

基于参数全局敏感性分析的 LID 设施空间布局优化研究

何 旸¹, 程麒铭¹, 苏义鸿¹, 刘 非^{1,2}, 吴 洋³, 饶 焯¹, 谢 鲁³,
朱 钢³, 陈 垚^{1,2}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074;
3. 成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 610023)

摘要:针对多目标进化算法求解低影响开发(LID)设施空间布局优化问题时因参数过多而导致算法性能下降的问题,构建了重庆秀山海绵城市建设区 LID 设施空间布局优化模型,采用多元逐步回归和 SOBOL 法对比分析了 LID 设施空间布局参数对节点溢流的影响,探明了敏感性参数,进而根据敏感性参数分析结果改进 Pareto 最优前沿,获得 LID 设施空间布局最优方案。结果表明:随着降雨重现期的增加,秀山海绵城市建设区 LID 设施径流蓄滞能力趋于饱和导致其布局参数敏感性整体减弱;LID 设施布局参数对节点溢流的敏感程度受汇水区排水管网排水能力的影响,尤其是排水能力较弱的区域参数呈现出显著的敏感性;通过优化敏感性参数可显著减少 NSGA-II 算法的评价次数,与优化前相比,在同等建设成本下节点溢流量可削减 90.29%。

关键词:低影响开发;空间布局优化;全局敏感性分析;多元逐步回归;SOBOL 法;NSGA-II 算法;海绵城市;重庆

中图分类号:TV122;TU992 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)03-0194-10

Research on spatial layout optimization of LID facilities based on global sensitivity analysis of parameters//HE Yang¹, CHENG Qiming¹, SU Yihong¹, LIU Fei^{1,2}, WU Yang³, RAO Ye¹, XIE Lu³, ZHU Gang³, CHEN Yao^{1,2}
(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chengdu Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610023, China)

Abstract: Aiming at the performance degradation of multi-objective evolutionary algorithms caused by excessive parameters in optimizing spatial layout of low impact development (LID) facilities, the LID spatial layout optimization model of the sponge city construction area in Xiushan, Chongqing was established. Comparative analysis using multiple stepwise regression and SOBOL methods revealed the sensitivity of LID layout parameters to node overflow, identifying critical sensitivity parameters. The Pareto optimal front was subsequently refined based on sensitivity analysis outcomes to obtain the optimal LID spatial layout scheme. The results show that as the rainfall return period increases, the sensitivity of LID layout parameters in Xiushan's sponge city area generally decreases due to saturation of runoff retention capacity. The sensitivity of LID layout parameters to node overflow is significantly influenced by drainage capacity of the drainage network in catchment areas, with parameters in regions with inadequate drainage capacity exhibiting remarkable sensitivity. Optimization of sensitive parameters substantially reduces evaluation times in NSGA-II algorithm while achieving a 90.29% reduction in node overflow under equivalent construction costs compared to pre-optimization scenarios.

Key words: low impact development; spatial layout optimization; global sensitivity analysis; multivariate stepwise regression; SOBOL method; NSGA-II algorithm; sponge city; Chongqing

城市化进程使得不透水地表不断扩张,导致地表径流剧增^[1-2]。同时,全球变暖和气候变化也导致

极端降雨事件频发,加剧了城市内涝风险^[3]。为缓解城市内涝并控制径流污染问题,我国提出了海绵

基金项目:重庆交通大学研究生科研创新项目(2024S0053);重庆市技术创新与应用发展专项资金项目(CSTB2024TIAD-CYKJ CXX0019, CSTB2022TIAD-KPX0200);重庆市研究生联合培养基地项目(JDLHPYJD2020026)

作者简介:何旸(1999—),男,硕士研究生,主要从事城市雨洪管理研究。E-mail:437183861@qq.com

通信作者:陈垚(1983—),男,教授,博士,主要从事水污染防治与城市雨洪管理研究。E-mail:chenyao@cqjtu.edu.cn

城市建设理念,旨在通过低影响开发 (low impact development, LID) 途径模拟自然过程,减少城市开发对水文环境的负面影响^[4-5]。为削减暴雨期间的径流量,并降低城市排水系统的压力^[6-7],通常将 LID 设施组合布局于各子汇水区中,但其空间布局取决于子汇水区数量、LID 设施类型、规模面积及空间位置等因素^[8],进而影响城市内涝缓解成效和海绵城市建设成本。由于 LID 设施类型、规模面积及空间位置可形成无数种空间布局组合方案,而如何在最低建设成本下寻求最优空间布局方案实现海绵城市最佳建设效果是一个多目标优化问题^[9]。目前,求解多目标优化问题主要依靠多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithm, MOEA)^[10],即通过求解非线性、多维的复杂优化问题,寻找 Pareto 最优解。但针对多目标优化问题的求解,MOEA 的评价次数往往需要上万次^[11-12],特别是处理包含大量决策变量的问题时,较多的参数和复杂的模型通常导致算法性能急剧下降且耗时过长^[13]。

参数敏感性分析是一种用于确定模型输出对模型输入变化敏感程度的技术,主要包括局部敏感性分析和全局敏感性分析,目前已广泛用于水文模型敏感性参数的确定^[14-15]。同样,参数敏感性分析也可用于 LID 设施空间优化模型确定敏感性参数,并通过模型结果影响较大的敏感性参数进行重点优化^[16],进而减少 MOEA 的评价次数,提高 Pareto 最优解集的质量。然而,许多水文模型商业软件不允许修改源代码和软件二次开发,难以进行模型参数的敏感性分析^[17]。暴雨洪水管理模型 (storm water management model, SWMM) 广泛用于降雨径流一维水动力模拟及 LID 设施的雨洪管控效果评价^[18-20],因其具有开源特性而便于在使用时进行模型参数分析。由于输入参数对 SWMM 模型计算结果可产生显著影响,因此,通过敏感性分析甄别出对结果影响显著的参数尤为重要。如 Hashemi 等^[21]利用响应面变差函数分析模型对 SWMM 水文参数进行全局敏感性分析,得到多目标优化模型耦合率定后的 SWMM,以寻求 LID 设施空间布局最优方案;NayebYazdi 等^[22]采用局部和全局敏感性分析法对比分析了 SWMM 和水文模拟程序 (hydrologic simulation program-fortran, HSPF) 的水文参数敏感性,并对其在城市流域峰值流量和径流量中的模拟能力进行了对比。此外,也有学者采用 SOBOL 法对透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池等 LID 设施的设计参数进行全局敏感性分析,探究 LID 设施对径流量和峰值流量的控制性能^[23-24]。

