

极端降雨下考虑路面高程及面雨量的城市供水管网工况模拟

潘 春¹, 李艳花², 许银山³, 张袁宁³, 李广辉⁴, 朱怡然⁵, 王现勋^{5*}

¹长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 湖北 武汉

²濮阳市水资源中心, 河南 濮阳

³长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

⁴河南水谷创新科技研究院有限公司, 河南 郑州

⁵油气地球化学与环境湖北省重点实验室(长江大学资源与环境学院), 湖北 武汉

收稿日期: 2025年11月28日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

在全球气候变暖背景下, 极端降雨事件频发并为城市供水系统带来严峻挑战。本文提出一种基于路面高程和面雨量的供水管线工况随机模拟方法, 通过构建管网模型并引入高程与雨量修正系数, 模拟极端降雨条件下管线的随机破坏状态。以河南省濮阳市城区供水系统为案例, 利用EPANET软件进行模拟分析, 结果表明, 该方法能够有效预测不同破坏程度下管网的运行工况, 揭示关键节点在灾害下的供需水变化, 为极端天气下城市供水系统的应急调度与风险防控提供了理论依据与决策支持。

关键词

极端降雨, EPANET, 面雨量, 路面高程, 管网工况

Simulation of Urban Water Supply Network Operation Considering Road Elevation and Surface Rainfall under Extreme Precipitation

Chun Pan¹, Yanhua Li², Yinshan Xu³, Yuanning Zhang³, Guanghui Li⁴, Yiran Zhu⁵, Xianxun Wang^{5*}

¹Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Puyang City Water Resources Center, Puyang Henan

³Bureau of Hydrology Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

⁴Henan Water Valley Innovation Technology Research Institute Co., Zhengzhou Henan

⁵Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment (College of Resources and Environment, Yangtze University), Wuhan Hubei

Received: November 28, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 26, 2025

*通讯作者简介: 王现勋(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水资源规划与管理, Email: wangxianxun@yangtzeu.edu.cn

文章引用: 潘春, 李艳花, 许银山, 张袁宁, 李广辉, 朱怡然, 王现勋. 极端降雨下考虑路面高程及面雨量的城市供水管网工况模拟[J]. 水资源研究, 2025, 14(6): 555-564. DOI: [10.12677/jwrr.2025.146061](https://doi.org/10.12677/jwrr.2025.146061)

Abstract

Against the backdrop of global warming, frequent extreme precipitation events pose severe challenges to urban water supply systems. This paper proposes a stochastic simulation method for assessing the operational status of water supply pipelines based on road elevation and surface rainfall. By constructing a pipe network model and incorporating elevation and rainfall correction coefficients, the random failure status of pipelines under extreme precipitation conditions are simulated. Taking the urban water supply system of Puyang City, Henan Province as a case study, simulation analysis was conducted using EPANET software. The results demonstrate that the proposed method can effectively predict the operational conditions of the pipe network under varying degrees of damage, and reveal changes in water supply and demand at key nodes during disasters, and provide theoretical support and decision-making basis for emergency dispatch and risk prevention and control of urban water supply systems under extreme weather conditions.

Keywords

Extreme Precipitation, EPANET, Surface Rainfall, Road Elevation, Water Supply Network Operation

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0). <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变暖以及极端降雨事件频发的背景下[1]，城市洪涝灾害的发生频率增加，给基础设施建设和供水系统带来了显著影响，例如，2020年武汉和重庆的特大洪涝灾害[2]以及2021年郑州“7.20”暴雨事件[3]，均对城市交通、电力等关键基础设施造成了严重影响，导致城市部分或全部基础设施停摆。

针对城市供水系统的研究，许多学者从不同角度开展了相关研究并取得了一定的成果。侯精明等[4]模拟分析不同雨水口堵塞和管道淤积条件下的管网排水过程和地表积水量，发现随着管道淤积和雨水口堵塞程度的增加，管网排水能力逐渐下降。侯本伟等[5]基于管线位置处的地震动参数，提出了一种考虑管线失效相关性的埋设管网地震连通可靠性随机模拟方法，用于计算管线的地震破坏概率。涂杰等[6]基于供水管网的历史压力数据，分析了供水管网发生漏失事故时，影响压力变化的关键因素。和丽荣等[7]针对管道在地震时可能发生的随机破损，研究了城市供水管网抗震可靠性的随机模拟方法。陈勇燕等[8]则在管线震害评估的基础上，采用蒙特卡罗法随机模拟了管网各边的破坏状态。

上述研究大多未考虑极端降雨对城市供水管网输水管线的潜在破坏。本文在考虑到极端降雨的基础上，提出了一种基于路面高程和面雨量的供水管线工况随机模拟方法，该方法考虑了在极端降雨天气下的供水管线受到破坏的随机性，以及管线所在区域的路面高程以及面雨量对管线工况的影响程度，能够为城市供水系统的应急调度与风险防控提供理论依据与决策支持。

