

陶冶, 罗苑萍, 曾庆彬, 等. 场次暴雨情景下变电站地下排水性能的有效评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 263-273. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.020

TAO Ye, LUO Yuanping, ZENG Qingbing, et al. Effective evaluation of underground drainage performance in substations under episodic heavy rainfall scenarios [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 263-273. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.020

场次暴雨情景下变电站地下排水性能的有效评估

陶 冶¹, 罗苑萍¹, 曾庆彬², 梁伟强², 陈江洪¹, 胡立堂³

(1. 广东电网有限责任公司揭阳供电局, 广东 揭阳 510000; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510700; 3. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要:【目的】完善的地下排水系统对于提升暴雨情景下变电站地下管网的排水能力和确保电力设施的安全运行具有重要意义。【方法】以广东省揭阳市某待建变电站为研究区, 设计了一种新的地下排水系统, 并提出了“圆管模型”和渗流模型耦合模拟的等效渗透系数方法, 构建了应对场次暴雨情景的地下管网排水效果评价数值模型。通过对变电站建设前的地下水调查数据进行参数校准, 评估了新排水系统在6种暴雨情景下的排水流量、地下水位动态变化以及积水区的时空分布特征。【结果】结果表明: 新的地下排水系统能够有效排水并降低管网周边的地下水位。暴雨后变电站核心区的地下水位变化呈现缓慢上升和缓慢下降的趋势, 而周边地下水位则表现出快速上升和快速下降的规律。在50 a一遇和100 a一遇的小时和分钟暴雨情景下, 新地下排水系统表现出优良的性能, 不会出现积水现象; 然而, 研究区西南侧出现明显积水, 且持续7 d的暴雨所形成的积水在4 d后方可消退。【结论】基于等效渗透系数方法模拟的场次暴雨情景下新的地下排水系统排水能力较好, 可为变电站排水管网排水能力的评估及优化设计提供一种有效手段。

关键词: 排水管网; 数值模拟; 暴雨情景; 地下水; 变电站; 等效渗透系数法

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.020

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU99

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0263-11



与作者互动
听语音 | 聊科研

Effective evaluation of underground drainage performance in substations under episodic heavy rainfall scenarios

TAO Ye¹, LUO Yuanping¹, ZENG Qingbing², LIANG Weiqiang², CHEN Jianghong¹, HU Litang³

(1. Jieyang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jieyang 510000, Guangdong, China; 2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, Guangdong, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] A well-developed underground drainage system is crucial for enhancing the drainage capacity of

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-07-14; 录用日期: 2024-08-07; 网络出版日期: 2024-10-15

基金项目: 清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院专项统筹重点项目(SKL-IOW-2023TC2307); 国家自然科学基金核技术创新联合基金项目(U2167211); 广东揭阳惠来园区输变电工程项目(0352004823220005)

作者简介: 陶 冶(1988—), 男, 工程师, 学士, 研究方向为电网基建工程管理。E-mail: 19587442470@163.com

通信作者: 曾庆彬(1993—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为智能电网规划与运行控制。E-mail: 17624052757@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

underground pipeline networks in substations under heavy rainfall scenarios and ensuring the safe operation of power facilities. [Methods] Taking a planned substation in Jieyang City, Guangdong Province, as the study area, a new underground drainage system was designed. An equivalent permeability coefficient method, coupling the “circular pipe model” and the seepage model, was proposed. A numerical model was established to evaluate the drainage performance of the underground pipe network under episodic heavy rainfall scenarios. By calibrating parameters using groundwater survey data before the construction of the substation, the drainage flow, groundwater level dynamics, and the spatiotemporal distribution characteristics of water accumulation areas under six heavy rainfall scenarios were assessed. [Results] The result showed that the new underground drainage system could effectively drain water and reduce groundwater levels around the pipeline network. After heavy rainfall, the groundwater level in the core area of the substation exhibited a trend of gradual rise and slow decline, while the surrounding groundwater levels demonstrated a pattern of rapid rise and rapid decline. Under the 50-year and 100-year return period hourly and minute-scale heavy rainfall scenarios, the new underground drainage system exhibited excellent performance, with no water accumulation. However, under daily-scale heavy rainfall scenarios of the same return periods, significant water accumulation occurred in the southwestern part of the study area, and the accumulated water from a continuous 7-day rainfall event took 4 days to recede. [Conclusion] The new underground drainage system, simulated using the equivalent permeability coefficient method under episodic heavy rainfall scenarios, demonstrates good drainage capacity, which provides an effective approach for evaluating and optimizing the drainage capacity of substation drainage networks.

Keywords: drainage network; numerical simulation; heavy rainfall scenarios; groundwater; substation; equivalent permeability coefficient method

0 引言

变电站作为电力系统中关键的基础设施,不仅确保了电能转换的效率和质量,还在电网建设和能源管理中扮演着至关重要的角色。随着我国经济的快速发展和电力需求的不断增加,变电站行业迎来了前所未有的发展机遇,逐渐实现了高效、安全、智能化的发展。然而,变电站行业的发展也面临诸多挑战,尤其是在排水系统的设计与应用方面。排水系统的优化对于确保电力设施的安全运行至关重要,特别是在遭遇极端天气时,它能有效防止由于地基水分饱和度上升而引发的结构稳定性问题^[1]。

有效的排水系统设计需要综合考虑降雨量、地形、土壤条件等多种因素,从而确保变电站在恶劣天气条件下仍能安全稳定地运行^[2-4]。目前,我国变电站排水系统主要采用地表排水、沟渠排水和泵站排水等方式,但这些系统往往存在一定的局限性,例如维护成本高、适应性差和易受极端天气影响等^[5]。因此,未来变电站排水系统的设计与施工需要更多地考虑技术进步、网络安全以及更精细的水文分析,通过采用更先进的排水技术和管理方法,如地下排水系统、排水井、渗透井或绿色基础设施等,以提高排水系统的整体性能和可靠性^[6]。在变电站的排水设计中,需要特别注意的是在基础建设过程中对地基土层的破坏,尤其是在软土地区,工程操作需要考虑土壤的物理特性和环境条件的多样性^[7]。此外,变电站