虽然已有学者根据不同目标变量考察了

SWMM 参数的敏感性,但研究主要集中在模型水文参数和 LID 设施设计参数上,而尚未对 LID 设施空间布局参数的敏感性进行研究。鉴于此,以重庆秀山海绵城市建设区域为研究区,先采用多元逐步回归法对 LID 设施空间布局优化模型进行参数降维,随后采用 SOBOL 法对 LID 设施的空间布局参数 (类型、规模、空间位置等) 进行全局敏感性分析,考察参数对节点溢流影响的显著性程度,并对敏感成因进行分析。在此基础上,利用 MATLAB 软件 platEMO4.0 平台中的 NSGA-II 算法寻找 LID 设施空间布局的 Pareto 最优解集,并根据参数敏感性分析结果对敏感变量进行优化,对比分析参数优化前后的 Pareto 最优解集,以期提高控制目标下 LID 设施空间布局最佳方案的质量,并引导算法对多目标优化问题的持续寻优。

1 研究区概况

秀山土家族苗族自治县位于重庆市东南部,地处北纬 28°20′~28°44′、东经 108°41′~109°06′,属于亚热带季风气候,多年平均降水量约为 1 300 mm。研究区位于秀山城区南部新城,占地面积约 61 hm²,包括渝秀大道 (东西) 和学府大道 (南北) 两条交通主干道以及政府大楼、中学、体育公园和居住小区等不同类型区域。研究区建有完善的雨污分流排水设施,雨水管道直径为 1 000~2 000 mm,总长度约 4.5 km,雨水管道仅满足两年一遇设计标准。为此,当地政府将该区域作为海绵城市试点区域,拟通过海绵化改造实现年径流总量控制率为 75% 的目标。但根据课题组于 2016—2017 年的径流量监测数据统计分析,发现经原有 LID 设施改造后径流总量控制率仅为 67.4%,尚未满足控制目标,原有 LID 设施布局方案存在明显不足,有必要进行空间布局优化。采用课题组前期构建且率定后的 SWMM^[25-26],将研究区划分为 27 个子汇水区 (S1~S27)、36 个节点、33 个管段和 3 个排水口 (图 1),并根据不同区域设置透水铺装 (PP)、雨水花园 (RG)、生物滞留池 (BRC) 等 3 类 LID 设施。SWMM 水文参数、LID 设施设计参数以及下垫面情况详见文献 [25-26]。

2 研究方法

2.1 设计降雨情景

根据重庆市地方标准 DBJ50/T-296—2018《山地城市室外排水设计管渠设计标准》的相关规定,雨水管渠设计重现期 (P_p) 应采用 3~5 a。然而,鉴于研究区存在部分易涝点,结合 DBJ50/T-427—2022《山地城市内涝防治技术标准》中对易涝点雨

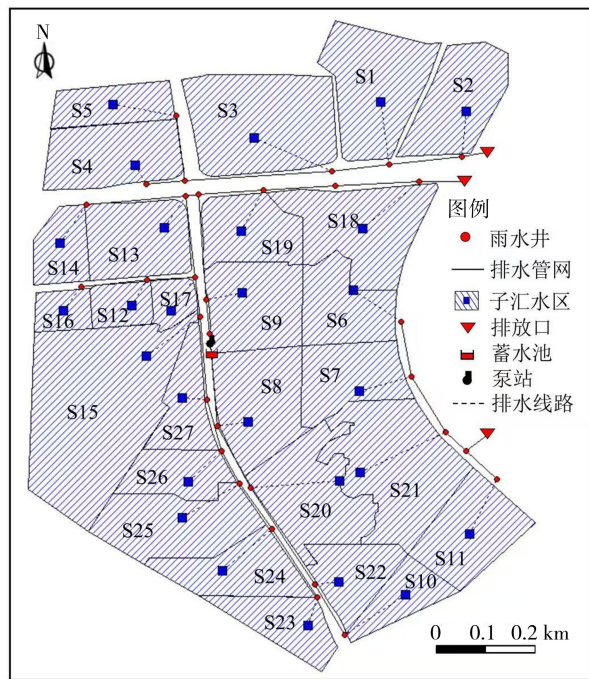


图1 研究区SWMM概化图

Fig.1 Schematic diagram of SWMM in study area

水管渠设计重现期的特别要求(5~10 a),研究选取了雨水管渠设计重现期分别为5、10 a来考察研究区在LID设施空间布局优化后的雨水管道排水效能。此外,考虑到研究区夏季降雨多以短历时且主雨峰靠前的暴雨形式出现,属于暴雨灾害高风险区^[25],为验证海绵城市建设在增强城市韧性方面的积极作用,研究设定了降雨重现期 $P=50$ a的降雨作为极端设计情景。根据重庆市秀山县暴雨强度公式,基于芝加哥雨型生成设计降雨过程线,降雨历时为2 h,设计雨峰系数采用0.3^[26],降雨重现期分别为5、10、50 a的设计降雨过程线如图2所示。

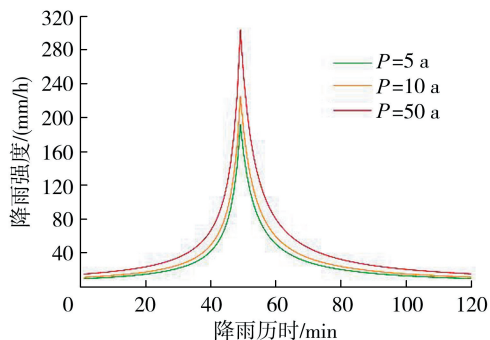


图2 设计降雨过程线

Fig.2 Design rainfall hydrograph

2.2 LID设施空间布局优化模型与求解

基于MATLAB软件和minGW编译器可通过简单的脚本实现复杂的计算流程和自动化操作,使计算结果更加准确可靠^[27]。通过VS2010平台将SWMM计算引擎源码中可调用函数编译成动态链