2. 研究方法

供水管线工况随机模拟方法由供水管网模型建立模块、数据修正模块、以及随机模拟模块三部分构成，各部分分述如下。

2.1. 供水管网模型建立

采用正态分布方法对供水管线进行随机模拟，具体步骤如下：

步骤1 根据给定的研究区域, 构建城市供水管网模型, 假设城市供水管网模型中共有用水节点 M 处、供水管线 N 条, 随机生成 N 个介于 0~1 之间的随机数, 分别为:

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \dots x_N \quad (1)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots x_N$ 为介于 0~1 之间的随机数, n 为供水管线的编号, N 为供水管线总数。

步骤2 将步骤 2 中随机数作为概率, 基于标准正态分布, 计算出每个随机数对应的正态分布随机值, 则每条水管线的正态分布随机值 X_n 为:

$$X_n = \mu + \sigma \cdot \phi^{-1}(x_n) \quad (2)$$

式中, X_n 为每条水管线的正态分布随机值, μ 为总体均值, σ 为总体标准差, ϕ^{-1} 为标准正态分布的累积分布函数的逆函数。

2.2. 数据修正

步骤1 借助地图软件或地理信息系统获取研究区域每个用水节点的路面高程数据, 以每条供水管线两端用水节点高程的平均值作为该供水管线所在路面的高程 h_n , 计算每条供水管线的路面高程修正系数 η_n :

$$\eta_n = 1 + \frac{h_n - \bar{h}}{0.5 \times (h_{\max} - h_{\min})} \quad (3)$$

式中, η_n 为每条供水管线的路面高程修正系数, \bar{h} 为供水管线路面高程的平均值, $\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n$; h_{\max} 为所有供水管线中路面高程的最大值; h_{\min} 为所有供水管线中路面高程的最小值。

步骤2 首先依据研究区域的经纬度范围, 按不超过研究区域经纬度跨度的 1/2, 对研究区域进行网格划分, 则网格数量为 S , 并获取研究区域不同网格的面雨量数据; 按照网格内包含的所有供水管线, 其面雨量均为该网格的面雨量数据, 将每条供水管线分别与其对应的网格面雨量相匹配, 分别为:

$$p_1, p_2, \dots, p_n, \dots, p_N \quad (4)$$

式中, $p_1, p_2, \dots, p_n, \dots, p_N$ 为每条供水管线所对应的面雨量, n 为供水管线的编号, N 为供水管线总数。根据供水管线的面雨量数据, 分别计算每条供水管线的面雨量修正系数 φ_n :

$$\varphi_n = 1 + \frac{p_n - \bar{p}}{0.5 \times (p_{\max} - p_{\min})} \quad (5)$$

式中, φ_n 为每条供水管线的面雨量修正系数, p_n 为供水管线面雨量的平均值, $\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n$, p_{\max} 为供水管线中面雨量的最大值; p_{\min} 为供水管线中面雨量的最小值。

步骤3 根据供水管线的路面高程修正系数 η_n 和面雨量修正系数 φ_n , 对每条供水管线对应的正态分布随机值 X_n 进行修正, 得到修正后的随机值 XL_n :

$$XL_n = X_n \times \eta_n \times \varphi_n \quad (6)$$

式中, XL_n 为修正后的每条供水管线对应的正态分布随机值, X_n 为每条供水管线对应的正态分布随机值, η_n 为路面高程修正系数, φ_n 为面雨量修正系数。

2.3. 随机模拟

步骤1 根据修正后得到的每条供水管线对应的随机值 XL_n , 计算每条供水管线所对应的正态分布的累积概率值 $F(x)_n$:

$$F(x)_n = P(X \leq XL_n) = \phi\left(\frac{XL_n - \mu}{\sigma}\right) \quad (7)$$

式中, $F(x)_n$ 为每条供水管线所对应的正态分布的累积概率值, XL_n 为修正后的每条供水管线对应的正态分布随机值, ϕ 为标准正态分布的累积函数; μ 为总体均值, σ 为总体标准差。

步骤 2 根据计算得到的供水管线累积概率值对供水管线工况进行判断: 当正态分布的累积概率值小于 5% 或大于 95% 时, 对应的供水管线无法正常运行; 反之, 如果累积概率值介于 5% 与 95% 之间, 则该供水管线可以正常运行。

3. 研究区概况

以河南省濮阳市城区为研究对象, 具体范围是北界绿城路, 南至瓦日铁路, 西至皇甫区域, 东至东濮路, 供水覆盖面积达 110 km^2 , 配水主管网总长度为 347 km 。濮阳市城区用水来源于南水北调工程和引黄工程。近年来, 濮阳市日供水量约 20 万 m^3 。其中, 生活用水量约为 11.25 万 m^3 , 供水范围内人口约 64 万; 工业用水量约 8.75 万 m^3 。

