

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231011001

极端暴雨下城区新建基础设施洪涝致灾规律研究*

范臣臣¹, 侯精明¹, 陆品品², 李东来¹, 官保君¹, 张佩琦¹, 高徐军^{1,3}

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为探究极端暴雨下城市基础设施洪涝致灾规律, 以西安某新建330 kV变电站为例, 构建基于GPU加速技术的二维地表水动力城市雨洪过程模型, 对不同降雨条件下变电站站区积涝过程进行模拟, 对比分析不同降雨与站区水位的响应关系。结果表明: ①站区水位随降雨持续先增加, 后逐渐缓慢降低; ②随着设计暴雨重现期增加, 站区内的最高水位不断增高, 在300 a一遇降雨重现期下趋于稳定, $P \leq 300$ 时水位增加量占整体的74.31%; ③重现期300 a一遇为水位增长量拐点, 建议根据行业特色、经济性、所在汇水区的产汇流状况和洪涝致灾风险等因素综合考虑设防水平。研究揭示了极端降雨对变电站设计标高的量化规律, 为极端暴雨下变电站及城市其他新建基础设施的防洪建设提供重要参考。

关键词: 极端暴雨; 城市基础设施; 洪涝致灾; 数值模拟

中图分类号: P333.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1265-10

Research on Flood Disaster Patterns of Newly Built Urban Infrastructure during Extreme Rainstorms

FAN Chenchen¹, HOU Jingming¹, LU Pinpin², LI Donglai¹, GUAN Baojun¹,
ZHANG Peiqi¹, GAO Xujun^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China; 2. CAUPD Beijing Planning and Design Consultants Ltd., Beijing, 100044, China; 3. Power China Northwest Engn Crop Ltd., Xi'an, 710065, China)

Abstract: Aiming to investigate the flood disaster patterns of urban infrastructure under extreme rainstorms, a two-dimensional GPU-accelerated surface water flow and transport model (GAST) was constructed for a newly built 330 kV substation in Xi'an. The model was used to simulate the flooding process in the substation area under different rainfall conditions and to compare and analyze the response of the station area's water levels to different rainfall intensities. The results indicated that: ① The water level in the substation area initially increased with the duration of the rainfall and then gradually decreased. ② As the design rainstorm return period increased, the highest water level in the substation

* 收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2023-11-27

基金项目: 中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2022-41)、中国电建集团西北院公司级重大科技项目(XBY-ZDKJ-2022-9)、宁夏重点研发计划资助(2022BEG02020)资助

作者简介: 范臣臣(1996—), 男, 博士研究生。主要从事城市水动力模拟分析及防洪减灾研究。E-mail: fancc2019@163.com

通信作者: 侯精明(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地表水及其附随过程数值模拟研究。

E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

area also increased, gradually stabilizing at the 300-year return period (P). When $P \leq 300$, the increase in water level accounted for 74.31% of the total. ③ The 300-year return period was the inflection point for the water level increase. It was recommended to consider various factors including industry characteristics, economic feasibility, watershed runoff conditions, and flood risk when determining the flood defense level. The study elucidates the quantitative relationship of extreme rainfall on the design elevation of substations and provides important reference for flood control in substations and other new urban infrastructure under extreme rainstorms.

Keywords: extreme rainstorm; urban infrastructure; flood-induced disaster; numerical simulation

0 引言

受季风气候、地形复杂和流域广阔等因素的影响,自古我国洪涝灾害频发,给人民生活带来了重大的威胁^[1]。新中国成立后,国家开展一系列防洪工程建设,抵御洪涝灾害的能力不断提升^[2]。然而,随着近年来城镇化发展导致的城市下垫面变化^[3]和温室效应导致的气候变化^[4]等大量人为因素介入,以极端降雨频发和城市防洪排涝能力不足为主要原因的洪涝灾害愈演愈烈^[5-7]。2012年“7·21”北京特大暴雨^[8]和2021年郑州“7·20”特大暴雨^[9],均造成了重大的人员伤亡和财产损失,包括由此引发的城市关键基础设施瘫痪导致的停水停电和通讯中断等问题^[10-11]。这些设施的停滞不仅给应急响应和医疗等部门的抢险救灾造成巨大的困难,还严重影响人们的正常生活^[12]。因此,极端洪涝灾害下城市关键基础设施的防洪设计和安全运维至关重要^[12]。

我国城市基础设施(输油输气管道、通信台站、输变电设施)的防洪设计标准是根据构筑物级别、所处的地理位置等综合考虑制定^[13],结合经济性、合理性和适用性大多以百年一遇重现期为上限^[14]。鉴于近年来极端降雨频发,城市尤其是人口高密度区域的防洪排涝设施脆弱性突显,加强城市基础设施的防洪能力已然成为各新建和旧设施改造的必要工作^[15]。

目前,国内外学者关于极端暴雨的研究多集中在成因分析^[16]、区域情景模拟^[17-18]和风险评估^[19]方面。黄国如等^[20]利用ArcGIS空间分析和模糊数学综合评价等方法,选取12个指标对深圳现状暴雨洪涝灾害进行风险评估,分析评价了中高风险区域的