接库(DLL文件),并对接口程序进行编译,然后利用MATLAB直接编译DLL文件,便可实现SWMM模型的二次开发^[28-29]。通过MATLAB软件程序在各子汇水区域上布设透水铺装、生物滞留池和雨水花园等3类LID设施,以27个子汇水区域上的3种LID设施布设面积为模型自变量,共计81个,包括S1PP、S1BRC、S1RG等;并以LID设施建设成本与节点溢流量作为目标函数,建立LID空间布局优化模型及约束条件(详见文献[26])。最后利用MATLAB的函数命令封装目标函数以满足PLATEMO 4.0平台数据接口形式,便于后续利用NSGA-II算法对方案建设成本和节点溢流量进行求解。模型求解时,基于MATLAB的PlatEMO4.0平台,采用NSGA-II算法计算LID设施空间布局的Pareto近似前沿,并建立节点溢流量与方案建设成本的函数关系,算法评价次数为10000次。

2.3 参数全局敏感性分析

2.3.1 多元逐步回归法

多元逐步回归法是一种以多元线性回归为理论基础的全局敏感性分析方法,其通过不断试错来排除对目标变量影响低的不敏感性参数,而保留对目标变量影响高的敏感性参数,最终得到线性回归方程,该方法适用于大容量的样本抽样分析^[30]。基本流程为:将自变量参数根据决定系数 R^2 大小依次引入回归方程,并在给定的 F 水平下进行显著性检验;若参数显著则保留至回归方程,若参数不显著则剔除;重复这一过程直至回归方程无参数引入且无参数剔除为止。采用标准回归系数(standardized regression coefficient, SRC)表示参数变量对目标变量的正(负)影响,并通过对比各参数的SRC值来判别其敏感性程度。

2.3.2 SOBOL法

SOBOL法是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法,用于量化输入变量对输出变量的影响程度,主要通过计算输入变量对输出变量的总方差贡献值来判别参数的敏感性,并以一阶敏感性指数和总效应敏感性指数作为判别依据^[31]。虽然有文献建议采样点数 N 宜设置为1000^[32],但也有研究表明敏感性指数收敛的必要条件是 N 远大于1000,但若分析目标为判别参数优先级排序时, N 也可不满足这一要求^[33]。由于本研究敏感性分析目标为考虑参数的优先级排序,故将 N 设定为5000,并采用百分位Bootstrap法计算SOBOL指数95%的置信区间。SOBOL指数计算公式为

$$S_i = V_{X_i} [E(Y|X_i)] / V(Y) \quad (1)$$

$$S_{Ti} = 1 - V_{-X_i} [E(Y|X_{-i})] / V(Y) \quad (2)$$

式中: S_i 为一阶敏感性指数,即第 i 个自变量对目标变量的直接贡献,且不考虑自变量间的交互作用; S_{Ti} 为总效应敏感性指数,即第 i 个自变量对目标变量的影响,包括自变量间的交互作用; X_i 为第 i 个自变量; Y 为目标变量; $E(Y|X_i)$ 表示输入 X_i 的条件下 Y 的平均值; $V_{X_i}(\cdot)$ 为将其他变量固定时输入 X_i 进行方差计算的函数; $V(Y)$ 为 Y 的总方差,表示所有自变量共同作用下 Y 的方差; X_{-i} 为剔除第 i 个自变量后的剩余变量; $E(Y|X_{-i})$ 表示输入剔除第 i 个自变量后剩余变量条件下 Y 的平均值; $V_{-X_i}(\cdot)$ 为剔除第 i 个自变量后对剩余变量进行方差计算的函数。

2.3.3 参数全局敏感性分析流程

不同降雨重现期下 LID 设施空间布局优化模型的参数敏感性分析流程具体为:①根据约束条件^[26],对 81 个自变量采用拉丁超立方抽样法^[34-35]得到各子汇水区不同 LID 设施布设面积的随机组合共计 10 000 组,并利用 SOBOL 法分析随机抽样生成 5 000 组随机组合序列;②利用 MATLAB 编写的接口程序打开 SWMM 的初始 INP 文件,将上述两种方法下得到的自变量(参数)抽样组合添加至初始 INP 文件中;③利用 MATLAB 直接编译 SWMM 中的 DLL 文件来调用 SWMM 计算引擎,实现计算结果数据的批量生成,并从输出 OUT 文件中提取,分别获得两种方法的 10 000 组、5 000 组节点溢流量数据;④采用 SPSS 软件对 10 000 组节点溢流数据进行多元逐步回归分析,同时利用 MATLAB 编译的 SOBOL 代码将 5 000 组节点溢流数据结果代入式(1)(2)进行计算,得到 81 个自变量的一阶敏感性指数和总效应敏感性指数。

3 结果与分析

3.1 多元逐步回归法分析结果

通过 MATLAB 编译处理,计算得到 5、10 和 50 a 3 种降雨重现期下各 10 000 组 LID 设施空间布局随机组合方案所对应的节点溢流量,并利用 SPSS 软件对节点溢流量进行多元逐步回归分析。结果表明,不同降雨重现期下,对节点溢流量最敏感的参数均为子汇水区 S20 的 LID 设施布设面积,其 SRC 值均为负数,说明自变量对目标变量为负影响。这是由于 S20BRC、S20PP 和 S20RG 的增加提高了 LID 设施的滞蓄能力,使径流量得到削减,进一步降低了排水管网的节点溢流量。同时共线性统计结果显示,自变量的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)均为 1.0,表明自变量间的相关性非常低,几乎独立,证实回归模型预测结果可靠。降雨重现期为

5 a 和 10 a 时,子汇水区 S20 的 LID 设施布设面积敏感性最强,其中 S20BRC 的 SRC 绝对值分别为 0.469 和 0.497,而当降雨重现期增至 50 a 时, SRC 绝对值降至 0.353,表明敏感性有所减弱。同时,降雨重现期为 5 a 和 10 a 时, S20BRC 的 R^2 分别为 0.226 和 0.256,表明该参数对节点溢流的影响较小,但当再引入参数 S20PP 和 S20RG 后,两种降雨重现期下 R^2 分别增至 0.629 和 0.712,表明子汇水区 S20 中的 LID 设施布局对节点溢流的影响起主导作用。继续在子汇水区 S10 和 S22 中引入回归次序位于 4~9 的 LID 设施布局参数后, R^2 分别达到 0.857 和 0.972。但是当降雨重现期增至 50 a 时,即便是在子汇水区 S20 同时布设 3 种 LID 设施,其 R^2 也仅为 0.367,表明此时子汇水区 S20 的 LID 设施布局对节点溢流量的影响力减弱。这可能是由于低降雨强度下,子汇水区上布设的 LID 设施因其滞蓄能力较好,可显著影响节点溢流,而当降雨强度较大时,子汇水区 S10 和 S20 上布设的 LID 设施滞蓄能力趋于饱和,从而降低了 LID 设施对节点溢流的控制能力。继续在子汇水区 S15、S10、S22 和 S25 引入回归次序位于 4~15 的 LID 设施布局参数后,可使 R^2 提升至 0.871,证实这些空间布局参数共同对目标变量起决定作用。降雨重现期为 5、10、50 a 时,多元逐步回归模型的 R^2 分别为 0.857、0.972 和 0.966,表明 LID 设施的空间布局参数与目标变量间呈显著的线性关系。通过对比参数敏感性分析结果可知,随降雨重现期从 5 a 增加到 50 a,引入多元线性回归方程的参数数量从 14 增加至 49,表明降雨强度在一定程度上对参数敏感性呈现出驱动激发效应。这可能是由于当降水量超过子汇水区排水系统的设计能力时, LID 设施的滞蓄能力与管网排水能力不足而增加了节点溢流发生概率。