排水系统的维护管理也需要适应现代化的发展,防止由于设备老化或故障引发的排水问题^[8]。

变电站雨水排水系统主要收集站区地面及屋面雨水、电缆沟积水等,降雨经雨水口由雨水管道汇集后,经排水系统排出站外,确保站区降雨时不积水,保证变电站正常运行。姚晗等^[9]将“海绵城市”理念引入变电站排水设计当中,结合某变电站水文气象条件及地形地势对变电站站区内排水设计进行优化,简化了变电站原有排水设计,通过对场区地面和设施的改造,使其形成具备吸水、保水、渗水、透水、排水功能于一体的场区地坪,同时满足站区排水及地下水涵养的要求。陈敬佑等^[10]优化设计了干旱地区变电站排水系统,减小了对排水系统工程量的浪费。对于排水系统的模拟研究多采用数值模拟的方法,魏书仪等^[11]提出了基于“管-涵-河”的多级排水系统改造方案,采用开源模型 SWMM 和 FVCOM 进行二维水文水动力耦合建模,模拟分析研究区改造前后的管网溢流和内涝积水情况。卢兴超等^[12]构建了基于 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型的水文水动力耦合模型,模拟分析了暴雨内涝的时空变化过程。刘浚泉等^[13]通过分析城市社区内涝灾害特点,构建了基于微排水-小排水-大排水的社区洪水排放模式。ZHAI 等^[14]分析了变电站设计参数与供水排水结构的数量和成本之间的联系,构建了一个影响数量因素的层次结构模型,并提取了影响数量的关键参数。变电站地下排水系统的评价需要综合考虑地下结构与参数取

值、降雨条件和排水管网系统, 由于涉及的参数较多, 通常采用数值模拟方法进行评价^[15-17]。李彦鑫等^[18]利用 COMSOL 软件针对室内砂槽物理模型, 模拟了在不同水位和暗管埋设条件下的水流迁移和盐分运移。钱争等^[19]应用 RZWQM2 模型模拟了不同排水暗管布置方案和控制排水方案对葵花种植区地下水位、排水量及作物产量的影响。ABDEL-MAGEED 等^[20]研究了埃及伊布山地区地下排水系统对作物产量、盐分含量和地下水埋深的影响。这类应用于农田水利的暗管排水研究, 主要关注土壤层饱和-非饱和水流和盐分在不同地下水水位控制条件下的变化, 讨论的重点是暗管埋深和间距等参数。排水系统评价一直是城市排水和防涝的重要工作^[21], 其中地下排水量是关注的重点^[22], 其主要方法是基于水力学计算管网的连通性和流量。变电站排水量变化的主要外因是降雨量, 其地下排水既不同于盐渍化地区的暗管排水, 也不同于市政或海绵城市的工程排水。现行的变电站地下排水工程案例很少, 对管网流动和地下渗流耦合过程考虑不足, 因此需要建立专门的排水性能评价方法。

本文以广东省揭阳市某待建变电站为研究区, 针对变电站排水的实际需求, 设计了适应性的排水管网系统, 提出了“圆管模型”和渗流模型耦合模拟的等效渗透系数方法, 构建了应对场次暴雨情景下地下管网排水的数值模型, 并对多情景排水效果进行了探讨。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省揭阳市某地, 规划建设一座变电站及其配套设施, 占地面积约为 3 000 m²。该区域位于冲积平原, 属于河口三角洲的沉积地形, 地面高

程为 1.00~1.50 m, 地表相对平坦。场地气候属于亚热带季风气候类型, 多年平均气温为 21.4 ℃; 多年平均降雨量为 1 723.0 mm, 年最大降雨量达到 2 582.6 mm, 年最小降雨量为 1 260.6 mm; 多年平均水面蒸发量为 1 478.1 mm。年内集中暴雨的主要时间段为 4—9 月, 平均每月发生一次暴雨。前汛期(4—6 月)主要以锋面雨和低槽雨为主, 而后汛期(7—9 月)则以台风雨为主。全年 4 月—9 月的降雨量相对较高, 其中 4—5 月和 10—11 月通常为水位平稳期, 6—9 月则为水位较高的丰水期, 而 12 月—次年 3 月则为水位较低的枯水期。年最大洪水发生在上述几个月的概率高达 84.3%。

场区内存在孔隙水和基岩裂隙水。浅层地下水主要由大气降雨补给, 并通过蒸发和下渗进行水量排泄, 其水位随季节变化, 年波动范围为 1.0~2.0 m。由于上覆隔水层的存在, 深层地下水补给和排泄作用较弱, 呈现出轻微的承压状态。基岩裂隙水则储存在岩层裂隙中, 其水量富集程度受裂隙发育程度和补给条件的影响。由于排水不畅, 目前研究区附近的电站出现了地面沉降变形现象, 如图 1 所示。根据地区经验和勘探孔资料分析结果, 裂隙中的水量普遍较少, 研究区的地下水位埋深为 1.8~2.2 m。

1.2 地下排水设计与性能评价模型

变电站排水系统的设计旨在构建一个高效的地下排水管网, 利用其优良的排水能力, 将地下渗流水有效排入市政管网。主要的风险点在于, 当降雨强度超过地表介质的吸水能力或者地下水溢出地面时, 地表可能形成一定深度的积水。因此, 排水效果的检测模型主要集中于地下水的渗流过程, 即构建一个有效的地下水流动数值模型。该排水系统设计包括全透水型的排水井、排水沟和管道(见图 2), 设计中必备的透水井壁能够保持大流量通过。全透水型排水井由透



(a) 变形区1



(b) 变形区2

图 1 研究区附近地面沉降变形状况

Fig. 1 Ground subsidence deformation near study area

水井壁、透水井盖、透水柱和排水通道构成,其最大设计深度约为 2.5 m。排水系统通过雨水口收集雨水,经由直径为 300 mm 的管道输送,并最终排入市政雨水管网。系统中还配备了若干检查井,以便于维护。具体排水管网布置如图 3 所示。

