不确定性分析。由于土壤参数、气象条件等观测数据存在一定的误差和不确定性,通过贝叶斯方法,可以将这些不确定性纳入模型中,从而得出更为准确的土壤水分动态预测。

3.2 参数估计与优化

在构建流域推演模型时,参数估计与优化是确保模型精确性和实用性的关键环节。利用贝叶斯定理,可以有效地结合历史观测数据和专家知识,对模型参数进行精准地估计和优化。

3.2.1 参数估计

利用贝叶斯定理进行参数估计,实质上是通过结合先验信息和观测数据来更新对参数的认识。先验信息可能来源于专家知识、历史研究或先前模型的结果。观测数据则提供了模型参数在实际流域系统中的表现。①

先验分布确定:首先,基于专家知识和历史数据,为模型参数设定一个先验分布。这个分布反映了在未考虑当前观测数据之前,我们对参数可能取值的认知。②似然函数构建:接下来,根据观测数据和模型预测之间的差异,构建一个似然函数。这个函数描述了给定参数值下,观测数据出现的概率。

3.2.2 参数优化

参数优化的目标是找到使模型预测最符合观测数据的参数值。通过贝叶斯定理,我们可以推导出参数的后验概率分布,这个分布反映了在考虑观测数据后,参数可能取值的更新认知。①后验分布推导:利用贝叶斯定理,结合先验分布和似然函数,推导出参数的后验概率分布。这个分布反映了在考虑当前观测数据后,我们对参数取值的更新认知。②MCMC抽样:为了有效地探索参数空间并推导出后验分布,我们采用马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)等抽样方法。MCMC方法能够高效地在高维参数空间中抽样,从而生成参数的后验样本。③参数优化与选择:基于后验样本,可以进行各种统计推断,如计算参数的期望值、方差等,以选择最优的参数值或参数范围^[3]。此外,还可以利用模型选择准则(如BIC、AIC等)来评估不同参数组合下模型的拟合优度,从而选择最佳的模型参数。

3.3 模型验证与评估

在构建和优化完基于贝叶斯定理的流域推演模型后,对模型进行全面的验证和评估是确保模型性能的关键环节。

3.3.1 验证方法

①交叉验证:通过将数据分为训练集和验证集,使用训练集进行模型训练,然后在验证集上测试模型的预测能力。这种方法有助于评估模型在不同数据集上的泛化能力。②留一验证:每次从数据集中留出一个观测点作为验证数据,其余数据用于训练模型。重复此过程,直到每个观测点都被用作验证数据,这样可以全面评估模型对各个观测点的预测准确性。

3.3.2 定量评估指标

①水文过程线对比:将模拟的径流过程线与实测的径流过程线进行对比,观察两者的吻合程度。通过计算两条过程线之间的相似度或差异度,可以定量评估模型的预测性能。②误差分析:使用均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)等指标来量化模拟结果与实测数据之间的差异。这些指标能够提供模型预测精度的直观度量,帮助识别模型在哪些方面的预测能力有待提高。

3.3.3 综合评估与模型调整

综合运用上述验证方法和评估指标,对模型的性能进行全面评价。根据评估结果,对模型进行必要的调整和优化,以提高其预测精度和稳定性。调整可能包括修改模型参数、改进模型结构或引入新的影响因素等。

4 模型优势与应用前景

4.1 模型优势

基于贝叶斯定理的流域推演模型展现了多方面的显著优势:①模型参数不确定性的充分考虑:该模型能够深入探索并整合模型参数的不确定性,从而显著提高了模拟的精度。在传统的流域推演模型中,参数的不确定性往往是一个难以解决的问题,而基于贝叶斯定理的模型通过概率的方式对参数进行估计,有效地解决了这一问题。②物理机制与统计学方法的完美结合:此模型不仅依赖于物理机制来模拟流域过程,还融入了先进的统计学方法。这种结合使得模型在解释流域现象的同时,也具备了出色的预测能力。这种双重优势确保了模型在各种复杂情境下都能提供准确、可靠的预测。③为流域管理提供科学依据:该模型能够为流域水资源管理和水环境保护提供坚实的数据支持和科学依据。通过模型的推演,管理者可以更为精确地了解流域内的水资源状况,从而做出更为合理和有效的管理决策。

4.2 应用前景

随着科技的飞速发展,大数据和人工智能技术正日益渗透到各个领域。在这样的背景下,基于贝叶斯定理的流域推演模型展现出了广阔的应用前景:

4.2.1 水文预报

在水文预报领域,基于贝叶斯定理的流域推演模型与大数据技术的结合将展现出巨大的潜力。这种模型能够高效处理并分析海量的实时水文数据,包括但不限于降雨量、河流水位、流量以及土壤湿度等关键指标。通过对这些多元数据的深度挖掘,模型可以精准捕捉流域内的水文变化动态,进而对洪水、干旱等自然灾害进行更为准确和及时地预报。这种预报不仅涵盖了灾害发生的时间和地点,还能预测其可能的规模和影响范围,从而为防灾减灾工作提供至关重要的决策支持^[4]。此外,该模型还能根据历史数据和当前环境状况,对流域内的长期水文趋势进行预测,为水资源管理和规划提供科学依据。

4.2.2 水资源优化配置

基于贝叶斯定理的流域推演模型在水资源优化配置

方面将发挥至关重要的作用。通过该模型的精准推演,能够更为科学地分配和调度有限的水资源,确保其合理利用,从而满足社会、经济和生态的多元化需求。具体而言,模型可以综合考虑流域内的气候、土壤、植被以及人类活动等多重因素,对水资源进行动态模拟和优化配置。它不仅能够预测不同区域的水资源需求和供给情况,还能根据实际需求调整水资源的分配策略。通过这种方式,可以有效避免水资源的浪费和过度开发,同时确保各地区、各行业的水资源需求得到满足。这种科学的水资源配置方法,对于促进流域内的可持续发展具有重要意义。

4.2.3 水环境风险评估与管理

基于贝叶斯定理的流域推演模型对于水环境风险评估与管理具有不可或缺的价值。该模型能够综合考虑多种人类活动,如工业排放、农业灌溉、城市化进程等,对水环境产生的潜在影响。通过模拟这些活动对水质、水生态的具体影响,模型可以协助科学家和决策者全面评估水环境风险,包括但不限于污染物扩散范围、生态破坏程度等。这种量化评估为政策制定者提供了有力的数据支撑,使他们能够制定更为精准、有效的水环境管理策略。此外,模型还能预测不同管理策略下的水环境变化趋势,从而指导决策者调整和优化管理措施,确保水环境的健康和可持续发展。

结语

本文研发了基于贝叶斯定理的流域推演模型,通过不确定性分析提高了模拟精度。该模型结合了物理机制和统计学方法,为流域水文过程的模拟和预测提供了新的思路和方法。未来,将进一步优化模型结构,拓展应用领域,以更好地服务于流域水资源管理和水环境保护工作。

参考文献

- [1]胡鹏,张维凯,韩健健.基于贝叶斯定理的异重流泥沙侵蚀经验式不确定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(02):287-298.
- [2]陈婕.基于贝叶斯定理的证据推理研究[J].法律方法,2021,36(03):138-156.
- [3]丁孟龙,李京兵,张涛,等.大湖演算模型在裕溪河流域的适用性分析[J].黑龙江科学,2024,15(10):87-90.
- [4]张会德.基于三维可视化的风河流域地下水动态监测模型[J].水上安全,2024,(09):13-15.