

水利环境系统动态模拟与预测模型研究

陆冬婷 洪静雨 张 红 罗嘉西 董小慧

南京水科院瑞迪科技集团有限公司 江苏 南京 210000

摘 要: 水利环境紧密关联着人类的生存与发展,从水资源的合理调配,到水环境的保护与治理,无不深刻影响着生态平衡与社会经济的可持续进程。本文聚焦于水利环境系统动态模拟与预测模型研究。阐述了系统动力学理论、控制论原理、数值计算方法等理论基础,在此之上构建了水利环境系统动态模拟模型,包括系统分析与数据收集、结构设计、参数估计及验证校准等环节。预测模型方面,介绍了时间序列分析、回归分析、人工神经网络及灰色预测等模型。模型在水资源管理决策支持、水环境风险评估预警、水生态系统保护与修复规划等方面具有重要应用价值,为水利环境系统的科学管理与规划提供了有力工具。

关键词: 水利环境; 系统动态模拟; 预测模型研究

引言: 水利环境系统作为复杂且关键的自然与社会耦合系统,其科学管理与合理规划至关重要。随着经济社会的快速发展,对水资源的需求日益增长,同时水环境面临着诸多挑战,如污染、生态破坏等。准确地模拟和预测水利环境系统的动态变化,能为相关决策提供科学依据。本文基于系统动力学理论、控制论原理等,深入研究水利环境系统动态模拟与预测模型的构建、应用及优势,旨在提升水利环境系统的管理水平,实现可持续发展。

1 水利环境系统动态模拟与预测模型理论基础

1.1 系统动力学理论

系统动力学理论将水利环境系统视为由众多相互关联、相互作用的子系统构成的复杂整体。它着重关注系统内各要素间的反馈机制,通过因果关系图和流图清晰展现变量间的动态联系。在水利环境领域,可借此分析水资源循环、污染物扩散等过程。例如,研究降水、径流、蒸发等因素对水资源量的动态影响,构建存量-流量结构模型。这种理论能有效处理高阶次、非线性、时变特征的系统问题,助力深入理解水利环境系统复杂行为,为后续模拟与预测模型搭建提供关键的系统思维和分析框架。

1.2 控制论原理

控制论原理强调通过信息的传递、变换和反馈来实现对系统的调节与控制。在水利环境系统中,可将水质、水量等关键指标设为控制目标,依据实时监测数据,利用反馈机制调整系统输入。比如,根据水体污染浓度反馈,调控污水处理设施运行参数,以改善水质。通过构建控制模型,实现对水利环境系统的优化控制,维持其稳定运行。该原理能有效应对外界干扰,保障系

统按预期目标发展,为水利环境系统动态模拟与预测模型提供了精准调控思路,增强模型对实际系统运行状态的模拟与把控能力。

1.3 数值计算方法

数值计算方法是将水利环境系统中的各种复杂方程和模型转化为可计算形式的关键手段。在处理流体运动方程、污染物迁移扩散方程等时,通过离散化空间和时间,把连续问题转化为离散数值问题求解。像有限差分法、有限元法等,能将水利环境系统的复杂区域划分成网格,对每个网格节点进行数值计算。在模拟水流运动、预测污染物扩散范围等方面发挥重要作用,为水利环境系统动态模拟与预测模型提供了强大的定量计算支撑,使模型结果更具准确性和可靠性,有效揭示系统动态变化规律^[1]。

2 水利环境系统动态模拟模型构建

2.1 系统分析与数据收集

水利环境系统极为复杂,系统分析是构建模拟模型的基石。需全面剖析系统组成,涵盖水资源、水环境、水生态等子系统及其相互关联。在此过程中,精准识别关键变量,像降水量、径流量、污染物浓度等。数据收集为模型构建提供必要支撑。一方面,从气象部门获取长期的降水、气温数据,用于分析气候对水利环境的影响。另一方面,借助水文监测站,收集河流、湖泊的水位、流量数据,了解水资源动态变化。同时,环境监测机构的水质数据,包括化学需氧量、氨氮等指标,对于刻画水环境状况至关重要。此外,还可利用卫星遥感技术获取大范围的水生态信息,如湿地面积、植被覆盖度等。多源数据的整合,为准确构建模型奠定坚实基础,确保模型能真实反映水利环境系统的运行机制。