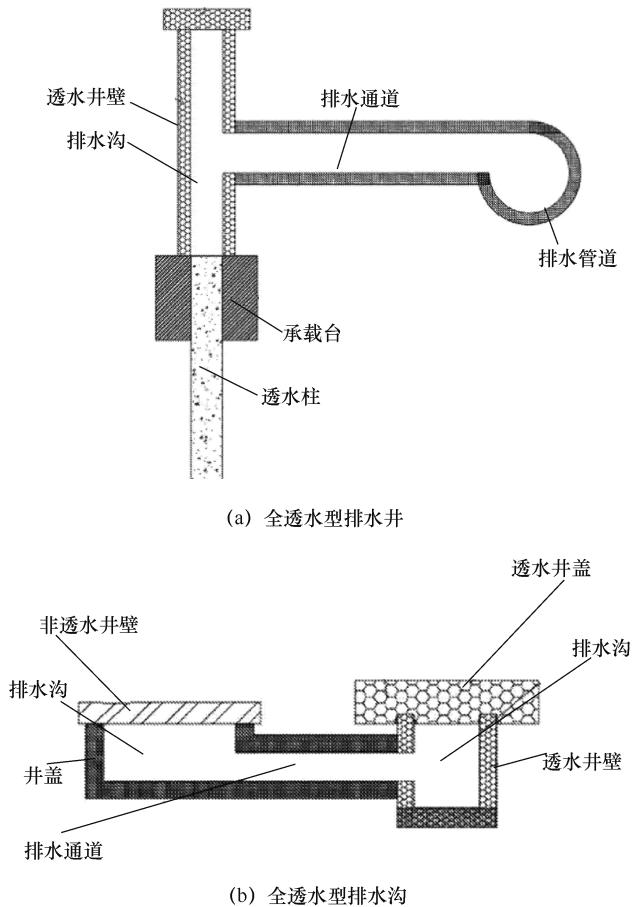


图 2 新型排水井和排水沟示意

Fig. 2 Schematic diagram of new drainage wells and ditches

研究区地下水的流向为自东南向西北(如图 3)。为了合理模拟变电站与周边地下水的互动,模型的模拟范围围绕核心场地向外扩展了 30 m,模拟区的面积约为 13 552 m²。依据含水层分布及边界地下水流动的特点,模型的东南侧设置为接受地下径流补给的边界,西北侧则设为地下径流排泄的边界;其余的外围边界被设定为默认边界(即零流量边界)。根据初步勘测的结果,地层呈现分层特性,因此模型被简化为一个三维的多层含水层结构,模型的顶部接受大气降雨的入渗补给,底部则以未风化的花岗岩为阻水层。模型关注的地下水垂直深度约为 50 m。地下水的主要补给来源为降雨,通过上层较为透水的填土层向下渗透。研究区域从西北部接收侧向流入的地下水,而场地本身没有地下水开采活

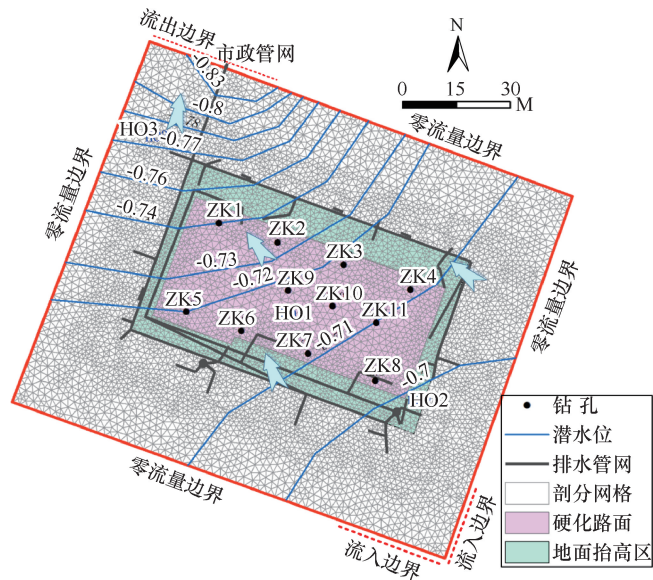


图 3 研究区钻孔和排水管网分布(单位: m)

Fig. 3 Distribution of boreholes and drainage networks in study area (Unit: m)

动。地下水的主要排泄方式是通过径流向西北方向流出。该研究区的地下水系统处于一个天然的平衡状态,在多年平均条件下,地下水流呈稳定状态。因此,排水效果检测模型被概化为一个非均质、各向异性的地下水三维稳定流动数值模型。该模型采用商业软件 FEFLOW^[23] 创建而成,模型的参数识别基于未建变电站的监测数据,并通过模拟不同降雨条件来检测排水能力。

1.3 排水管网模拟方法

排水系统范围的渗透系数大于周边区域,模型采用等效渗透系数法^[24-25]进行排水管网的模拟,将市政管网设置为排泄水位边界条件。渗流-管流耦合模型的思想由陈崇希等^[26]提出,其思想是为非达西流的管流根据水力学计算出圆管渗流的等效渗透系数,从而将管流方程与地下渗流的方程统一起来。在水-盐运移中应用发现,合适的等效渗透系数可简化并较准确地模拟地下水的运移过程^[27],在裂隙和管道中也有相关等效渗透系数法的综述^[28-29]。等效渗透系数方法是基于达西定律而言的,通过考虑实际的地下排水系统条件,如排水管道的布局和尺寸、流动液体的黏滞系数和密度等参数,综合考虑后得到的一个代表性的渗透系数值。市政管网的排水量是先给定已知排泄水位边界条件并采用达西定律进行计算。层流条件下圆管的渗透系数计算公式如下

$$K = \frac{d^2}{32} \times \frac{\gamma}{\mu} \quad (1)$$

式中, d 为圆管的内直径(m); μ 为液体的黏滞动力系数 [$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$]; γ 为液体的重率 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)。

根据常温常压条件下水的密度和黏滞运动系数参数, 可估算出直径 300 mm 的管网对应的渗透系数设置为 $8.9 \times 10^6 \text{ m/d}$ 。

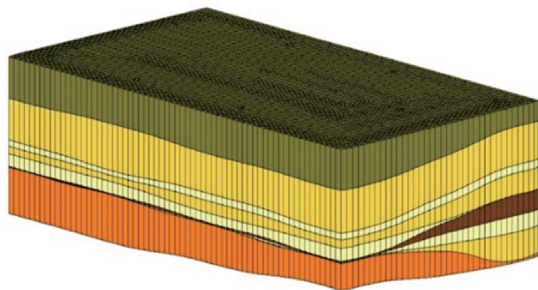
1.4 积水的模拟方法

在水文学中, 地表积水机理包括超渗产流和蓄满产流两种^[30], 本研究针对的是蓄满产流。变电站修建之前, 地下水位埋深在 1.8 m 以内。变电站修建后, 变电站建设范围地面标高增加至 4.8 m, 同时变电站建设区地面硬化使得渗透系数和降雨入渗补给系数降低。在高降雨强度入渗补给情景下, 区域地下水位会逐渐上升并超出地表^[31], 在模型中有 2 种处理办法, 即将地表高程作为或不作为地下水位约束条件。考虑了积水的判别, 本研究在构建模型中对地下水位超高地表不作约束, 将地下水位高出地面高程处描述为积水区。

2 模型构建

2.1 地层结构和参数

利用区内 11 眼钻孔岩心记录数据, 构建了研究区三维层状地质结构模型。不同岩性呈现较均匀的层状分布, 部分地段粉细砂层厚度较小。模型分为 12 个模拟层, 与实际钻孔岩性分布一致, 分别对应为填土层、淤泥质土(夹砂和植物根系)、中粗砂、粉质黏土、粗砂、粉细砂、粉质黏土、粗砂、砂质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩(见图 4)。垂向上不同含水层岩性差异导致含水层水文地质参数不同, 因此含水层被概化为非均质各向同性介质。根据岩性经验渗透系数, 进行垂向分区并赋初始参数。