1) 供水系统概化

利用 EPANETH [9], 结合濮阳市城市工业区、生活区的分布, 构建濮阳市城市供水系统图(见图 1)。濮阳市供水基础设施包括 2 座水厂, 分别用于工业和生活用水。其中, 工业用水节点共计 14 个, 并通过 17 条供水管线进行输配, 主要分布在城市左下区域; 生活用水节点共计 36 个, 由 46 条供水管线构成输配网络, 主要分布在城市右下区域, 形成两个相对集中的供水区。

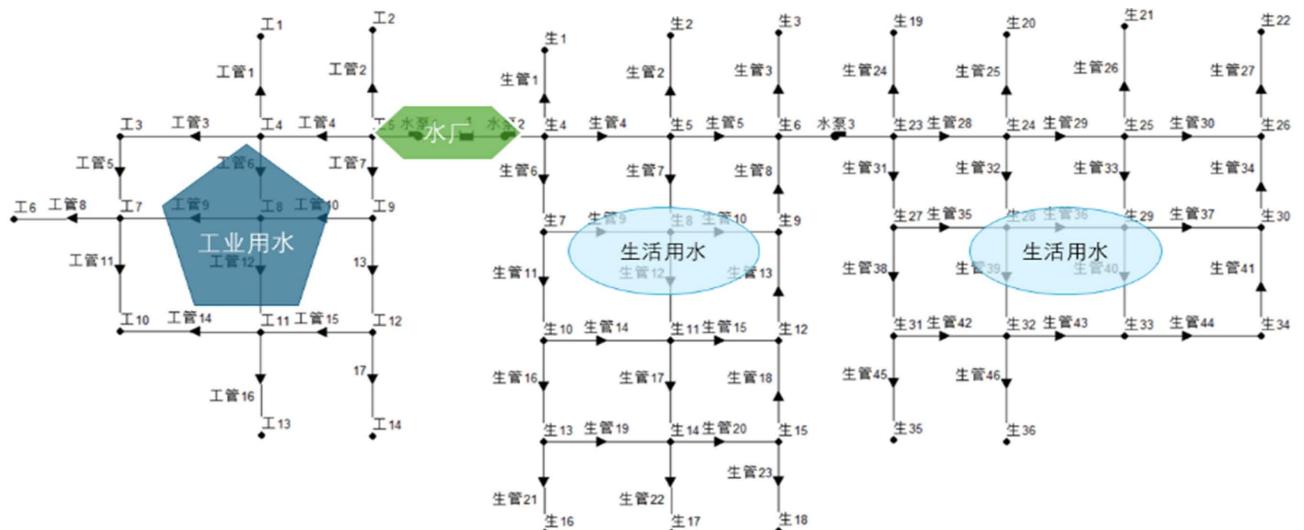


图 1. 濮阳市生活区和工业区的供水系统模拟图

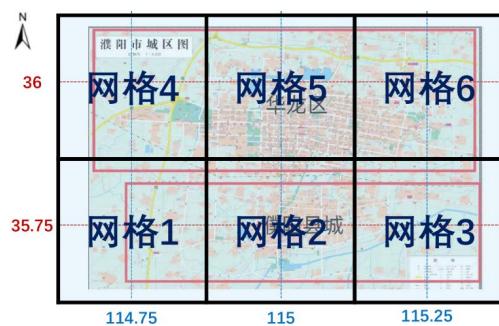


图 2. 濮阳市面雨量网格划分图

2) 供水区域面雨量

根据研究区域的经纬度范围, 按顺序对研究区域进行网格划分, 可得到六块网格, 如图 2 所示。

4. 实例分析

4.1. 模型的可行性验证

通过文献调研发现, EPANET 在水力模拟、水质模拟以及城市供水系统的实际工程应用中得到了大量的应用, EPANET 的广泛适用性为本研究提供了技术基础。

1) 水力模拟

邵会卿等[10]使用 EPANET 软件对天津某区域的供水管网进行了水力计算, 提出了管网优化方案并验证了其合理性。王郁超等[11]以安徽省蒙城县饮水安全工程为例, 通过 EPANET 软件进行水力计算和管网优化设计, 提出了关于供水安全性和经济性的相关建议。杜坤等[12]利用 EPANET 软件对短管出流模型中的不同程度渗漏及爆管现象进行了水力模拟。张移胜[13]为满足供水要求, 应用 EPANET 软件进行了供水管网的水力计算, 并确定了管网中最不利的配水点。

2) 水质模拟

陈成新等[14]在研究某城市区域供水管网的水力与水质动态模拟时, 针对管段水力工况变化及节点余氯衰减规律, 提出了一些管网优化措施。王珍等[15]通过 EPANET 软件构建了再生水滴灌系统的水力性能模型, 并对余氯的迁移、衰减和分布进行了分析。该模型还评估了不同加氯模式及毛管长度对系统余氯分布特征的影响。张凤娥等[16]利用 EPANET 软件建立了供水管网的三卤甲烷水质模型, 该模型能更准确地反映三卤甲烷在管网中的浓度分布。信昆仑等[17]则将节点水龄作为水质指标, 优化了水源供水量的调度, 有效降低了管网的综合水龄。