3.2 SOBOL 法分析结果

不同降雨重现期下,将以节点溢流量为目标变量的一阶敏感性指数 S_i 和总效应敏感性指数 S_{Ti} 按大小排序,结果如图 3 所示(仅展示 SOBOL 指数大于 0.01 的参数)。由图 3 可见,在子汇水区 S20、S10、S22、S15、S25 和 S24 上布设 LID 设施较为敏感,其余参数的 SOBOL 指数几乎为 0,对输出结果无影响。其中,在子汇水区 S20 布设 LID 设施对节点溢流的影响最显著,尤以布设透水铺装和生物滞留池设施最明显。当降雨重现期为 5 a 和 10 a 时,子汇水区 S20、S10 和 S22 的 S_i 略小于 S_{Ti} ,表明 LID 设施的空间布局参数对节点溢流量的影响是独立的,与其余参数无显著的交互效应。而当降雨重现期增至 50 a 时,子汇水区 S15 的 SOBOL 指数突然增

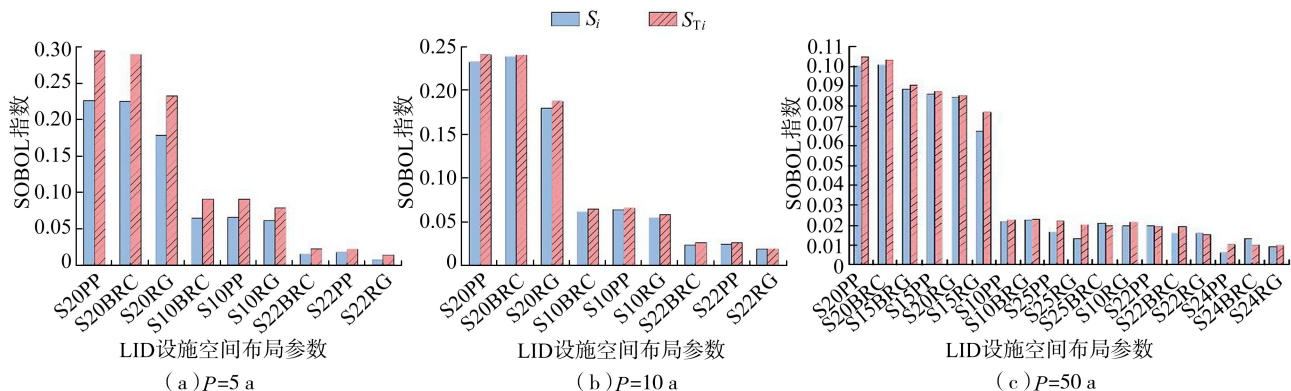


图3 不同降雨重现期下LID设施空间布局参数的SOBOL指数

Fig.3 SOBOL indexes of LID spatial layout parameters under different rainfall return periods

加,这是由于降雨强度的增加导致子汇水区 S15 排水管网的排水能力不足,进而增加节点溢流量,此时需通过布设雨水花园设施以增加滞蓄能力。同时,在子汇水区 S25 和 S24 布设 LID 设施也能对节点溢流起到一定的控制作用。总体而言,随着降雨强度的增加,各子汇水区布设的 LID 设施因滞蓄能力逐渐趋于饱和呈现出 SOBOL 指数逐渐下降的趋势。

SOBOL 指数的 95% 置信区间与均值如图 4 所示。由图 4 可见,降雨重现期为 5 a 和 10 a 时,子汇水区 S15、S24 和 S25 布设 LID 设施的 SOBOL 指数几乎为 0,并在置信区间内,表明计算结果可靠且这些参数为不敏感性参数。当降雨重现期为 50 a 时,参数 S20PP 的 S_i 为置信区间的最大值,而 S_{T_i} 则略大于区间最大值,这是因为不敏感性参数占比较大,导致数据分布受到影响;虽然样本量足够大,但较多的不敏感性参数在一定程度上影响了置信区间的计算结果,整体降低 SOBOL 指数的平均水平,导致置信区间的边界出现负值^[36]。结果表明,较敏感参数的 SOBOL 指数均在置信区间内,且与均值差异较小,计算结果可靠。同时 S_i 之和随降雨重现期由 5 a 增加到 50 a 呈现先增后降的趋势,分别为 0.862、0.904 和 0.792;而 S_{T_i} 之和则呈现逐渐下降趋势,分别为 1.137、0.934 和 0.841。

3.3 参数敏感性成因分析

通过对比多元逐步回归分析结果与 SOBOL 敏感性分析结果可知,子汇水区 S20 上 LID 设施的空间布局对不同降雨重现期下节点溢流表现出显著且稳定的敏感性,且子汇水区 S10 和 S22 也较为敏感。可见,两种方法的敏感性指数总体上随降雨重现期增加而呈下降趋势。其中,多元逐步回归分析结果表明 LID 设施空间布局与节点溢流存在显著线性关系(显著性水平 $\alpha < 0.01$)。SOBOL 法分析结果表明,3 种降雨重现期的 S_i 均接近其对应的 S_{T_i} ^[37],且 S_i 的总和接近于 1,表明参数直接独立影响目标变