(a) 三维地质结构模型

2.2 排水管网和变电站建立前后的参数设置

变电站建成后, 核心区域高程变为 4.8 m, 外围区域高程变为 4.5 m, 变电站周边范围的地面高程不变。因此, 在变电站建成以后地下水流模型时, 将考虑这种高程变化。其次, 变电站建成以后, 核心区域由于路面硬化导致地下水下渗能力减弱, 渗透系数和入渗补给系数相比于建站之前将减小, 模拟范围内其他地区的渗透系数和入渗补给系数不变, 渗透系数仍为初始值, 入渗补给系数为初始设置的 0.2。

2.3 源汇项

由研究区水文地质条件, 研究区内地下水补给来源主要为上部均匀大气降雨入渗补给, 收集多年降雨数据, 计算得到多年平均降雨数据, 单位网格的降雨入渗速率由下式得出

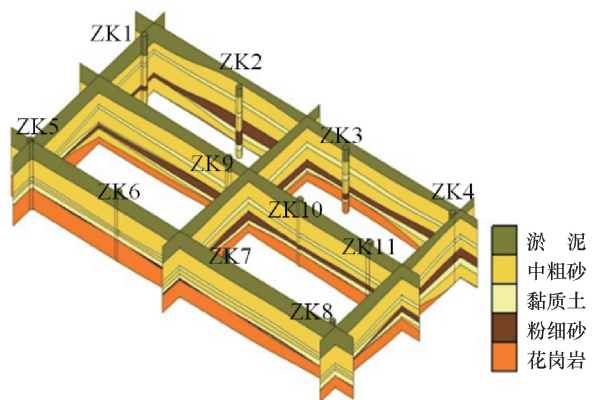
$$\theta = \alpha \times P \quad (2)$$

式中, θ 为单位网格的降雨入渗补给速率(m/d); α 为降雨入渗补给系数, 取 0.2; P 为计算得到的平均降雨量(m/d)。

根据公式可得, 当年降雨量为 1 804.0 mm 时, 入渗补给地下水的强度为 1.0 mm/d。

2.4 模型参数识别

平面上, 将模拟正离散为 6 832 个结点, 13 430 个单元。根据水文地质概念模型, 模拟变电站建立前的地下水稳定流场作为初始条件(见图 3), 调整各分层渗透系数取值。11 眼统测井模拟水位和实测水位之间的对比如图 5 所示, 模拟水位与实测水位相近, 模拟相对误差在 3.0% ~ 17.0%, 与实测水位相比, 模拟水位更加平缓, 观测水位的突然升高(ZK6)或降低(ZK10)可能与测量误差或局部非均质介质有关。模拟流场基本反映了变电站建立前地下水流场变化特



(b) 三维地质结构剖面

图 4 变电站范围岩性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of lithology in substation area

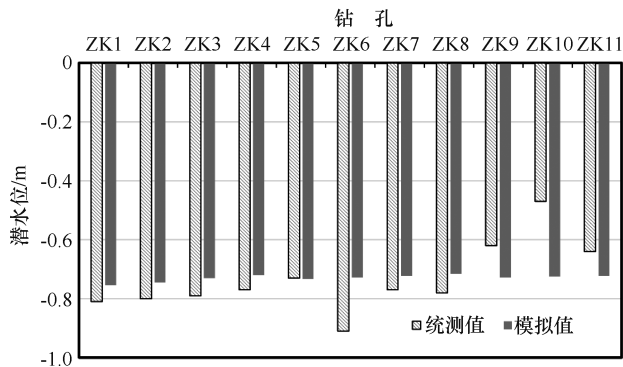


图5 典型观测井统测和模拟地下水水位对比

Fig. 5 Comparison of measured and simulated groundwater levels in typical observation wells

征。经识别后填土层、淤泥质土、中粗砂、粉质黏土、粗砂、粉细砂、粉质黏土、粗砂、砂质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩层的渗透系数分别为 0.5 m/d、0.4 m/d、34.6 m/d、1.3 m/d、36.6 m/d、8.6 m/d、0.9 m/d、17.3 m/d、0.3 m/d、2.6 m/d、0.6 m/d、0.3 m/d。

2.5 不同暴雨强度下的模拟情景设置

为判断极端降雨事件下的变电站排水效果，按 50 a 一遇和 100 a 一遇的暴雨频率两种情景考虑，降雨量按照《水文学手册》^[32] 和城市暴雨强度计算相关文献^[33] 计算。根据所搜集的历史最大日降雨量、最大小时降雨量和最大 10 min 降雨量的资料，考虑天、小时和 10 min 三种时间尺度。因此共设计 6 种情景（见表 1），分别表示为 S11、S21、S31、S41、S51 和 S61 情景。S11、S21 和 S31 表示 50 a 一遇情景，降雨量分别为 386.6 mm/d（持续 7 d）、99.3 mm/h（持续 8 h）、3.7 mm/min（持续 60 min）。S41、S51 和 S61 表示 100 a 一遇情景，降雨量分别为 422.3 mm/d（持续 7 d）、108.4 mm/h（持续 8 h）、4.1 mm/min（持续 60 min）。为充分考虑降雨之后地下水位变化的全过程，每个情景模拟 90 d，以说明排水管网对突发降雨事件的应对能力。

表 1 不同暴雨条件的模拟情景设置

Table 1 Simulation scenario settings for different heavy rainfall scenarios

方案名	降雨条件
S11	50 a 一遇情景，日降雨量 386.6 mm，持续 7 d
S21	50 a 一遇情景，小时降雨量 99.3 mm，持续 8 h
S31	50 a 一遇情景，10min 降雨量 37.1 mm，持续 60 min
S41	100 a 一遇情景，日降雨量 422.3 mm，持续 7 d
S51	100 a 一遇情景，小时降雨量 108.4 mm，持续 8 h
S61	100 a 一遇情景，10 min 降雨量 40.5 mm，持续 60 min

3 结果分析

3.1 排泄水量和地下水位的变化规律

利用已建立的地下水数值模型，分别计算了不同降雨情景下地下水向市政管网断面的排泄水量，分别用点和线表示不同情景下排水流量的变化过程（见图 6）。在 50 a 和 100 a 一遇的不同降雨情景下，排水量在 193.0~277.0 m³/d 之间。不同尺度的排水量依次为：日尺度、小时尺度和分钟尺度。此外，100 a 一遇降雨情景模拟的排泄水量普遍高于同时间尺度下的 50 a 一遇降雨情景模拟值。在日尺度降雨情景下，排泄量峰值出现在强降雨后的第 7 天，随后缓慢下降；在小时尺度降雨情景下，排泄量峰值出现于强降雨后的第 8 小时，随后迅速下降；在分钟尺度降雨情景下，排泄量峰值出现在强降雨后的第 60 分钟，随后快速下降。通过计算不同情景下最大排水流量与最大流量到达时间对应的总降雨量的比值，可以得出 S11、S21、S31、S41、S51 和 S61 对应的排水流量与总降雨量的比值分别为 0.1、0.3、0.9、0.1、0.3 和 0.9。结果表明，降雨强度越大，对应的排水流量越大；同时，50 a 一遇和 100 a 一遇的降雨频率对应的排水流量比值近似相等。