3) 实际工程应用

EPANET 作为专业的水力与水质模拟软件, 在城市供水系统领域具有重要的工程应用价值。Ahmed Cemiloglu 等[18]以伊朗马什哈德市第三区的供水网络为研究对象, 结合了 NSDE 算法和 EPANET 软件对城市供水网络进行优化和水力模拟, 结果表明, 安装 5 个减压阀可使网络平均压力降低 56.12%, 显著提高了系统的效率和可靠性, 同时减少了水资源损失和运营成本。Abbas A. Khanoosh 等[19]以伊拉克提克里特大学校园的供水网络为研究对象, 利用 EPANET 软件对供水网络进行水力分析, 验证了 EPANET 在极端工况(如突发污染、管道破裂)下的鲁棒性, 结合 Hybrid Node Loop (HNL) 算法提升计算效率, 重点研究了在不同用水需求(如早晨和晚上)下, 供水网络中压力和流量的变化情况。结果表明, 早晨由于学院和教职工住宅区用水需求增加, 导致远离泵站的区域压力下降; 而晚上学生和教职工离开校园后, 网络压力上升, 但女生宿舍和教职工住宅区用水需求仍较高。

综上所述, EPANET 不管是在水力模拟方面还是在水质模拟方面, 都得到了充分的应用。此外, EPANET 在城市供水系统管网模拟的应用中有着坚实的基础。因此, 在极端降雨背景下, 研究不同管网破坏的场景下的城市供水系统的运行工况可以很好地借助 EPANET 软件构建的模型进行模拟与分析。

4.2. 模拟工况

当城市供水管网破坏程度较小时, 即累积概率值介于 5% 和 95% 之间, 工业用水区编号为 11 和 12 的供水管线以及生活用水区编号 19 和 40 的供水管线无法正常工作, 如图 3 所示, 图中红色部分为无法正常工作的供水管线。以工业用水节点 10 以及生活用水节点 33 为例, 进行供需水分析。

1) 在供水管线正常运行的情况下, 工业用水节点 10 的供需水达到平衡, 如图 4(a)所示。而在极端降雨工况下, 工业供水管线 11 发生故障, 无法正常运行, 节点 10 由双线供水变为单线供水。进行供水管网调试后, 工业用水节点 10 的供需水情况如图 4(b)所示, 此时工业供水管线 14 的最大供水能力为 0.029 万 m^3/h , 供水量远达不到工业用水节点 10 的需水量, 导致节点 10 出现缺水现象, 无法满足其正常用水需求。