风险主导因素;李敏等^[17]基于ICM软件通过构建武汉城区二维水文水动力模型,模拟分析了极端暴雨条件下城区直排和调蓄水系的退水过程。以上针对城市内涝模拟多关注的水力要素为积涝点、淹没水深和范围等,提出的防涝对策也多针对于这些水力要素,而类似变电站等具有鲜明行业特色的城市基础设施的防洪建设所关注的是站区设计标高,对应的水力要素为水位、退水时间等。因此,以考虑水位变化为主的积涝过程与常规城市相比有何异同点,有待考究。

关于城市基础设施的研究则集中在灾害演化机制^[21]和新型防洪设施设计^[22]上,易嘉伟等^[23]人运用大数据STL时序分解和偏差统计检验法,监测分析了北京2018年“718”暴雨条件下道路交通和人群活动的响应;邵薇薇等^[24]通过构建一二维水动力耦合模型计算了极端暴雨下的内涝情景,并利用通行速度衰减模型分析了极端降雨下对城市交通的影响。以上均针对现状洪涝灾害开展模拟评估,然而关于极端暴雨条件下城市基础设施的防洪能力提升研究较少。如何量化城市基础设施的洪涝致灾演变规律,尤其是如何量化极端降雨与城市基础设施防洪建设成本之间的响应关系,对于100、500、1000 a一遇重现期条件下雨量值和城市基础设施的设计标高是否呈线性增长等问题,则是防洪防涝建设过程中亟待解决的问题。

鉴于此,本文以西安市某新建330 kV变电站为例,通过构建二维城市地表雨洪模型,模拟预测不同极端暴雨下变电站所在站区的积涝情况,对比分析不同降雨量与站区水位的响应关系,旨在揭示极端降雨量对变电站设计标高的量化规律,为变电站及城市其他新建基础设施的防洪建设提供重要参考。

1 研究区域及方法

1.1 区域概况

西安某 330 kV 变电站位于陕西省西安市城区西南部,系渭河流域内,属暖温带大陆性季风型气候,年降水总量为 517.8 mm,降水量年际变化很大,主要集中在 5~10 月,其中,7~9 月占全年降雨量的 50% 左右^[25-26]。随着西安城市化的推进,对流性极端降水频发,暴雨强度有明显增大趋势,尤其是近年来,短历时、高强度的降雨屡屡出现,给当地居民的生产生活造成重大影响。西安高新技术产业开发作为国家级的新区,经近年来的高速发展,人口密度逐渐增大,城市下垫面已由可渗透转变为道

路、广场和建筑物等不可渗透的硬质地面。随着土地利用原有特性的转变,降雨导致汇流速度加快,造成部分区域出现严重积涝。

城市变电站的洪水程度受周边地区的影响显著,因此对模拟范围的确定显得尤为关键。站区周边地形整体呈东南高西北低,自然高程在 406~430 m 之间。站区北部毗邻高架快速路,南侧为高层住宅小区,东西两侧为两条主干道路。东西侧道路地形低于变电站位置,且北高南低,纵向坡度较大,在降雨过程中,径流沿该路段流向南部低洼区域。因此,相较于周边区域,站区的地势相对较高,不存在大范围的客水汇入情况。鉴于研究重点关注变电站及其周边区域,选取以站区为中心,横向和纵向延伸均超过 1.5 km 的范围,并涵盖周边 5 条主干道路,形成方圆 10.92 km² 的研究区域(图 1)。

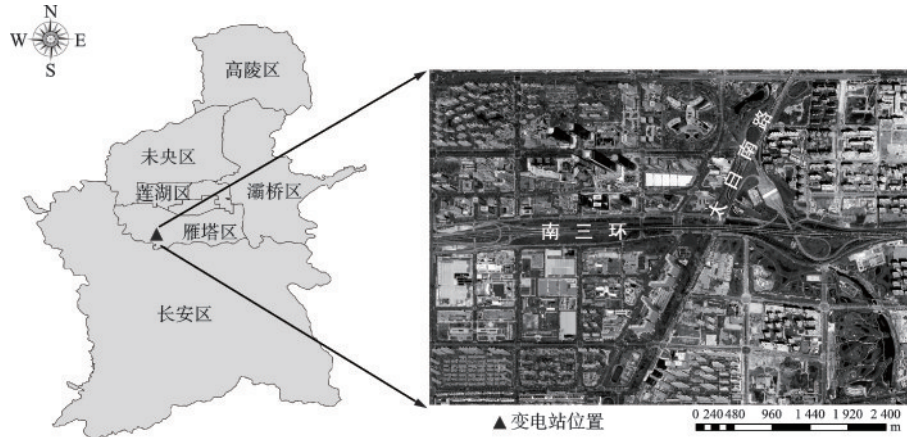


图 1 研究区域位置及高清影像

Fig.1 Location and high-definition image of the study area

1.2 极端暴雨城市洪涝模型构建

针对极端暴雨下的城市基础设施的洪涝过程模拟,构建高效高精度数值模型至关重要。而常规性雨洪模型的计算难以平衡精细化和模拟稳健性之间的矛盾^[27],因此本文选用笔者自主研发的二维水文水动力耦合模型(GAST)模拟重要区域的降雨产汇流及演进过程^[28]。其中,产流过程采用水量平衡原理,由于短历时高强度暴雨下,地表蒸腾和截留量极小,可忽略不计,即模型仅考虑下渗损失^[29];汇流过程采用 Godunov 格式的有限体积法离散二维水动力方程,利用 HLLC 近似黎曼求解器逼近网格内通量的近似值,底坡及摩阻源项采用笔者提出的相应方法处理,并应用两步龙格塔法推进二阶时