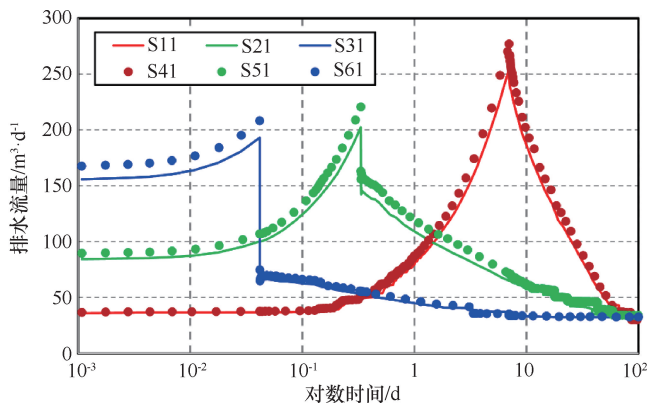


图 6 6 种情景下排泄流量随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of discharge flow over time under 6 scenarios

为进一步展示不同情景下不同区域的地下水位变化，从图 2 中选择了 HO1、HO2 和 HO3 观测井位置，分别代表变电站硬化路面、变电站周边远离市政管网和变电站周边近市政管网的位置。三个观测点位的地下水位随时间的变化曲线如图 7 所示。在不同点位和情景下，地下水位变化规律总体一致，均表现为先上升再下降。HO2 孔水位上升幅度最大，HO3 孔次之，HO1 孔的上升幅度最小。值得注意的是，HO1 孔的

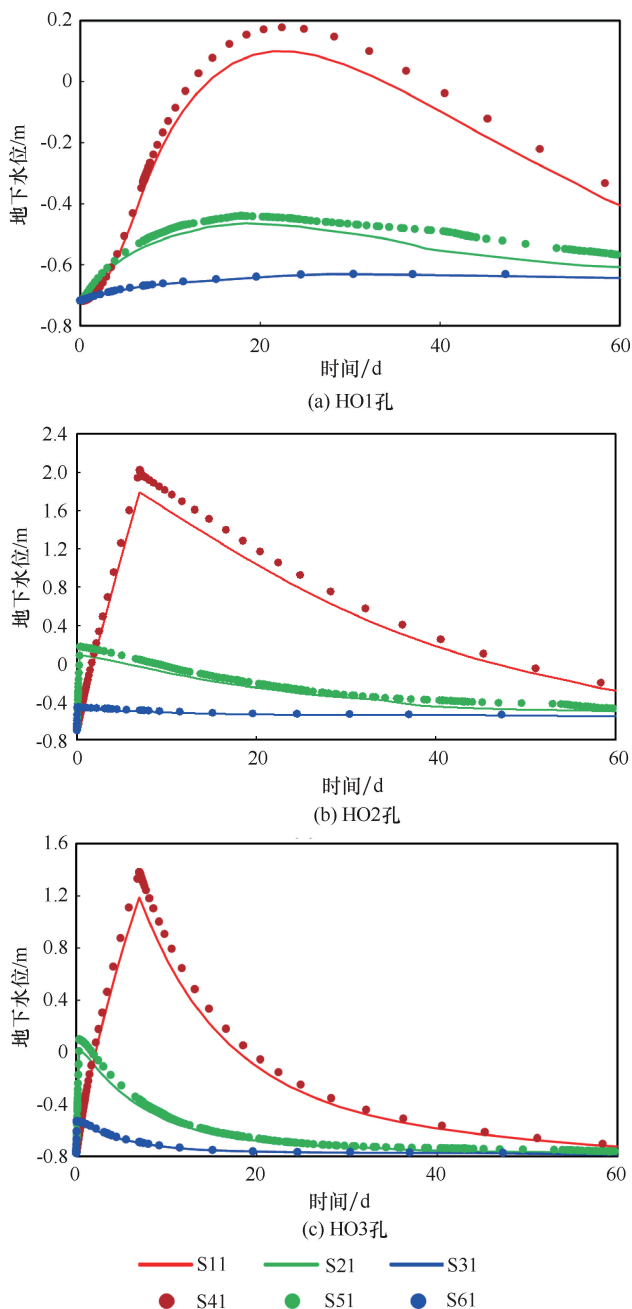


图7 不同情景下典型位置地下水位变化曲线

Fig. 7 Variation curves of groundwater levels at typical locations under different scenarios

地下水位上升和下降趋势较为缓慢, 而 HO2 孔和 HO3 孔的地下水位变化梯度较大。分析其原因, HO1 所在的硬化路面区域接受的降雨入渗补给量较少, 因此其地下水位主要受到侧向径流的影响, 而直接受降雨入渗的影响较小。相对而言, HO2 和 HO3 孔的地下水位则直接受到降雨入渗补给强度的影响。值得注意的是, 在 6 组情景下, 三个观测井的地下水位最高值均未超过 2.0 m。相比变电站的地面标高 4.8 m, 地面未达到积水的条件。

3.2 变电站排水的危险区分布

由上述分析可知, 区域最高地下水位出现在持续降雨时段结束时。因此, 我们从模拟中提取了 6 种降雨情景下的最高地下水位空间分布数据, 并绘制了地下水位埋深分布图(见图 8)。地下水位埋深被划分为三个区间: 小于 0.3 m、0.3~1.5 m、大于 1.5 m, 其中小于 0.3 m 的区间包括地下水位高于地表高程的情况。从结果可以看出, 对于 50 a 一遇和 100 a 一遇的分钟时间尺度降雨情景, 地下水位埋深均大于 1.5 m, 这表明排水系统是通畅的; 对于 50 a 一遇和 100 a 一遇的小时时间尺度降雨情景, 在变电站核心区地下水位埋深大于 1.5 m, 而在外围区域, 地下水位埋深在 0.3~1.5 m 之间; 对于日时间尺度的降雨情景, 在变电站外围区域, 地下水位埋深普遍小于 0.3 m, 因此可能会危及变电站的安全。值得注意的是, 对于 S11 和 S41 情景, 由于排水管网不仅疏导了变电站厂内的地下径流, 还降低了变电站周边的地下水位, 因此排水管网附近的地下水位埋深较大。