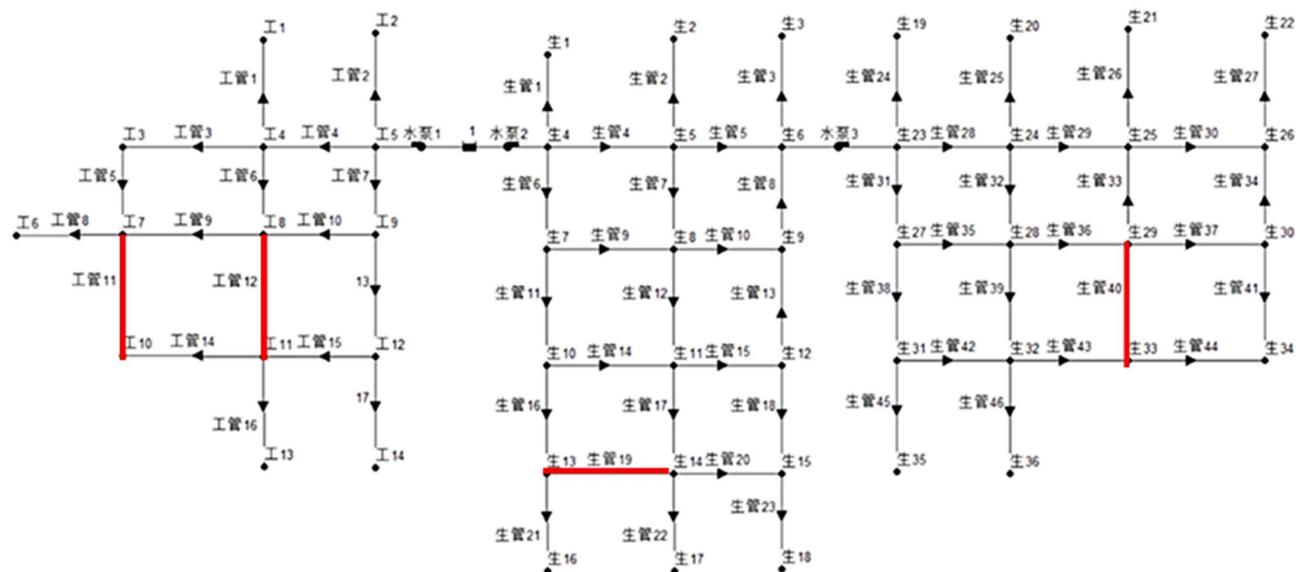


图3. 濮阳市供水系统模拟管网工况一

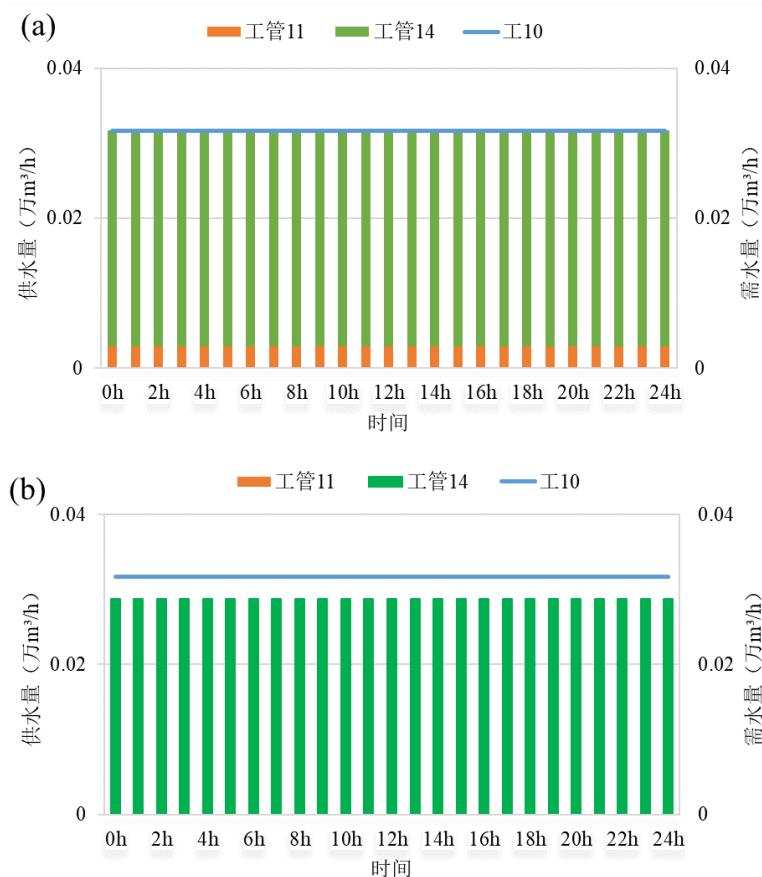


图4. 正常工况(a)以及极端工况(b)下工业用水节点10 供需水情况

2) 在供水管线正常运行的情况下,生活用水节点33的供需水达到平衡,如图5(a)所示。而在极端降雨工况下,生活供水管线40发生故障,无法正常运行,节点33由双线供水变为单线供水。进行供水管网调试后,生

活用水节点33的供需水情况如图5(b)所示,此时生活供水管线43的最大供水能力远达不到生活用水节点33的需水量,导致节点33出现缺水现象,无法满足其正常用水需求。