2.2 模型结构设计

模型结构设计需紧密依据系统分析结果。针对水利环境系统,常采用模块化设计思路。水资源模块重点模拟降水转化为径流、地下水补给与开采等过程,可选用水相模型或分布式水文模型。水环境模块则聚焦污染物在水体中的迁移、转化,运用质量守恒方程构建模型结构,考虑扩散、降解等过程。水生态模块模拟生物群落与环境的相互作用,如鱼类种群数量受水质、水量变化的影响,采用生态动力学模型。各模块间通过物质流与能量流相互连接。例如,水资源模块输出的径流量,作为水环境模块中污染物迁移的载体,影响污染物扩散范围;水环境模块的水质状况又反馈到水生态模块,决定生物生存环境。合理设计模块间接口,确保数据顺畅传递与交互。同时,结合系统动力学理论,构建因果关系图,梳理变量间的正负反馈机制,使模型结构既能反映系统内部复杂关系,又具备清晰的逻辑层次,为后续模型运行与分析提供有力框架。

2.3 模型参数估计

准确的模型参数估计对模型性能至关重要。参数可分为固定参数和可变参数。固定参数如流域的地形地貌参数,可通过地理信息系统(GIS)数据直接获取,像坡度、坡向等。可变参数则需借助多种方法确定。对于一些物理过程参数,如土壤渗透系数、污染物降解系数,可参考相关文献中的经验值,结合研究区域实际情况进行修正。也可开展现场试验,如在特定水域投放示踪剂,观测其扩散过程,利用反演算法求解扩散系数。数据驱动的方法同样常用,利用历史监测数据,采用最小二乘法、最大似然估计法等,通过优化目标函数,使模型模拟结果与观测数据达到最佳拟合,从而确定参数值。多方法综合运用,可提高参数估计的准确性,保障模型能精准模拟水利环境系统动态变化。

2.4 模型验证与校准

模型验证与校准是确保模型可靠性的关键步骤。首先,将模型模拟结果与独立于建模数据的另一组观测数据进行对比验证。例如,利用某一时间段的实测水位、水质数据,检验模型在该时段的模拟效果。通过计算均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)等统计指标,量化评估模型模拟值与观测值的偏差程度。若验证结果不理想,则需进行校准。校准过程中,以模型输出与观测数据的误差为导向,调整模型参数。可采用手动试错法,凭借经验逐步调整关键参数,观察模型输出变化,直至误差达到可接受范围。也可运用自动校准技术,如遗传算法、粒子群优化算法等,在参数空间内自

动搜索最优参数组合,使模型模拟与观测数据最佳匹配。经过多轮验证与校准,不断优化模型,使其能准确反映水利环境系统的真实动态,为后续预测与决策提供可靠工具。

3 水利环境系统预测模型构建

3.1 时间序列分析方法

时间序列分析方法基于水利环境系统数据随时间变化的规律进行预测。它将一系列按时间顺序排列的数据,如历史水位、流量、水质监测值等,视为一个随时间演变的随机过程。该方法假设数据的未来值仅依赖于过去和现在的值,通过分析时间序列中的趋势项、季节项和随机项,构建合适的模型。常见的时间序列模型有自回归滑动平均模型(ARMA)及其扩展形式。例如在预测河流月流量时,利用ARMA模型,对历史流量数据进行平稳性检验后,确定模型阶数,拟合出流量随时间变化的规律。该方法能有效捕捉数据的短期波动和长期趋势,计算相对简便,在水利环境系统短期预测,如短期水位变化、水质波动预测中应用广泛,为水利工程调度、水资源短期调配提供及时的数据支持。

3.2 回归分析模型

回归分析模型旨在探寻水利环境系统中变量之间的定量关系,以此实现预测。通过确定因变量(如水质指标、水资源量)与一个或多个自变量(如降水量、人口数量、工业产值等)之间的数学函数关系,建立回归方程。在构建模型时,先收集大量相关变量的历史数据,运用最小二乘法等方法估计方程参数,使观测值与预测值的误差平方和最小。经过对数据的拟合和检验,得到可用于预测不同工业发展规模和人口增长情况下河流水质变化的方程。回归分析模型简单直观,能清晰地展示变量间的影响程度,在影响因素相对明确、数据充足的水利环境预测场景中,如水资源需求预测、特定污染源对水环境影响预测等方面发挥重要作用^[2]。

3.3 人工神经网络模型

人工神经网络模型模拟人脑神经元的结构和工作方式,通过大量数据训练来学习复杂的模式和规律,适用于高度非线性的水利环境系统预测。该模型由输入层、隐藏层和输出层组成,层与层之间通过神经元连接,每个连接都有对应的权重。在水利环境预测中,将各类影响因素,如气象数据、地理信息、历史水利环境监测值等作为输入层数据,经过隐藏层对数据进行复杂的非线性变换和特征提取,最终在输出层得到预测结果,如未来一段时间的水位、水质预测值。以预测水库水质变化为例,利用多层感知器神经网络,经过大量历史水质数