间精度^[28]。同时,为保证高效率数值计算,模拟引入 GPU 并行加速技术提升计算效率^[30]。

1.2.1 地表汇流及演进过程计算

本模型以二维浅水方程为控制方程,忽略运动黏性项、紊流黏性项、科氏力和风应力,二维非线性浅水方程守恒格式的矢量形式为^[28]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x - S_{fx} \\ -gh\partial z_b/\partial y - S_{fy} \end{bmatrix}$$

式中, q 为变量矢量, 包括 h 水深(m), x, y 为笛卡尔坐标系下的空间位置(m), q_x 和 q_y 是 x, y 两个方向上的单宽流量(m^2/d); F, G 分别为 x, y 方向上的通量矢量; t 为时间(s); i 为净雨速率(mm/h); u, v 分别为 x, y 方向上的流速(m/s); z_b 为河底高程(m); S 为源项矢量, 包括净雨源项、摩阻力源项 S_f 及底坡源项 S_b 。

摩阻力源项 S_f 在 x, y 上表达:

$$\begin{cases} S_{fx} = gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \\ S_{fy} = gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \end{cases} \quad (3)$$

式中, n 为曼宁系数。

由于研究对象为变电站洪涝致灾规律, 与之对应的水力学要素为水位, 则引入水位的计算公式:

$$Z = h + Z_b \quad (4)$$

式中, Z 为水位; h 为水深, m; Z_b 为基础高程。

1.2.2 下渗过程

根据研究区域的土壤性质, 选用 Green-Ampt 模型表征降雨条件下的下渗过程^[28], 其假定含水率的分布呈阶梯状, 可表示为:

$$f_p = K_s \left(\frac{d + L_s + \varphi_s}{L_s} \right) \quad (5)$$

式中, f_p 为土壤下渗速率; K_s 为饱和导水率; d 为土壤表层积水深度; L_s 为湿润锋深度; φ_s 为毛细管力。

1.3 模型设置

1.3.1 暴雨情景构建

降雨采用 1961 年至 2000 年西安市降雨资料, 选用年最大值法, 计算得到的西安暴雨强度公式, 通过芝加哥雨型确定不同重现期及峰现比例下的雨强, 得到不同场次的设计降雨过程。西安暴雨强度公式如下:

$$i = \frac{18.2926 + 31.7414 * \lg P}{(t + 20.4709)^{0.9861}} \quad (6)$$

式中, i 为暴雨强度; t 为降雨历时; P 为降雨重现期。

根据西安市降雨分布特征, 选用的雨峰系数 $r=0.35$ 表征雨型, 计算得到 2 h 暴雨 6 种重现期下 (50、100、300、500、700、1 000 a) 的降雨过程, 不同时期降雨量见表 1, 降雨过程线如图 2 所示。

1.3.2 高精度地形及下垫面资料

高精度地形资料在精细模拟内涝积水过程中起到关键作用, 本研究选取 2 m 精度的 DEM 高程数据, 并根据区域高清影像数据对地表建筑、道路、广场等人工工程做修正处理得到, 模型的计算网格在该 DEM 上生成, 研究区域数字高程地形如图 3 所示。

表 1 不同极端暴雨重现期下降雨条件

Table 1 Rainfall conditions for different extreme rain-storm return periods

设计降雨重现期/a	降雨总量/mm	最大降雨强度/ ($mm \cdot h^{-1}$)
50	66.30	143.69
100	75.07	162.70
300	88.86	192.83
500	95.43	206.82
700	99.70	216.07
1 000	104.21	225.84

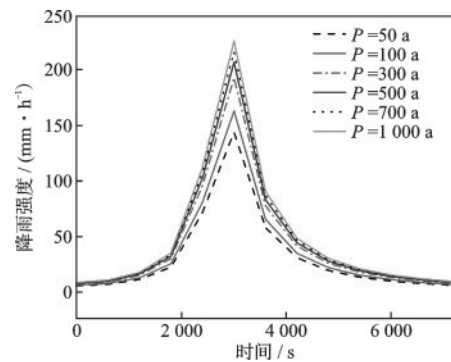


图 2 研究区域设计降雨过程线

Fig.2 Design rainfall hydrograph of the study area

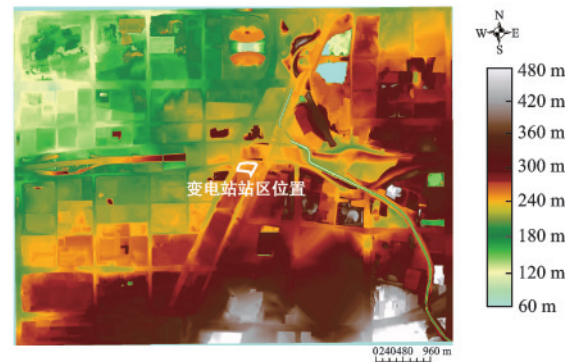


图 3 研究区域数字高程(1985 高程)