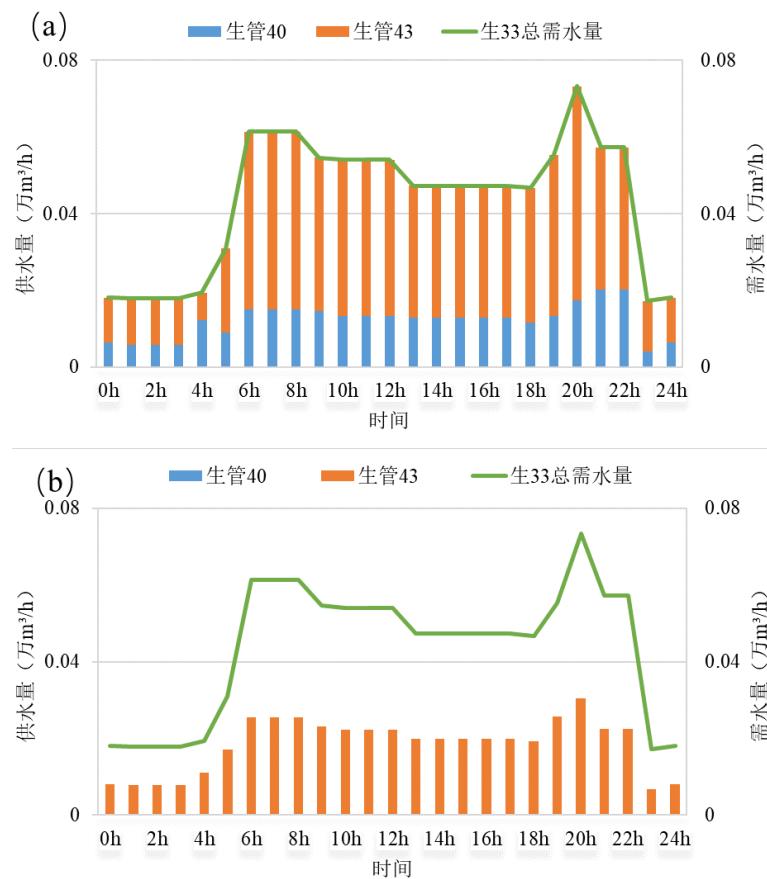


图5. 正常工况(a)以及极端工况(b)下生活用水节点33供需水情况

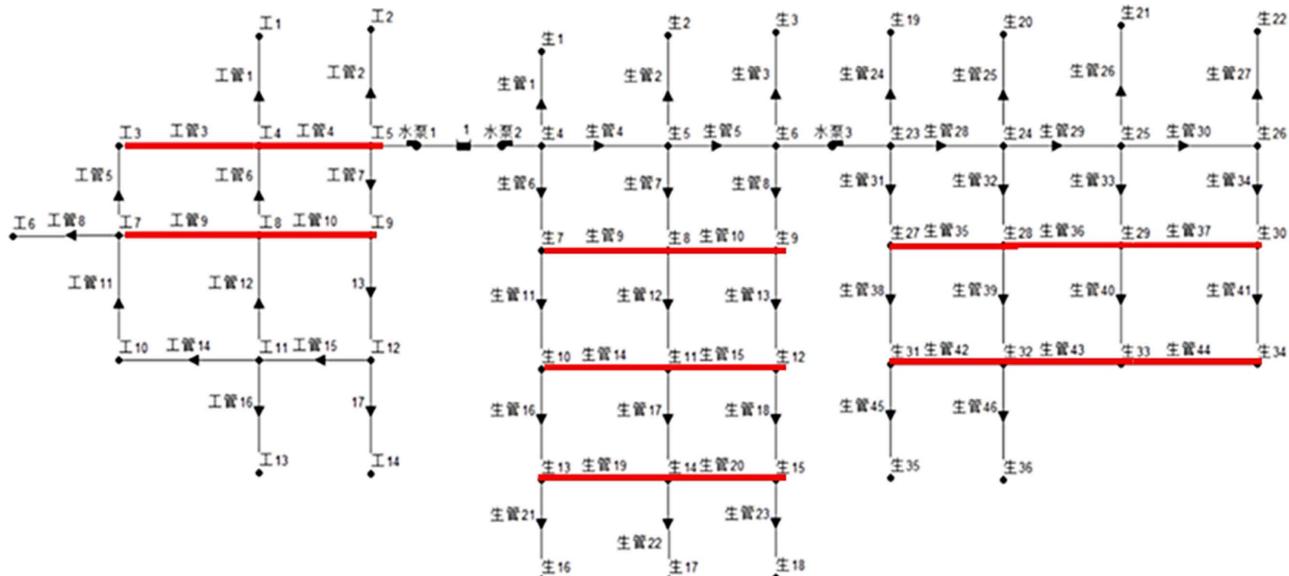


图6. 濮阳市供水系统模拟管网工况二

4.3. 模拟工况二

当城市供水管网破坏程度大时, 即累积概率值介于 2.5% 和 97.5% 之间, 工业用水区编号为 3、4、9 和 10 的供水管线以及生活用水区编号 9、10、14、15、19、20、35、36、37、42、43 和 44 供水管线无法正常工作, 如图 6 所示, 图中红色部分为无法正常工作的供水管线。

其中, 工业区由于大范围的供水管线受到破坏, 只剩下工业供水管线 14 和 15 的管线正常运行, 其输水压力剧增。生活区由于受到极端降雨等灾害的影响, 部分区域的输水管线受到较为严重的破坏, 无法正常运行, 导致生活区的每个节点的用水在这种供水管网工况下, 完全由生活用水节点 4 提供。以工业用水节点 11 以及生活用水节点 4 为例, 分析城市供水管网系统受破坏前后的需水量变化。

1) 城市供水系统遭受破坏前, 工业用水节点 11 的需水量由供水管线 12 和 15 提供, 且该节点的主要功能是为工业输水管线 14、16 及其连接的节点供水。此时, 工业用水节点 11 的供需水量平衡, 没有出现缺水现象, 如图 7(a)所示。而城市供水系统遭受破坏后, 工业用水节点 11 的需水量包含节点本身的需水量、供水管线 12、14 以及 16 的需水量, 并且只由工业供水管线 15 提供, 来满足其本身及下游节点的用水需求。如图 7(b)所示。以上结果表明, 尽管灾后极端降雨对供水管网造成了较为严重的影响, 但供水管网系统的灵活性使得部分供水管线在不超出自身最大供水能力的前提下, 能够通过适当调整供水范围来扩大供水覆盖区域, 从而保证了城市供水系统的正常运行。