据和对应环境因素数据的训练,模型能够捕捉到复杂的水质变化规律,对未来水质状况做出较为准确的预测。

3.4 灰色预测模型

灰色预测模型适用于数据量有限、信息不完全明确的水利环境系统预测场景。它将水利环境系统视为一个灰色系统,通过对原始数据进行累加生成等处理,弱化数据的随机性,挖掘潜在规律,构建灰色微分方程模型。在水利环境预测中,如对某小型流域的年降水量进行预测,由于该流域监测数据年限较短,数据量有限,利用灰色预测模型GM(1,1),对少量的历史降水量数据进行处理和建模。该模型计算量小,对数据分布规律要求不高,能够在数据匮乏的情况下,基于已知信息对水利环境指标的发展趋势做出合理预测。

4 模型应用与优势

4.1 水资源管理决策支持

在水资源管理领域,水利环境系统动态模拟与预测模型堪称关键利器。模型高效整合气象部门的降水数据、水文站点监测的蒸发与径流数据,能精准模拟不同气候情境以及多样用水模式下,水资源在时间与空间维度的复杂变化。例如,借助长期气候预测数据以及区域内各行业用水增长趋势,模型可预测未来数月甚至数年的降水走向与水资源需求。在干旱即将来临之际,依据模型预测结果,水库管理部门能提前提升蓄水量,确保农业灌溉用水充足,保障农作物生长,同时满足居民日常用水需求。而在丰水期,模型辅助制定科学合理的泄洪方案,避免因洪水泛滥引发洪涝灾害。此外,通过模拟不同水资源调配策略,模型为决策者提供量化评估,助力优化水资源分配,提升利用效率,达成水资源可持续管理,协调好城乡、工农业等各方用水需求。

4.2 水环境风险评估与预警

针对日益严峻的水环境风险,该模型发挥着不可或缺的作用。模型深度模拟污染物在水体中的迁移、扩散与转化过程,并紧密结合实时水质监测数据,精准评估工业废水、生活污水等各类污染源对水体的影响程度。以河流为例,模型能动态预测污染物浓度在水流作用下的变化情况,清晰界定污染范围与严重程度。一旦监测到污染物浓度逼近或突破预先设定的警戒值,模型即刻启动预警机制。以化工园区周边河流为典型场景,模型

持续密切监测园区废水排放数据,一旦捕捉到某类污染物浓度异常攀升,迅速依据模拟结果预估其对下游饮用水水源地的潜在威胁,为环保部门赢得宝贵的应急处置时间。环保部门得以迅速行动,采取关停违规排放企业、投放净化药剂等措施削减污染,有效防止水质恶化,切实保障水生态系统安全以及居民饮水健康。

4.3 水生态系统保护与修复规划

水生态系统的保护与修复工作,高度依赖水利环境系统动态模拟与预测模型的有力支撑。模型深入模拟水生态系统结构与功能对水量、水质变化的响应机制。比如,通过构建精细化模型,可模拟河流流量的季节性变化对水生生物栖息地,如鱼类产卵场、洄游通道的影响,为科学制定生态补水方案提供精准参考,维持适宜水生生物生存繁衍的环境条件。在湿地修复规划项目中,模型能够针对不同的水位调控方案、植被种植种类与布局,预测湿地生态系统在未来一段时间内的恢复效果。基于模型预测结果,规划者可合理调整修复工程细节,例如确定最佳的水位升降时间节点、选择最适配本地生态的植被品种,有效推动受损水生态系统逐步恢复,提升生物多样性,促进水生态系统朝着健康、稳定的方向持续发展^[1]。

结束语

水利环境系统动态模拟与预测模型在水资源管理、水环境风险防控及水生态保护等多方面展现出显著价值。从精准调配水资源到及时预警污染风险,再到助力生态修复规划,这些模型为水利环境领域的科学决策提供了坚实支撑。但当前模型仍存在对复杂突发情况模拟精度不足、多源数据融合深度有待提升等问题。

参考文献

- [1]陈生水,钟启明,李晨光,等.土壤干缩开裂和卷曲分析的数值模型与若干进展Ⅱ:无网格粒子类方法与混合数值模型[J].水利学报,2024,56(2):131-143.
- [2]刘贤赵,李慧,吴锦奎,等.基于时间序列分解与传统趋势分析的天然径流时空变化趋势研究[J].水利学报,2024,56(2):188-200.
- [3]吴锦奎,刘贤赵,李慧,等.基于深度学习的径流区间预测模型及变量贡献分析[J].水利学报,2024,56(1):64-77.