量,且两者之间主要存在线性关系。

降雨重现期为 5、10、50 a 时,未布设 LID 设施的节点溢流总量分别为 328、1 054、5 040 m^3 。其中,降雨重现期为 50 a 时节点溢流总量远高于另外两种情况,此时各子汇水区的溢流情况较为严峻,且受子汇水区 S15 和 S20 中 LID 设施空间布局的显著影响,即其空间布局参数为敏感性参数。分析认为,子汇水区 S15 为研究区占地面积最大的区域,其排水管道管径为 1 200 mm,排水能力能满足低降雨重现期,但不满足 $P=50\text{ a}$ 的降雨条件;子汇水区 S20 在不同降雨重现期下对节点溢流的影响均极为显著,但其排水管道管径较小,仅为 1 000 mm,导致排水能力较弱,从而使得布设 LID 设施后对节点溢流具有明显效果。为进一步验证 LID 设施空间布局参数敏感性分析结果的有效性,根据秀山排水管网改造策略^[38],在子汇水区 S15 和 S20 分别设置一个有效水深为 3 m、占地面积为 149 m^2 的调蓄池。由于 SOBOL 法能有效解释模型中非线性效应和变量间的交互作用^[16],故采用该方法计算增设调蓄池后 LID 设施空间布局参数的敏感性指数,结果如图 5 所示。由图 5 可见,子汇水区 S15 和 S20 在增设调蓄池后显著降低了子汇区内产生的径流量,使得现状排水管道的排水负荷得到有效缓减,几乎无节点溢流,此时再布设 LID 设施对节点溢流几乎无影响,甚至出现子汇水区 S20 的 S_i 和 S_{T_i} 降为 0 的情况。同时,当子汇水区 S15 增设调蓄池后,其余子汇水区(如 S8、S20 等)敏感性较强参数的 S_i 值为 S_{T_i} 值的 1/2 左右,出现了显著的交互现象,此时子汇水区 S8 和 S20 受其他子汇水区的影响较大,空间布局参数与节点溢流之间主要为非线性关系^[39](图 5(a));而各子汇水区均可直接影响节点溢流,并不受其他子汇水区的影响(图 5(b))。研究证实,子汇水区排水管网的排水能力是影响 LID 设施空间布局对节点溢流敏感性程度的重要因素,即

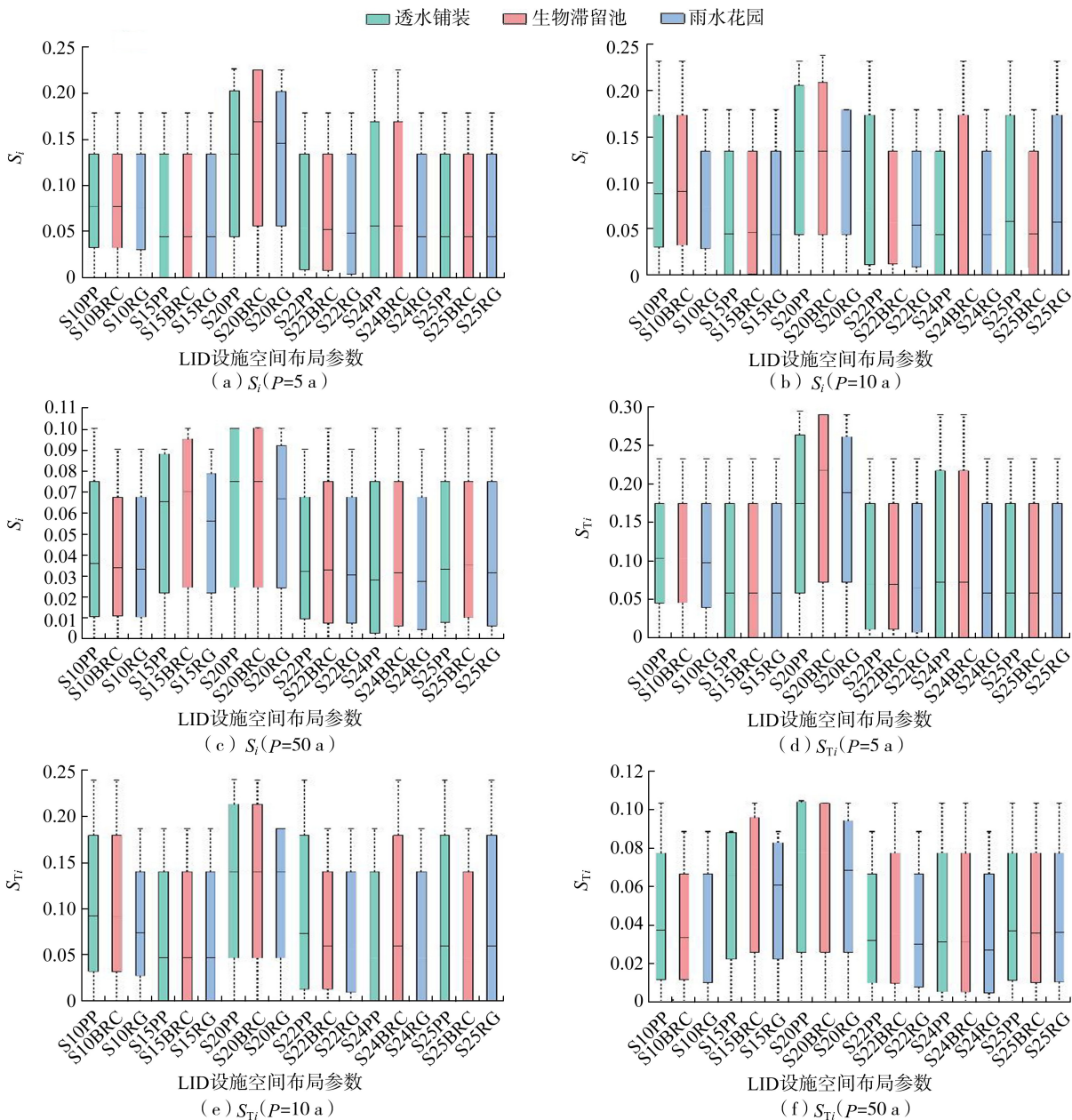


图 4 不同降雨重现期下 SOBOL 指数的 95%置信区间与均值

Fig. 4 95% confidence interval and average values of SOBOL indexes under different rainfall return periods