3.3 不同时间的积水点分布

在日时间尺度的降雨情景下, 模拟区域内存在地下水位浅埋区, 当地下水位高于地面高程时, 会出现积水点。为进一步分析不同时间点积水区域的空间分布, 选择了 S11 情景, 并统计了积水点在第 5.5 天、7.0 天、8.0 天、8.5 天、9.0 天和 10.0 天时的空间分布情况, 如图 9 所示。从积水点的分布情况来看, 在变电站的核心区域(地面标高为 4.8 m)未发现积水现象。然而, 在核心区域的外围, 尤其是变电站西南侧, 存在明显的积水区域, 西北侧也有局部地区出现积水。从积水点分布的演化情况来看, 西南侧是最先出现积水点的区域; 在持续降雨到第 7 天时, 积水点达到最多, 主要分布在西南和西北侧; 在第 8 天时, 西北侧的积水点迅速减少; 在第 9 天时, 仅存在西南侧积水点; 在第 10 天时, 仅在西南侧局部区域存在积水点; 而在第 11 天时, 未发现积水点。因此, 当降雨强度为 50 a 一遇(386.8 mm/d)且持续 7 d 时, 积水点在降雨结束后的第 4 天才能完全消除。结合图 7 所示, 地下水位完全恢复到降雨初期水平至少需要 60 d 的时间。因此, 在进行排水管理时, 应重点关注这些积水区, 并在这些关键区域布设排水管网。此外, 还需定期检查变电站外流入市政排水系统的运行情况, 以确保排水通畅无阻。

4 结果讨论

变电站地下排水系统相较于地表、沟渠和泵站排水

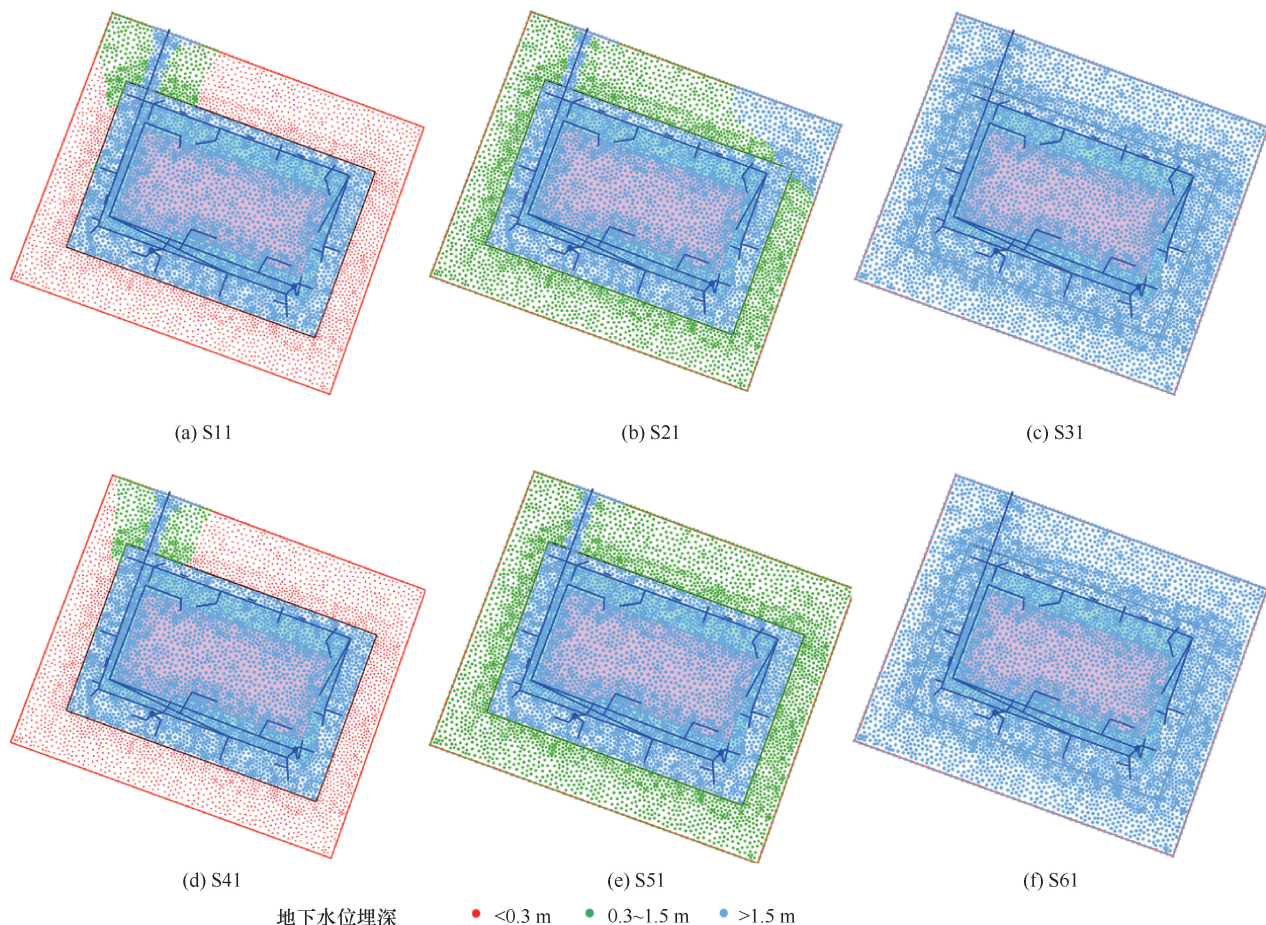


图 8 不同情景下地下水水位最高时地下水埋深分区对比

Fig. 8 Comparison of groundwater depth zoning at maximum groundwater levels under different scenarios

方式有较好的优势。对于研究区来说, 地下结构是不能改变的, 而降雨条件是外因, 排水管网的设计是影响地下排水性能的重要因素。本研究提出了全透水型的排水井、排水沟和管道集成的地下排水系统。考虑到管网流速较大, 而地下径流一般流速较慢, 研究采用了耦合渗流和管流模拟的等效渗透系数方法, 采用水力学方法计算了圆管的等效渗透系数。

所构建的数值模型依赖于已有的地质勘察基础和地下水位动态监测数据。由于地质构造存在非均质性和降雨的不确定性, 模拟结果存在一定的不确定性。首先, 水文地质参数的不确定性也影响了结果的准确性。本研究主要采用了钻探确定岩性的经验参数, 但未进行相关的抽水试验以确定参数, 这使得局部透镜体的非均质性可能影响排水能力的准确估算。其次, 基于场次降雨条件下的地下水位动态响应尚缺乏监测, 而暴雨条件下地下水动态变化数据是项目正在进行的工作。最后, 由于厂区附近缺乏地下水位监测数据, 地下水侧向径流的估计可

能存在一定的误差。

场次暴雨和模拟情景考虑了研究区历史记录的最大 10 min 降雨量、最大小时降雨量和最大日降水量, 在实际应用中需要根据已有的降雨过程线给出暴雨数据。从模拟结果看, 降雨强度和持续时间是影响区域排水流量的关键因素。排水流量随着持续降雨而增加, 但排水流量和地下水位的下降取决于地质条件和设计的管网。从变电站排水管理的角度, 可以选择典型观测井(见图 3 中的 HO1、HO2 和 HO3)进行强降雨期间的地下水位动态监测, 利用地下水流数值模型和雨情信息动态计算排水流量和地下水位变化, 从而预先制定必要的排水措施。