Fig.3 Digital elevation of the study area (1985 elevation)

研究区域内的土地利用类型划分, 采用最大似然分类法将收集到的高分辨率遥感影像图进行识别, 不同的计算网格单元被划分为共计 7 种土地利用类型 (道路、居住用地、林地、草地、裸土地、水域和硬质下垫面) 如图 4 所示, 并将变电站站区所在区域变为硬质下垫面。由于研究区域的管网排水设计标准为 1 a 重现期, 本文选取道路等效排水法 (CIR) 概化区域内管网排水量^[31], 根据区域暴雨强度公式计算得到的峰值作为最大管网排水量, 确定

10.74 m/h为等效下渗量。由于变电站站区所在排水分区未有历史积涝数据,所以模型选取与研究区域气候特征、土壤特性基本相近、同一属性下垫面参数一致的邻近区域(小寨区域及沣西新城)参数,参数选取见表2,模型已在邻近区域进行了模拟与验证^[28-29]。本次模拟计算过程库朗数为0.5,由于模拟两小时短历时强降雨过程,模型计算总时长为6 h,时间步长为5 min。

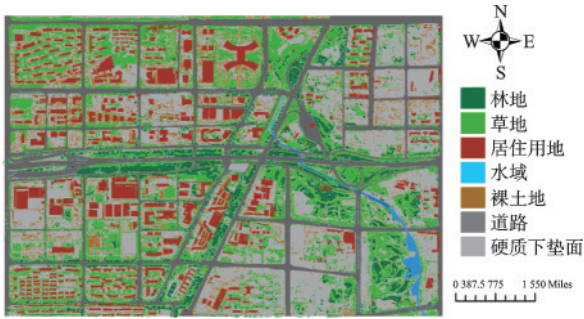


图4 研究区域土地利用类型划分

Fig.4 Classification of land use types in the study area

表2 不同下垫面糙率及稳渗率取值

Table 2 Values of roughness and stable permeability rate for different underlying surfaces

土地利用类型	糙率 ^[28] /(s·m ^{-1/3})	稳定下渗率 ^[29] /(mm·h ⁻¹)
道路	0.014	0
居住用地	0.015	0
林地	0.4	15.72
草地	0.24	8.26
裸土地	0.08	19.43
硬质下垫面	0.015	0

2 结果与讨论

2.1 设计暴雨下站区积涝过程分析

根据《变电所总布置设计技术规程 DLT5056—2007》^[32]和《GB50201—2014 防洪标准》^[14]的规定,220 kV 枢纽变电站及220 kV 以上电压等级的变电站,场地设计标高应高于百年一遇洪水水位,因此,本文研究对象设计标准对应降雨重现期为 $P=100$ a。依据构建的极端暴雨城市基础设施洪涝模型,分别计算不同暴雨条件下变电站站区及周边区域的积涝情况。与城市内涝关注积水总量、最大水深、淹没面积和退水时间等关键指标不同,以变电

站为代表的城市基础性设施防洪防涝要求在于站区内不出现积水,除站区内的排水措施外,建设或改造前设计标高的确定尤为重要。而与站区设计标高对应的水力学要素为最高水位,因此,针对暴雨条件下站区内涝分析应集中在客水汇入情况和最高水位的变化。

以100 a一遇重现期为例,模拟计算站区周边短历时强降雨下的积涝过程,提取各计算网格单元流速大小和方向信息绘制区域流速分布如图5所示。由模拟结果可知,100 a一遇重现期下积涝峰值时刻为降雨1 h后,站区最高水位为415.505 m,最大水深为0.243 m,最大流速为0.62 m/s。站区周边北部邻近高架快速路,东邻道路由北至南依次降低,整体呈北高南低之势,降雨后由站区西部道路自北向南汇流,短时间内形成积水,邻南街道成为主要的行洪通道,向各岔路口汇集,形成严重内涝积水,而站区内的积水来自低洼区域储水和站区东南角路口客水汇入。

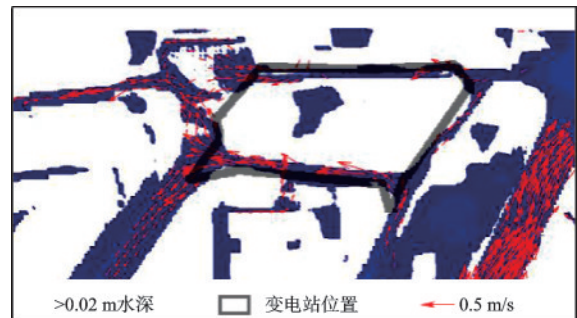


图5 100 a一遇重现期下站区周边流速分布

Fig.5 Flow velocity distribution around the substation area during $P=100$ a

将模拟结果进一步处理分析,站区最高水位随时间变化情况如图6所示。由图6可以明显看出,最高水位随降雨过程的变化先增加,并于降雨1 h左右达到峰值,随着降雨持续,站区最高水位逐渐缓慢降低。一方面,这是由西安市降雨分布特征所决定的,1.5 h 累计降雨量达到70.82 mm,短时强降雨导致站区内积水迅速增加,达到暴雨峰值后,经复杂的产流漫流过程形成积水,水位峰值较暴雨峰值迟滞时间约30 min;另一方面,站区内建设后土地利用类型均为不透水下垫面,且所在区域管网排水设计标准为1 a 重现期,在短历时强降雨条件下排涝能力有限,易产生积水点,随着降雨强度减小,形成的径流向地势低处漫流,站区内水位缓慢下降。