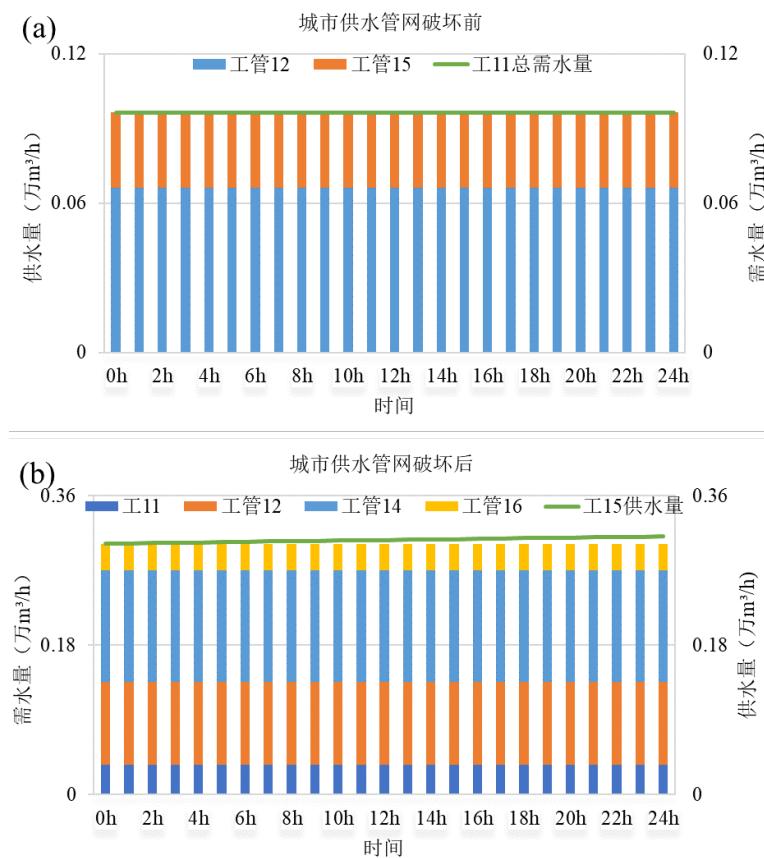


图 7. 正常工况(a)以及极端工况(b)下工业用水节点 11 供水情况

2) 城市供水系统遭受破坏前, 生活用水节点 4 从水泵 2 获得一定的水量, 分别通过供水管线 1、4 和 6 向生活用水节点 1、5 和 7 提供其所需的水量, 其供水量达到平衡, 如图 8(a)所示。而城市供水系统遭受破坏后,

由于生活用水节点4通过供水管线4所供应的生活用水节点数量相较于通过供水管线6供应的数量更为庞大，因此生活用水节点4通过供水管线4向生活用水节点5提供的水量出现增加，同时通过供水管线6向生活用水节点7提供的水量则有所减少，如图8(b)所示。以上结果表明，为确保生活区每个用水节点的用水需求得到满足，生活用水节点4在其最大水量可分配能力的范围内，对从水泵2获取的水量，根据供水区域中用水节点的数量，进行了优化和重新分配。