5 结论

以广东省揭阳市某待建变电站为研究区, 设计了排水系统, 采用“圆管模型”描述了排水管网及全渗透排水井的渗透系数, 构建了基于等效渗透系数方法的数值模型, 并对地下排水性能进行了分析。得到的主要结论如下。

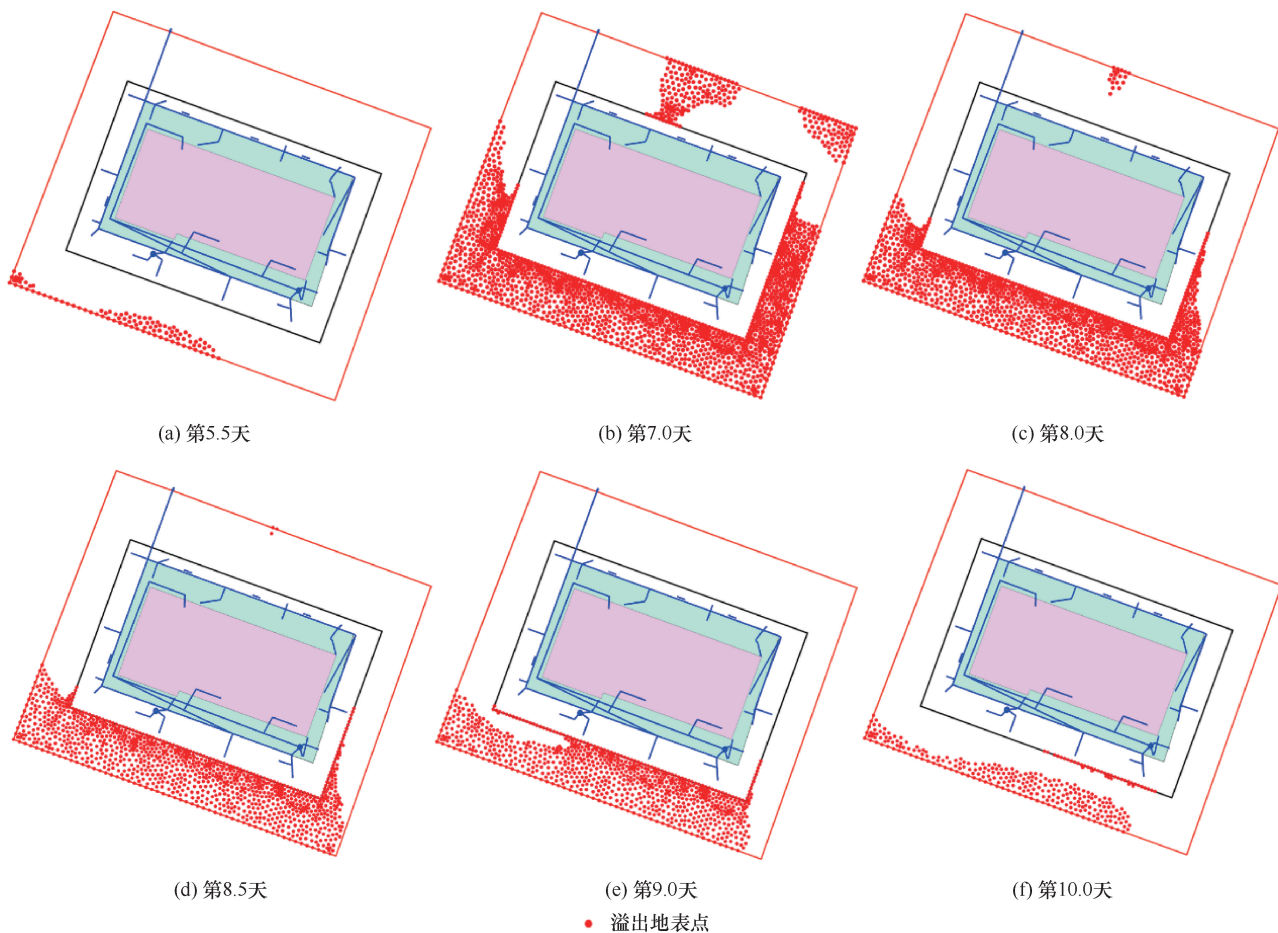


图9 50 a一遇日降雨情景下不同时间的积水点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of waterlogging points at different times under a 50-year return period daily rainfall scenario

(1) 采用等效渗透系数方法构建的模拟场次暴雨情景下地下排水能力的地下水数值模型具有良好的适用性和可靠性, 模拟的观测井水位与实际观测的水位相对误差在 3.0%~17.0%。

(2) 所设计的新型排水系统, 能够有效发挥作用。面对 50 a 一遇和 100 a 一遇的小时和分钟尺度暴雨情景下, 排水管网不会出现积水; 而在天尺度暴雨情景下, 西南区明显出现积水, 积水区约在第 4 天后消失。

(3) 路面硬化将减缓地下水位对降雨的响应速率, 地下水位恢复到降雨前的水平仍需要约 2 个月的时间。

本研究表明通过“等效渗透系数”把渗流与排水管网耦合起来模拟变电站的地下排水性能, 是一种简单而又有效的方法, 对优化变电站地下排水系统的布局和设计, 提高变电站在极端天气条件下的排水性能和稳定性, 保障其长期安全运行具有重要的指导意义和应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 周刚, 徐伟, 陈刚, 等. 变电站智能排水系统的研制[J]. 华东电力, 2013, 41(7): 1555-1557.
ZHOU G, XU W, CHEN G, et al. Development of substation smart drainage system [J]. East China Electric Power, 2013, 41(7): 1555-1557.
- [2] 李新海, 曾令诚, 刘文平, 等. 变电站微机控制强排水控制系统研究与应用[J]. 电工电气, 2021(12): 36-39.
LI X H, ZENG L C, LIU W P, et al. Research and application of microcomputer controlled forced drainage control system for substation [J]. Electrotechnics Electric, 2021(12): 36-39.
- [3] KHODR H M, SALLOUM G A, SARAIVA J T, et al. Design of grounding systems in substations using a mixed-integer linear programming formulation [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(1): 126-133.
- [4] 鲁佳慧, 刘家宏, 刘创, 等. 城市排水系统韧性评估研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 1-10.
LU J H, LIU J H, LIU C, et al. Research progress on urban drainage system resilience evaluation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 1-10.