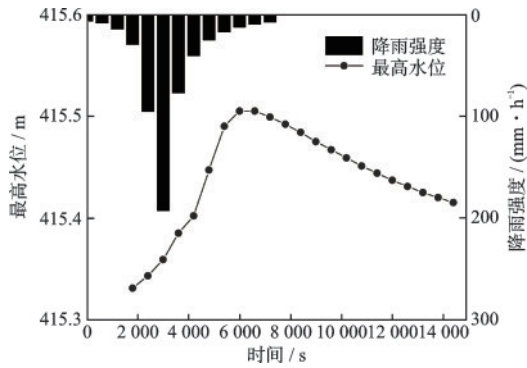


图6 100 a一遇重现期下最高水位随时间变化情况
Fig.6 Variation of the highest water level with time during $P=100$ a

2.2 不同设计暴雨下站区水位变化

利用构建的极端暴雨城市基础设施雨洪过程数值模型,分别模拟计算 50、100、300、500、700、

1 000 a一遇降雨重现期下变电站站区及周边区域的积涝情况,模拟结果见表 3 和图 7,随着降雨量的增加,变电站站区积涝程度逐渐加深,最高水位由 415.444 m 增至 415.662 m,最大积水面积由 590 m² 增至 2 961 m²。

表 3 不同极端暴雨条件下站区积涝统计表

Table 3 Statistics of waterlogging in substation area under different extreme rainstorm conditions

设计降雨重现期/a	最大淹没面积/m ²	最高水位/m
50	590	415.444
100	1 138	415.505
300	2 180	415.611
500	2 502	415.631
700	2 735	415.646
1 000	2 961	415.662

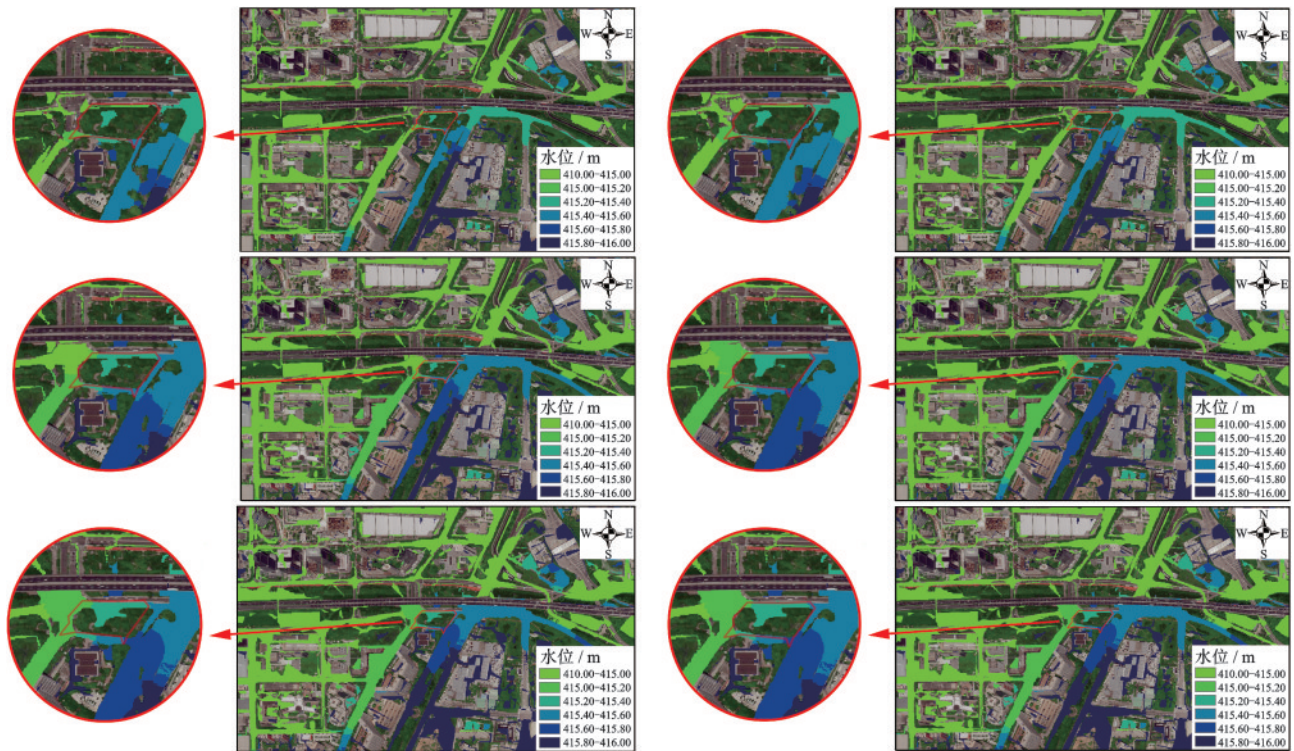


图7 不同降雨重现期下积涝峰值时刻水位分布

Fig.7 Water level distribution at peak flood accumulation time during different rainfall return periods