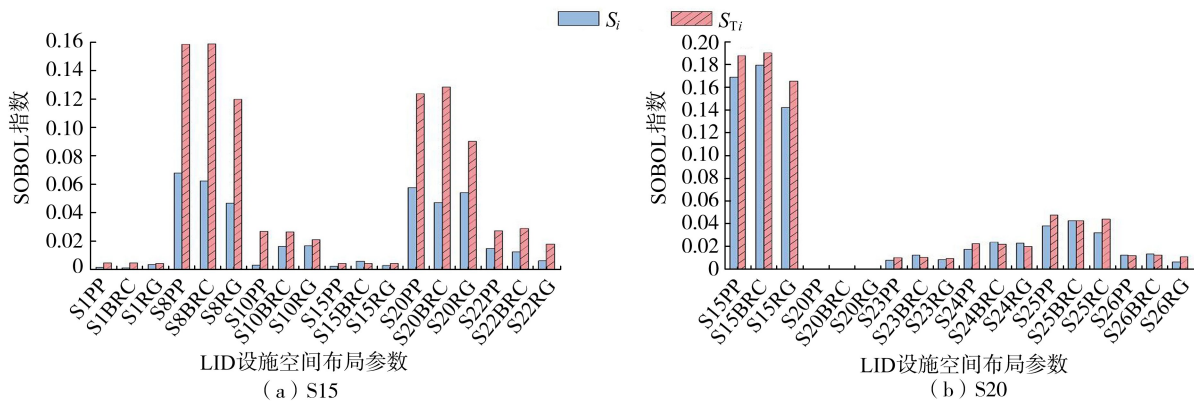


图 5 子汇水区 S15 和 S20 增设调蓄池后的 SOBOL 指数

Fig. 5 SOBOL indexes after adding storage tank in sub-catchment S15 and S20

LID 设施空间布局参数敏感性分析结果不仅有助于 LID 设施空间布局优化,也有助于科学评估子汇水区排水管网的排水性能,并指导排水管网改造方案的制定。

3.4 基于参数全局敏感性分析的 LID 空间布局优化方案

以降雨重现期 50 a 为例,LID 设施空间布局的 Pareto 近似前沿如图 6 所示。针对 Pareto 最优前沿,每个点均包含一个理论上最佳的 LID 设施空间布局方案。选取最大节点溢流量为 412 m³、方案建设成本为 0.688 亿元的最优解作为方案 A。按照参数全局敏感性分析结果对优化模型求解进行再次优化,在约束条件下,将子汇水区 S20 和 S15 的 LID 设施布设面积逐步增加 0.1 hm²,并不断减少不敏感参数,如子汇水区 S2、S4、S27 等区域 LID 设施的布设面积,进而得到敏感性参数优化前后 NSGA-II 评价 10 000 次的求解结果,如图 6 所示。结果表明,随着敏感区域 LID 设施布设面积的增大,LID 设施布设对节点溢流量的控制效果显著提升,且由于不敏感区域 LID 设施布设面积的减少,参数优化后的 LID 设施布局方案建设成本基本上均低于参数优化前的方案。

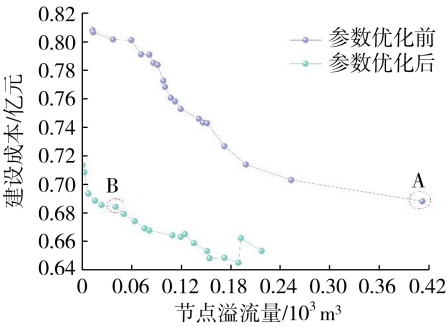


图 6 敏感性参数优化前后的 Pareto 近似前沿
Fig.6 Pareto approximate frontier before and after sensitivity parameter optimization

选取建设成本与方案 A 相近的优化方案作为方案 B,可获得两种方案的建设成本与节点溢流控制效果。结果显示,尽管方案 B 的单位面积成本(343.92 元/m²)略高于方案 A(329.70 元/m²),但其总建设成本更低,为 0.684 亿元,且对节点溢流的控制效果显著强于方案 A,节点溢流削减率高达 90.29%。相较于方案 A,方案 B 将子汇水区 S15 中生物滞留池设施面积由 0.448 hm² 增至 1.498 hm²,而将子汇水区 S20 中透水铺装和生物滞留池设施面积由 0.158 hm² 和 0.213 hm² 分别增至 0.558 hm² 和 1.413 hm²,并取消了 S2、S6、S7、S19 等不敏感区域

的 LID 设施(图 7)。研究表明,在参数全局敏感性分析的基础上,重点优化敏感区域的 LID 设施布设面积可实现更优的方案,使 LID 设施空间布局对节点溢流的控制更加高效。

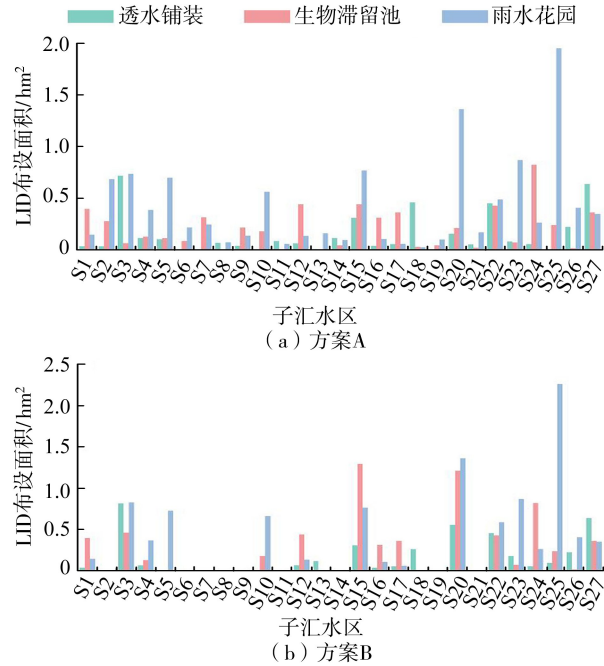


图 7 两个方案下各子汇水区 LID 设施布设面积
Fig.7 LID layout area of sub-catchments under two schemes

为进一步探究敏感性参数优化后 Pareto 近似前沿曲线解的质量,在 NSGA-II 算法评价 10 000 次的基础上继续求解,结果发现敏感性参数优化后 Pareto 近似前沿曲线与评价 12 000 次 NSGA-II 算法的 Pareto 近似前沿几乎重合(图 8)。结果表明,在参数全局敏感性分析的基础上通过重点优化敏感性子汇水区,并剔除不敏感子汇水区后再进行 LID 设施空间布局优化模型求解,能将 NSGA-II 对多目标模型的算力提升 1.2 倍。这一参数优化方法不仅显著减少了模型算法的评价次数,而且在满足溢流量控制的同时大幅降低了 LID 设施的建设成本。为进一步验证该方法的有效性,在 NSGA-II 算法评价 12 000 次的基础上,对 LID 设施空间布局方案再次优化。研究证实,敏感性参数对驱动 NSGA-II 算法寻优的效果是持续的,尤其是在评价 12 000 次的基础上,仍能根据敏感性分析结果继续寻找 LID 设施空间布局更优的方案,不断为子汇水区的 LID 设施空间布局方案提供优化方向。