- [5] 彭李斌. 变电站给排水系统设计探讨[J]. 建筑监督检测与造价, 2019, 12(3): 54-55.
PENG L B. Design of substation water supply and drainage system [J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2019, 12(3): 54-55.
- [6] 高旭浩. 绿色智能变电站给排水系统优化设计技术措施研究[J]. 科技与企业, 2013(24): 217.
GAO X H. Research on optimized design techniques of green intelligent substation water supply and drainage system [J]. Science and Technology and Enterprises, 2013(24): 217.
- [7] 袁巧云. 变电站地基沉降分析及不良地基处理措施研究[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(5): 129-130.
YUAN Q Y. Study on settlement measures analysis and bad foundation of substation foundation treatment [J]. Building Technology Development, 2016, 43(5): 129-130.
- [8] 李晨, 陈芸, 马斌, 等. 电力系统中排水泵控制系统的智能化探究[J]. 科技与创新, 2019, 23: 88-89.
LI C, CHEN Y, MA B, et al. Exploration of intelligent control systems for drainage pumps in electrical power systems [J]. Science and Technology & Innovation, 2019, 23: 88-29.
- [9] 姚晗, 陈晨, 姚若夫. 基于“海绵城市”理念对某变电站排水系统的优化设计[C] //中国电力规划设计协会. 2016年供用电设计技术交流会. 北京: 中国电力规划设计协会, 2016: 969-972.
YAO H, CHEN C, YAO R F. Optimized design of a substation drainage system based on the “Sponge City” concept [C] //China electric power planning and design association. Technical exchange meeting on power supply and design technology. Beijing: China electric power planning and design association, 2016: 969-972.
- [10] 陈敬佑. 干旱地区变电站排水系统的优化设计[J]. 云南电业, 2015(6): 39-40.
CHEN J Y. Optimized design of drainage systems for substations in arid regions [J]. Yunnan Electric Power, 2015(6): 39-40.
- [11] 魏书仪, 刘非, 袁绍春, 等. 基于 SWMM 和 FVCOM 模型的城市多级排水系统改造模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(12): 29-39.
WEI S Y, LIU F, YUAN S C, et al. Simulation study of urban multistage drainage system modification based on SWMM and FVCOM model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(12): 29-39.
- [12] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 98-105.
LU X C, XU Z X, LI Y K, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 98-105.
- [13] 刘浚泉, 卢兴超, 赵树旗. 我国北方平原城市社区内涝防控设计方法[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 106-109.
LIU J Q, LU X C, ZHAO S Q. Design method for flood control in urban communities in the northern Plains of China [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7): 106-109.
- [14] ZHAI H J, WANG J, WANG N N. Study on influencing factors and estimation model of the water supply and drainage structure cost in substation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(1): 8453899.
- [15] RATHOD S, DAHIWALKAR S, GORANTHAR S, et al. Calibration of DRAINMOD for prediction of water table depths and drain discharges under waterlogged Vertisols of Maharashtra, India [J]. Journal of Applied and Natural Science, 2019, 11(3): 724-731.
- [16] MALOTA M, SENZANJE A. Modelling mid-span water table depth and drainage discharge dynamics using DRAINMOD 6.1 in a sugarcane field in Pongola, South Africa [J]. Water, 2015, 41(3): 325.
- [17] GÜNGÖR K, BAHÇEÇI B. Performance assessment of subsurface drainage systems in the Harran Plain of the South-East Anatolian region of Turkey [J]. Irrigation and Drainage, 2023, 72(2): 487-502.
- [18] 李彦鑫, 徐丽, 齐菲, 等. 滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1110-1120.
LI Y X, XU L, QI F, et al. Seepage field simulation of subsurface pipe salt drainage processes in coastal saline-alkali farmland [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(7): 1110-1120.
- [19] 钱争, 冯绍元, 庄旭东, 等. 基于 RZWQM2 模型的农田排水暗管优化布置研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 113-121.
QIAN Z, FENG S Y, ZHUANG X D, et al. Using root zone water quality model to optimize subsurface drain in Hetao irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 113-121.
- [20] ABDELMAJED N B, EIHAZEK A N. Subsurface drainage impact assessment-in ibshan, Egypt [J]. Journal of Environmental Science and Engineering (B), 2013, 2(9): 527-531.
- [21] 谢家峰, 蒋帅, 刘斌, 等. 琴台美术馆屋面雨水排放系统设计分析[J]. 给水排水, 2024, 60(1): 90-96.
XIE J F, JIANG S, LIU B, et al. Qintai art gallery roof drainage system design [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 60(1): 90-96.
- [22] 陈翠珍, 符韵, 蒋佳鑫, 等. 武汉市蔡甸东湖水系排水能力评估研究[J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 106-110.
CHEN C Z, FU Y, JIANG J X, et al. Assessment of drainage capacity of Caidian east lake water system in Wuhan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(S1): 106-110.
- [23] DIERSCH H J G. In FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [24] 陈崇希, 唐仲华, 胡立堂. 地下水流数值模拟理论方法及模型设计 [M]. 北京: 地质出版社, 2014.
CHEN C X, TANG Z H, HU L T. Theoretical methods and model design for numerical simulation of groundwater flow [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

- [25] LI Y, PAN L H, ZHANG K N, et al. Numerical modeling study of a man-made low-permeability barrier for the compressed air energy storage in high-permeability aquifers [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 820-833.
- [26] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3): 70-75.
CHEN C X, HU L T. A review of the seepage-pipe coupling model and its application [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(3): 70-75.
- [27] HU L T, PAN L H, ZHANG K N. Modeling brine leakage to shallow aquifer through an open wellbore using T2WELL/ECO₂N [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 9: 393-401.
- [28] LIU R C, YU L Y, JIANG Y J, et al. Recent developments on relationships between the equivalent permeability and fractal dimension of two-dimensional rock fracture networks [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 45: 771-785.
- [29] LUO X, CHENG Y Y, TAN C Q. Calculation method of equivalent permeability of dual-porosity media considering fractal characteristics and fracture stress sensitivity [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2023, 13(8): 1691-1701.
- [30] SUN K N, HU L T, LIU X M. The influences of sponge city construction on spring discharge in Jinan city of China [J]. *Hydrology Research*, 2020, 51(5): 959-975.
- [31] 柏平, 臧文斌, 张红萍, 等. 城市构筑物暴雨内涝分层模拟技术及应用 [J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2023, 21(2): 116-127.
BAI Ping, ZANG Wenbin, ZHANG Hongping, et al. A stratified modeling approach to flooding at urban infrastructures [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2023, 21(2): 116-127.
- [32] 张建云. 水文学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
ZHANG Jianyun. *Handbook of Hydrology* [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [33] 任泽凌, 李彬权, 王国庆, 等. 城市暴雨强度公式复核: 以杭州主城区为例 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 80-89.
REN Z L, LI B Q, WANG G Q, et al. Revisited urban rainfall intensity formula: An example of the main urban area of Hangzhou [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 80-89.

(责任编辑 王 璐)