由图 8 可以看出,随着设计降雨重现期增加,站区内的最高水位不断增高,二者呈正相关关系,但并非为线性增长的关系,而是在 300 a 一遇降雨重现期下趋于稳定。以 $P=300$ a 为分界线, $P=50\sim 300$ a 条件下最高水位的增加量占整体的 74.31%, 而 $P=300\sim 1\ 000$ a 条件仅占 25.69%。一方面,根

据采用的暴雨强度公式可知,降雨历时 t 不变的条件下,降雨强度 i 和回归期 P 呈对数关系,即降雨强度随重现期的增大而增大,且增长速率逐渐减小,降雨量由 66.3 mm 增加至 104.21 mm,最大降雨强度由 143.69 mm/h 增加到 225.84 mm/h,结合不同重现期降雨强度曲线(图 9)来看,站区最高水位变

化曲线与最大降雨强度曲线相似,雨峰与最高水位变化曲线相邻点的差值变化情况也一致,说明目标区域最高水位受最大降雨强度的影响较大;另一方面,站区四周为街道,且东西两条道路的高差较大,自北向南为的缓坡,短历时强降雨后排水能力有限,此外,站区东南角客水汇入也是该变电站洪涝致灾的重要因素。

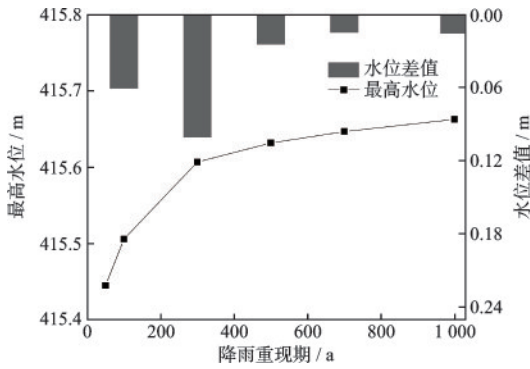


图8 不同极端暴雨下站区内最高水位变化情况

Fig.8 Change of the highest water level in the substation area under different extreme rainstorms

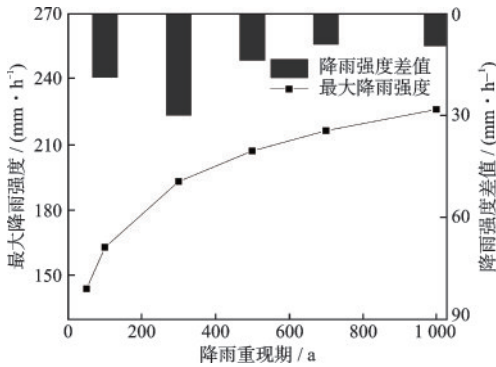


图9 不同极端暴雨单位小时最大降雨强度变化

Fig.9 Variation of maximum hourly rainfall intensity under different extreme rainstorms

为进一步得到降雨重现期与站区水位的关系,引入斜率变化率法探究站区最高水位曲线的变化规律,斜率变化率法^[33]是一种用于分析函数曲线的变化趋势和斜率变化的方法。在只改变某一因素(如降雨)的条件下,通过计算函数曲线上的点之间的斜率变化率来描述曲线的特性。它主要用于确定函数曲线的变化趋势、变化速率以及可能存在的拐点。图10表示了二个算例在不同降雨重现期条件下各相邻点之间增长率的变化,相邻降雨重现期之间最高水位的增长率均为正值,随着降雨重现期增大,站区最高水位持续增加,水位变化率在 $P=$

100~300 a时达到最大,为0.73%,随后逐渐稳定在0.3%~0.4%之间。由此可见,增长率的变化与最高水位变化趋势一致, $P=300$ a时,最高水位的增长率出现拐点。综合经济性、适应性和极端暴雨洪涝致灾风险等因素考虑,建议以300 a一遇重现期最高水位作为设计标高。

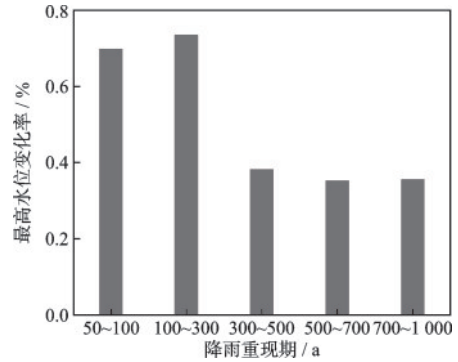


图10 不同极端暴雨下站区内最高水位变化率

Fig.10 Rate of change of the highest water level in the substation area under different extreme rainstorms