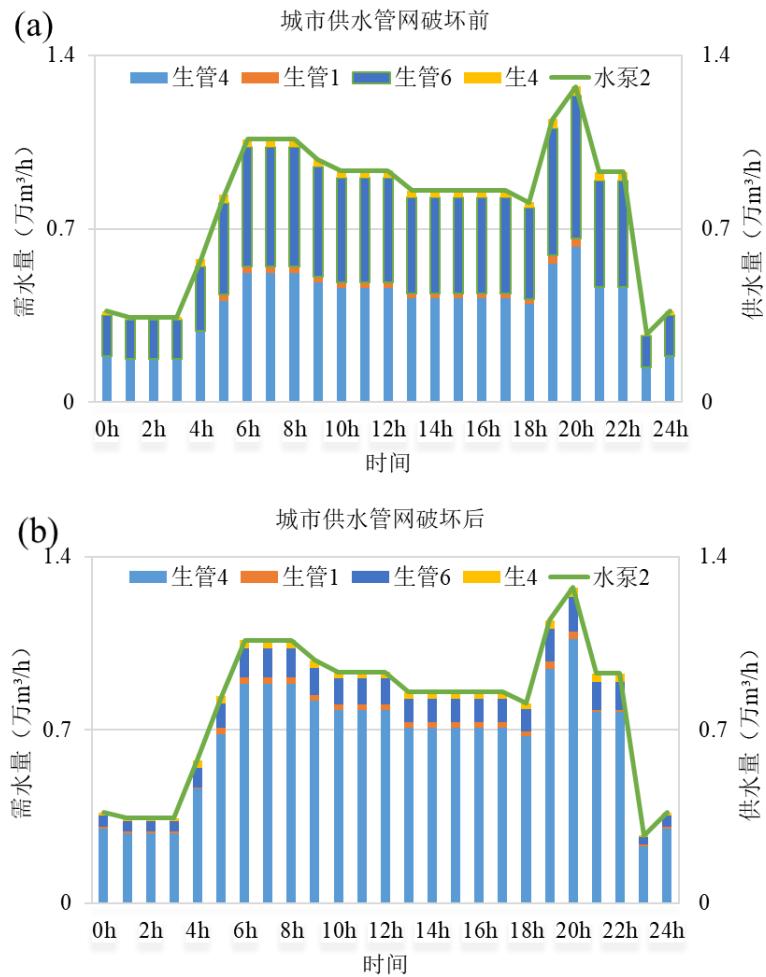


图8. 正常工况(a)以及极端工况(b)下生活用水节点4供水情况

5. 结论

1) 本文提出了一种基于面雨量和路面高程的城市供水管网工况随机模拟方法，降低了传统模拟方法在计算复杂度、实时性及动态适应性等方面的局限性。结果表明，该模拟方法合理可行，为城市供水系统在极端天气条件下的工况预测提供了有效工具。

2) 本研究模拟了极端降雨下濮阳市不同破坏程度的供水系统，分析了个别用水节点的供水情况，为极端降雨致灾背景下城市供水应急调度方式的研究提供了理论依据和决策支持。

基金项目

国家自然科学基金(U2340213); 国家重点研发计划课题(2021YFC3200301)。

参考文献

- [1] 陈旭坤, 回晓莹, 季颖. 人类活动对长江流域尺度降雨变化的可能影响研究[J]. 长江技术经济, 2021, 5(1): 84-88.
- [2] 张宏雅, 魏永强, 范仲杰. 汛情下的城市防洪排涝方案分析——以武汉和重庆为例[J]. 长江技术经济, 2021, 5(1): 9-13.
- [3] 梁明. 极端天气情况发生与应对措施探讨[J]. 长江技术经济, 2022, 6(S1): 44-46.
- [4] 侯精明, 王梓驿, 李东来, 等. 管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟[J]. 水科学进展, 2025, 36(1): 122-131.
- [5] 侯本伟, 李小军, 刘爱文, 等. 考虑管线失效相关性的埋设管网系统地震可靠性随机模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 84-91.
- [6] 涂杰, 刘文睿, 丁祥, 等. 基于压力相关的城市供水管网漏失预警研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 139-143.
- [7] 和丽荣, 杜坤, 宋志刚, 等. 城市供水管网抗震可靠性评估的随机模拟方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 62-69.
- [8] 陈勇燕, 王喆. 城市供水管网抗震可靠性分析[J]. 江西建材, 2021(9): 250-252.
- [9] 李树平. 基于 EPANET 本地化的给供水管网教学软件开发[J]. 给水排水, 2011, 47(7): 161-164.
- [10] 邵会卿, 张丽, 陈楚楚, 等. EPANET 软件在区域供水管网改造设计中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 128-131.
- [11] 王郁超, 陶月赞, 郭增辉. EPANET 软件在农村供水管网设计中的应用[J]. 市政技术, 2011, 29(2): 58-60+105.
- [12] 杜坤, 龙天渝, 刘佳, 等. 渗漏供水管网水力特性研究[J]. 给水排水, 2014, 50(1): 152-156.
- [13] 张移胜. 用 EPANET 确定供水管网的最不利配水点[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(4): 52-55.
- [14] 陈成新, 李嘉豪, 曹越, 等. EPANET 软件在城市区域供水管网中的应用[J]. 市政技术, 2017, 35(5): 136-139+174.
- [15] 王珍, 郝锋珍, 李久生, 等. 基于 EPANET 的再生水滴灌系统余氯分布模型构建[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 99-106.
- [16] 张凤娥, 陈春芳, 张敏, 等. 基于 EPANET 的供水管网三卤甲烷模型[J]. 中国给水排水, 2013, 29(11): 51-53.
- [17] 信昆仑, 瞿玲芳, 陶涛, 等. 基于综合水龄指数评价的供水管网优化调度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1579-1584.
- [18] CEMILOGLU, A., LİCAİ, Z., UGURENVER, A., et al. Optimal exploitation of urban water supply networks based on pressure management with the nondominated sorting differential evolution (NSDE) algorithm. Water, 2023, 15(14): 2583.
<https://doi.org/10.3390/w15142583>
- [19] KHANOOSH, A. A., KHALEEL, H. E. and ALI, M. S. W. The resilience of numerical applications to design drinking water networks. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2023, 18(5): 1069-1075.
<https://doi.org/10.18280/ijdne.180507>