4 结 论

a. 建立了重庆秀山海绵城市建设区 LID 设施空间布局优化模型,采用多元逐步回归法和 SOBO

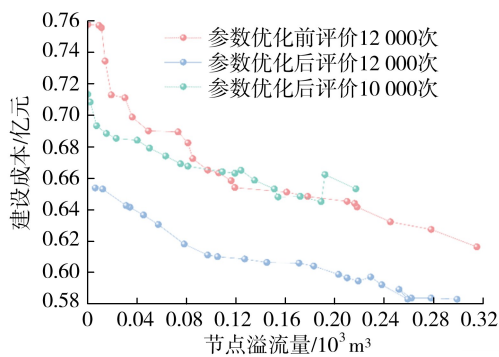


图8 敏感性参数持续优化前后的 Pareto 近似前沿

Fig.8 Pareto approximate frontier before and after continuous optimization of sensitivity parameters

法对比分析了 LID 设施空间布局参数对节点溢流的影响。不同降雨重现期下,较为敏感的参数包括 S20、S10、S22 子汇水区域的 LID 设施布设面积,其中子汇水区 S20 的 LID 设施空间布局如 S20PP、S20BRC 等参数对节点溢流的敏感性最高,而子汇水区 S15 的 LID 设施空间布局仅在高重现期降雨条件下才表现出显著敏感性。两种方法均表明 LID 设施空间布局参数的敏感性整体上随降雨重现期的升高而呈下降趋势,在降雨重现期为 50 a 时, SRC 值降至 0.353, SOBOL 指数最大值降至 0.1 左右。同时,81 个参数之间无明显交互效应,独立影响节点溢流量且呈线性相关。

b. 研究区各子汇水区排水管网的排水能力是影响 LID 设施空间布局敏感性的关键因素。在高降雨重现期条件下,在最敏感的 S20 和 S15 子汇水区域增设调蓄池,可使 S_i 和 S_{Ti} 指数大幅下降甚至为 0,而子汇水区几乎无溢流发生。LID 设施空间布局参数敏感性分析有助于 LID 设施的空间布局优化,并有必要对高敏感性子汇水区排水管道的排水性能做进一步评估。

c. LID 设施空间布局参数的敏感性分析能驱动 NSGA-II 算法在 Pareto 最优前沿解的基础上进行持续寻优,获取更优的 LID 设施空间布局方案。在进化算法评价 10000 次的基础上通过对 LID 设施空间布局优化模型敏感性参数的筛选与优化,不仅可减少 NSGA-II 等 MOEA 算法的评价次数,而且在同等建设成本下该优化模型可将节点溢流量削减 90.29%,并对算法具有持续的提升能力。

参考文献:

[1] DING Y, WANG H, LIU Y, et al. Urban waterlogging structure risk assessment and enhancement[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 352: 120074.
[2] 赖成光, 廖耀星, 王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108.

(LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))
[3] HAN F, ZHANG X, YU J, et al. Study on spatiotemporal dynamic characteristics of precipitation and causes of waterlogging based on a data-driven framework [J]. Science of The Total Environment, 2024, 913: 169796.
[4] WANG H, MEI C, LIU J, et al. A new strategy for integrated urban water management in China: sponge city [J]. Science China-Technological Sciences, 2018, 61(3): 317-329.
[5] 雷向东, 赖成光, 王兆礼, 等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))
[6] 刘明阳, 王群英, 徐向舟, 等. 考虑内涝周期的郑州市内涝韧性评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 48-55. (LIU Mingyang, WANG Qunying, XU Xiangzhou, et al. Assessment of waterlogging resilience in Zhengzhou City considering waterlogging cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 48-55. (in Chinese))
[7] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 109-117. (in Chinese))
[8] HUANG C L, HSU N S, LIU H J, et al. Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 542-558.
[9] HOU J, ZHU M, WANG Y, et al. Optimal spatial priority scheme of urban LID-BMPs under different investment periods [J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 202: 103858.
[10] GUO W, CHEN M, WANG L, et al. Hyper multi-objective evolutionary algorithm for multi-objective optimization problems [J]. Soft Computing, 2017, 21(20): 5883-5891.
[11] DU K J, LI J Y, WANG H, et al. Multi-objective multi-criteria evolutionary algorithm for multi-objective multi-task optimization [J]. Complex & Intelligent Systems, 2023, 9(2): 1211-1228.
[12] YANG Y, LIU J, TAN S. A multi-objective evolutionary algorithm for steady-state constrained multi-objective optimization problems [J]. Applied Soft Computing, 2021, 101: 107042.
[13] TIAN Y, SI L, ZHANG X, et al. Evolutionary large-scale multi-objective optimization: a survey [J]. ACM Computing