极端降雨频发,规避具有行业特色的城市基础设施洪涝风险迫在眉睫^[12,21],由以上对变电站设计标高的探究表明,针对城市基础设施的洪涝致灾模拟,需构建高效高精度的城市雨洪模型^[34],所需的建模资料精细程度要求较高,这是开展精细化模拟评估的前提;其次,应当根据行业特殊的防洪需求确定与之相对应的水力学要素^[35],例如,以上变电站设计标高的选取是建立降雨重现期与设计标高的响应关系,通过模拟预测站区内最高水位确定;最后,通过模拟不同设计降雨条件下的积涝情况,利用斜率变化率等方法建立降雨与目标变量的相关关系,结合模拟结果,区域适用性及建设成本等综合考虑制定全站填土、设计全站区防洪墙、半填土+敏感点防洪墙设计等相应的防洪防涝措施^[34]。此方法旨在明晰极端降雨与洪涝致灾之间的量化规律,可用于极端暴雨频发地区加强城市基础设施的防洪建设提供重要参考。

3 结 论

以西安市某新建330 kV变电站为研究对象,构建了精细化的城市雨洪模型,开展了5种设计暴雨重现期(50、100、300、500、700、1 000 a)下的积涝过程模拟,对比分析不同降雨与站区水位的响应关

系, 所得结论如下:

(1) 站区内最高水位随降雨持续先增加, 并于降雨后 1 小时左右达到峰值, 后逐渐缓慢降低, 水位峰值较暴雨峰值迟滞时间约 30 min。

(2) 不同设计暴雨条件下, 随着降雨量增加, 站区积涝程度逐渐加深, 降雨条件与站区致灾程度并非呈线性增长的关系, 而是在 300 a 一遇降雨重现期下趋于稳定, $P < 300$ a 时最高水位的增加量占比为 74.31%, $P = 300 \sim 1\ 000$ a 时占 25.69%。在极端降雨下, 单位时间内最大降雨强度是影响区域最高水位的重要因素。

(3) 随降雨重现期增加, 最高水位变化率存在拐点, 极端暴雨频发, 对于新建城市基础设施, 不应单纯仅考虑其防洪设计标准, 建议因地制宜, 结合区域降雨及其产汇流条件综合考虑其设防水平。

参考文献:

- [1] 谢和平, 许唯临, 刘超, 等. 山区河流水灾害问题及应对[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(3):1-14.
Xie H P, Xu W L, Liu C, et al. Water disasters and their countermeasures in mountains[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3):1-14. (in Chinese)
- [2] 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 广义生态水利的内涵及其过程与维度[J]. 水科学进展, 2020, 31(5):775-792.
Deng M J, Huang Q, Chang J X, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):775-792. (in Chinese)
- [3] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5):713-724.
Xu Z X, Chen H, Ren M F, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):713-724. (in Chinese)
- [4] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7):779-790.
Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7):779-790. (in Chinese)
- [5] 李娜, 张念强, 丁志雄. 我国城市内涝问题分析与对策建议[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(5):77-79, 85.
Li N, Zhang N Q, Ding Z X. Integration green sponge city concept into urban flood management and drainage system [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(5):77-79, 85. (in Chinese)
- [6] 陈燕, 杨杰, 徐家平. 南京极端降水变化对低影响开发设施设计雨量的影响[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4):87-96.
Cheng Y, Yang J, Xu J P. Influence of extreme precipitation changes in Nanjing on design rainfall depth of low impact development [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4):87-96. (in Chinese)
- [7] 李钢, 秦佩瑶, 董志骞, 等. 地震与洪水作用下结构风险分析与设计研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2):237-250.
Li G, Qin P Y, Dong Z Q, et al. Research progress on risk analysis and design for structures under multiple hazards of earthquake and flood [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2):237-250. (in Chinese)
- [8] 张杰, 史培军, 杨静, 等. 北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响:以“7·21”暴雨为例[J]. 地理学报, 2020, 75(1):113-125.
Zhang J, Shi P J, Yang J, et al. The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: A case study of 7.21 rainstorm [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1):113-125. (in Chinese)
- [9] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3):17-22.
Wang Z Y, Yao C, Dong J L, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):17-22. (in Chinese)
- [10] 李亚, 翟国方, 顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, 2016, 23(6):113-122.
Li Y, Zhai G F, Gu F M. Study on interaction mechanism between the rural cooperative economy and rural space: from actor-network theory in Suzhou [J]. Urban Development Studies, 2016, 23(6):113-122. (in Chinese)
- [11] 张珂. 城市极端暴雨及洪涝灾害防控薄弱环节分析与对策[J]. 中国水利, 2021(15):21-23.
Zhang K. Analysis and proposed countermeasures of the weaknesses of prevention and control for extreme rainfall induced urban flooding and waterlogging [J]. China Water Resources, 2021(15):21-23. (in Chinese)
- [12] 郑园园. 高密度人口城市应对极端暴雨的韧性优化分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(9):60-64.

- Zheng Y Y. Analysis of optimizing the resilience of high-density cities in deal with extreme rainstorms [J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(9): 60-64. (in Chinese)
- [13] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7):757-768,778.
Cheng X T, Liu C J, Li C Z, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7):757-768,778. (in Chinese)
- [14] 防洪标准 GB 50201—2014 [S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2014.
- [15] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2):153-165.
Song X M, Zhang J Y, He R M, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese)
- [16] 梁旭东, 夏茹娣, 宝兴华, 等. 2021年7月河南极端暴雨过程概况及多尺度特征初探[J]. *科学通报*, 2022, 67(10):997-1011.
Liang X D, Xia R D, Bao X H, et al. Preliminary investigation on the extreme rainfall event during July 2021 in Henan Province and its multi-scale processes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(10): 997-1011. (in Chinese)
- [17] 李敏, 谢珊, 蒋佳鑫, 等. 武汉市极端暴雨城市内涝风险分析及应对[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(9):46-50.
Li M, Xie S, Jiang J X, et al. Risk analysis and countermeasures on urban waterlogging under extreme rainstorm in Wuhan [J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(9):46-50. (in Chinese)
- [18] 黄国如, 陈易偲, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2):161-170.
Huang G R, Chen Y S, Yao Z J. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2):161-170. (in Chinese)
- [19] 徐宗学, 叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”: 极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(9):12-20.
Xu Z X, Ye C L. From "looking at sea in city" to "looking at river in city": Simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(9):12-20. (in Chinese)
- [20] 黄国如, 李碧琦. 基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 1-6.
Huang G R, Li B Q. Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(1):1-6. (in Chinese)
- [21] 陈长坤, 孙凤琳, 赵冬月. 暴雨灾害下城市基础设施的事故演化风险分析[J]. *灾害学*, 2022, 37(3):12-16,28.
Chen C K, Sun F L, Zhao D Y. Risk analysis of urban infrastructure facilities accident evolution under rainstorm disaster [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(3):12-16,28. (in Chinese)
- [22] 曾国保, 王聪, 姚建华. 城市轨道交通防洪工程建设思路探讨[J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(4):89-94.
Zeng G B, Wang C, Yao J H. Discussion on flood control project construction of urban rail transit [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(4): 89-94. (in Chinese)
- [23] 易嘉伟, 王楠, 千家乐, 等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J]. *地理学报*, 2020, 75(3):497-508.
Yi J W, Wang N, Qian J L, et al. Spatio-temporal responses of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3):497-508. (in Chinese)
- [24] 邵薇薇, 刘家宏, 王开博, 等. 基于情景模拟的城市洪涝交通影响评估[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(10):1591-1605.
Shao W W, Liu J H, Wang K B, et al. Assessment of urban flood impact on traffic flow based on scenario simulations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(10): 1591-1605. (in Chinese)
- [25] 王小杰, 姜仁贵, 解建仓, 等. 西安市汛期降水变化特征及驱动机制研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(2): 138-148.
Wang X J, Jiang R G, Xie J C, et al. Study on the variation characteristics and driving mechanism of precipitation during flood season in Xi'an City [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(2):138-148. (in Chinese)
- [26] 杜颖恩, 侯精明, 柴洁, 等. 西安市极端降雨时间演变特征分析[J]. *环境工程*, 2022, 40(11):41-46.
Du Y E, Hou J M, Chai J, et al. Temporal variation characteristics of precipitation extremes in Xi'an [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(11): 41-46. (in Chinese)
- [27] 宋利祥, 徐宗学. 城市暴雨内涝水文水动力耦合模型

- 研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5):581-587.
- Song L X, Xu Z X. Coupled hydrologic-hydrodynamic model for urban rainstorm water logging simulation: recent advances[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 581-587. (in Chinese)
- [28] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3):40-49.
- Hou J M, Wang R, Li G D, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese)
- [29] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820-828.
- Hou J M, Guo K H, Wang Z L, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese)
- [30] 栾广学, 侯精明, 王添等. 基于复杂高密度管网结构优化技术的银川城区排水过程高效模拟方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(3):205-212.
- Luan G X, Hou J M, Wang T, et al. Efficient simulation method of urban drainage process based on structure optimization technology of complex high-density pipe network[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):205-212. (in Chinese)
- [31] 杨东, 侯精明, 李丙尧, 等. 无资料城区管网排水过程概化模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3):139-144.
- Yang D, Hou J M, Li B Y, et al. Generalized simulation of drainage process in urban networks without data[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3):139-144. (in Chinese)
- [32] DL/T 5056—2007, 变电站总布置设计技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007.
- [33] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
- Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese)
- [34] 张霓, 杨淑慧, 綦中跃, 等. 变电站项目水影响评价报告中防洪及内涝分析[J]. 北京水务, 2020(1): 12-16.
- Zhang N, Yang S H, Qi Z Y, et al. Analysis on flood control and waterlogging in water impact assessment report of substation project[J]. Beijing Water, 2020(1): 12-16. (in Chinese)
- [35] Chethika A, Amila J, Kalpana H N, et al. An innovative approach to assess the impact of urban flooding: Modeling transportation system failure due to urban flooding[J]. Applied Geography, 2022, 147(10): 1-14.

(本文编辑: 苏泽云)