- Surveys,2021,54(8):174.
- [14] SONG X, ZHANG J, ZHAN C, et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 739-757.
- [15] 郭晨煜, 吕海深, 朱永华, 等. WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (6): 120-127. (GUO Chenyu, LYU Haishen, ZHU Yonghua, et al. Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 120-127. (in Chinese))
- [16] GLEN G, ISAACS K. Estimating Sobol sensitivity indices using correlations [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 37: 157-166.
- [17] HÖRNSCHEMEYER B, HENRICHS M, DITTMER U, et al. Parameterization for modeling blue-green infrastructures in urban settings using SWMM-UrbanEVA [J]. Water, 2023, 15(15): 2840.
- [18] PENG J, ZHAO H, LI R, et al. Parameter sensitivity analysis of SWMM: a case study of airport airfield area [J]. Natural Hazards, 2024, 120(7): 6551-6568.
- [19] TSAI L Y, CHEN C F, FAN C H, et al. Using the HSPF and SWMM models in a high pervious watershed and estimating their parameter sensitivity [J]. Water, 2017, 9 (10): 780.
- [20] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 117-124. (in Chinese))
- [21] HASHEMI M, MAHJOURI N. Global sensitivity analysis-based design of low impact development practices for urban runoff management under uncertainty [J]. Water Resources Management, 2022, 36(9): 2953-2972.
- [22] NAYEB YAZDI M, KETABCHY M, SAMPLE D J, et al. An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 118: 211-225.
- [23] ZHUANG Q, LI M, LU Z. Assessing runoff control of low impact development in Hong Kong's dense community with reliable SWMM setup and calibration [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118599.
- [24] MADRAZO-URIBEETXEBARRIA E, ANTÍN M G, BERRONDO J A, et al. Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the storm water management model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126525.
- [25] 陈垚, 何智伟, 张琦, 等. 基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 1-8. (CHEN Yao, HE Zhiwei, ZHANG Qi, et al. Evaluation of reconstruction schemes for small-and medium-scale sponge city based on hydrological control target [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 1-8. (in Chinese))
- [26] 程麒铭, 尹超, 陈垚, 等. 基于多目标进化算法和 SWMM 的 LID 设施空间布局优化研究 [J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 108-116. (CHENG Qiming, YIN Chao, CHEN Yao, et al. Spatial layout optimization of LID facilities based on multi-objective evolutionary algorithm and SWMM [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 108-116. (in Chinese))
- [27] BISPO J, CARDOSO J M P. A MATLAB subset to C compiler targeting embedded systems [J]. Software-Practice & Experience, 2017, 47(2): 249-272.
- [28] 袁绍春, 李迪, 陈垚, 等. 基于 BP 神经网络算法的 SWMM 参数自动率定方法 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 125-130. (YUAN Shaochun, LI Di, CHEN Yao, et al. Automatic calibration procedure of storm water management model parameters based on back propagation neural network algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 125-130. (in Chinese))
- [29] LEANDRO J, MARTINS R. A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5.1 based on dynamic link libraries [J]. Water Science and Technology, 2016, 73(12): 3017-3026.
- [30] LIU Y, HEUVELINK G B M, BAI Z, et al. Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression [J]. Field Crops Research, 2021, 264: 108098.
- [31] SHIN M J, GUILLAUME J H A, CROKE B F W, et al. Addressing ten questions about conceptual rainfall-runoff models with global sensitivity analyses in R [J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 135-152.
- [32] SARRAZIN F, PIANOSI F, WAGENER T. Global Sensitivity analysis of environmental models: convergence and validation [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 79: 135-152.
- [33] DONOVAN D, BURRAGE K, BURRAGE P, et al. Estimates of the coverage of parameter space by Latin hypercube and orthogonal array-based sampling [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 57: 553-564.
- [34] CAI J, HAO L, XU Q, et al. Reliability assessment of renewable energy integrated power systems with an extendable Latin hypercube importance sampling method [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 101792.
- [35] SHIELDS M D, ZHANG J. The generalization of Latin hypercube sampling [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 148: 96-108.

[36] SUN X, CROKE B, JAKEMAN A, et al. Benchmarking active subspace methods of global sensitivity analysis against variance-based Sobol' and Morris methods with established test functions[J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 149: 105310.

[37] AZZINI I, MARA T A, ROSATI R. Comparison of two sets of Monte Carlo estimators of Sobol' indices [J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 144: 105167.

[38] 甘春娟, 段玲红, 陈垚, 等. 城市排水系统水力分析与改造策略: 以秀山县为例[J]. 净水技术, 2018, 37(10): 111-117. (GAN Chunjuan, DUAN Linghong, CHEN Yao, et al. Hydraulic analysis and reconstruction strategy of urban drainage system in Xiushan County [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(10): 111-117. (in Chinese))

[39] WEI P, LU Z, SONG J. Regional and parametric sensitivity analysis of Sobol' indices[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 137: 87-100.

(收稿日期: 2024-08-13 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 193 页)

[11] 韦瑞深, 严子奇, 周祖昊, 等. 基于宽浅式破坏原则的水库早限水位优化方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 152-158. (WEI Ruishen, YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, et al. Optimal method of reservoir drought-limited water level based on principle of wide and shallow damage[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 152-158. (in Chinese))

[12] 李景海. 基于规则的水资源配置模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.

[13] 严子奇, 周祖昊, 韦瑞深, 等. 基于双层滑动的水库早限水位确定算法[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 914-923. (YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, WEI Ruishen, et al. A double-layer sliding algorithm for determining drought-limited water level of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 914-923. (in Chinese))

[14] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part I : theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 1451-1459. (in Chinese))

[15] 谢云东, 章四龙, 王红瑞, 等. 基于 NSGA- II 算法的磻碛水电站多目标调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 207-211. (XIE Yundong, ZHANG Silong, WANG Hongrui, et al. Research on the multi-objective dispatching of Qiaoqi Hydropower Station based on NSGA- II algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 207-211. (in Chinese))

[16] 陈强, 杨晓华. 基于熵权的 TOPSIS 法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程, 2007(4): 75-77. (CHEN Qiang, YANG Xiaohua. Comprehensive assessment of water environment quality by TOPSIS method based on entropy weight [J]. Environmental Engineering, 2007, 25(4): 75-77. (in Chinese))

[17] 陈晶, 张天力. 滇中高原地区干旱特性及风险分析[J]. 人民长江, 2024, 55(6): 114-121. (CHEN Jing, ZHANG Tianli. Analysis of drought characteristics and risks in Central Yunnan Plateau region[J]. Yangtze River, 2024, 55(6): 114-121. (in Chinese))

[18] 陶云, 张万诚, 段长春, 等. 云南 2009—2012 年 4 年连旱的气候成因研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(6): 866-874. (TAO Yun, ZHANG Wancheng, DUAN Changchun, et al. Climatic causes of continuous drought over Yunnan Province from 2009 to 2012 [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2014, 36(6): 866-874. (in Chinese))

[19] 水利部长江水利委员会. 滇中引水工程通水前昆明市主城区应急供水启动条件(试行)[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2023.

[20] 何胜. 水库群条件下旱限水位确定及水资源调控方法研究与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2024.

[21] 严长安, 杨汝兰, 付潇华, 等. 土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6194-6202. (YAN Changan, YANG Rulan, FU Xiaohua, et al. Impact of land-use change on ecosystem services value in Dianchi Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6194-6202. (in Chinese))

[22] 陈刚, 桑学锋, 顾世祥, 等. 多源水联合调度重构滇池流域健康水循环模式[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 57-69. (CHEN Gang, SANG Xuefeng, GU Shixiang, et al. Joint disposals of multi-source water resources for rehabilitating healthy water cycle in Lake Dianchi Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 57-69. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-06 编辑: 王芳)