

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.019

# 降雨过程特征对雨水排水系统溢流的影响研究

胡海洋<sup>1</sup>, 陈国炜<sup>1</sup>, 刘丽<sup>1</sup>, 王钢<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:**降雨过程特征变化是引发城市内涝的重要因素之一。文章使用多降雨情景模拟,以降雨因素中降雨重现期、降雨持续时间和雨峰系数为变量进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),全面探究各降雨因素对雨水排水系统溢流的影响。结果表明:节点溢流量和排放口径流量受降雨重现期影响最大;重现期、持续时间和雨峰系数的变化对节点溢流都具有显著性影响,其影响程度从大到小依次为重现期、持续时间、雨峰系数;使用 K-means 聚类对节点溢流多指标综合分析,为未来降雨条件下雨水排水系统溢流风险进行预测。

**关键词:**降雨过程特征;多情景模拟;冗余分析(RDA);综合分析

中图分类号:TU992

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)09-1281-07

## Influence of rainfall process characteristics on overflow of storm water drainage system

HU Haiyang<sup>1</sup>, CHEN Guowei<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The change of rainfall process characteristics is one of the important factors causing urban waterlogging. Using multi-scenario rainfall simulation, this paper conducts a redundancy analysis (RDA) with rainfall recurrence period, rainfall duration and rainfall peak coefficient as variables to comprehensively explore the influence of each rainfall factor on the overflow of storm water drainage system. The results show that the nodal overflow and outlet runoff are most affected by the rainfall recurrence period. The change of recurrence period, duration and rainfall peak coefficient has significant influence on nodal overflow, and the degree of influence in descending order is as follows: recurrence period, duration and rainfall peak coefficient. K-means clustering is used to comprehensively analyze multiple indicators of nodal overflow, and forecast the overflow risk of storm water drainage system under future rainfall conditions.

**Key words:** rainfall process characteristics; multi-scenario simulation; redundancy analysis (RDA); comprehensive analysis

## 0 引 言

城市内涝灾害是最频繁、最严重的自然灾害之一,给人们的生命财产、城市基础设施和经济资源带来巨大的损失,影响着 20 亿人生活<sup>[1-4]</sup>。根

据中国政府公布的灾害记录,从 2001—2018 年每年有超过 4 000 万人受洪水影响,经济损失超过了 100 亿美元<sup>[5]</sup>,城市内涝严重制约着社会经济的可持续发展<sup>[6]</sup>,研究雨水排水系统溢流成因并制定有效的洪水管理措施至关重要<sup>[7]</sup>,其中利用

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42277298)

作者简介:胡海洋(1998—),男,河南襄城人,合肥工业大学硕士生;

陈国炜(1976—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:gwchen@hfut.edu.cn;

刘丽(1976—),女,安徽寿县人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

王钢(1979—),男,浙江东阳人,博士,中国农业大学教授,博士生导师。

数值水文模型对现有城市内涝进行模拟成为研究热点。

现有研究更多集中在模型中添加雨洪管理措施,而降雨因素也是雨水排水系统溢流重要影响因素,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)当中水文模块对降雨量变化更敏感<sup>[8]</sup>,极端降雨影响比城市化进程更大<sup>[9]</sup>,《中国气候变化蓝皮书(2021)》指出 1961—2020 年中国平均年降水量呈增加趋势,平均每 10 年增加 5.1 mm<sup>[10]</sup>,同时全年极端强降雨事件频次也呈现增加趋势<sup>[11]</sup>。另有研究就气候因素对城市内涝影响进行模拟,全球气候变化会影响与水有关的极端降雨事件的频率、强度和持续时间<sup>[12]</sup>,基于未来气候预测建立的 G-GSOIF 模型框架可对城市内涝进行多目标优化<sup>[13]</sup>,文献<sup>[14]</sup>研究各类 LID(low impact development)措施下持续时间、重现期和雨峰系数变化对 LID 雨水排水系统溢流削减效果;文献<sup>[15]</sup>使用主成分分析(principal component analysis, PCA)对土地利用形状、组成、比例和配置等因素变化得到的数据进行分析处理,探究各因素的影响程度。

在降雨过程特征量当中重现期、持续时间和雨峰系数是最主要的 3 个因素,对于降雨过程特征量结果数据,冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种有效的数据分析方法,因此本文针对降雨过程特征量中重现期、持续时间和雨峰系数对雨水排水系统溢流的影响进行多降雨情景模拟,使用 RDA 分析各降雨过程特征量对雨水排水系统溢流状况影响,并对多降雨情景下雨水排水系统溢流状况综合评估,为城市小区域内基于降雨过程特征量的雨水排水系统溢流风险分析提供一定的理论支撑和参考作用。

## 1 模型和方法

### 1.1 数据收集与处理

以合肥市包河区某易涝区域作为研究区域,收集了雨水排水管道布置详图和地形特征数据,如图 1 所示。

研究区域设计总面积 1 267 000 m<sup>2</sup>,地面标高变化范围为 2.5~21.6 m,地形地貌变化起伏小,共划分了 76 个子汇水区、75 个节点和 75 条排水管道,其中单个子汇水区面积大小为 4 700~48 700 m<sup>2</sup>,排水管道长度在 54~393 m 范围内。合肥市包河区属于亚热带湿润季风气候,年平均降雨量为 1 000 mm,雨量主要集中在 5—6 月的梅

雨季节。从腾讯卫星地图取得研究区域分辨率为 0.6 m×0.6 m 数字高程卫星模型中提取出用地规划详细信息,如图 2 所示。

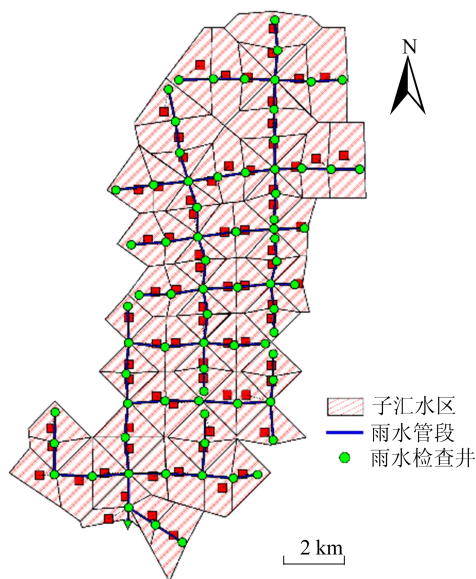


图 1 雨水排水管网布置

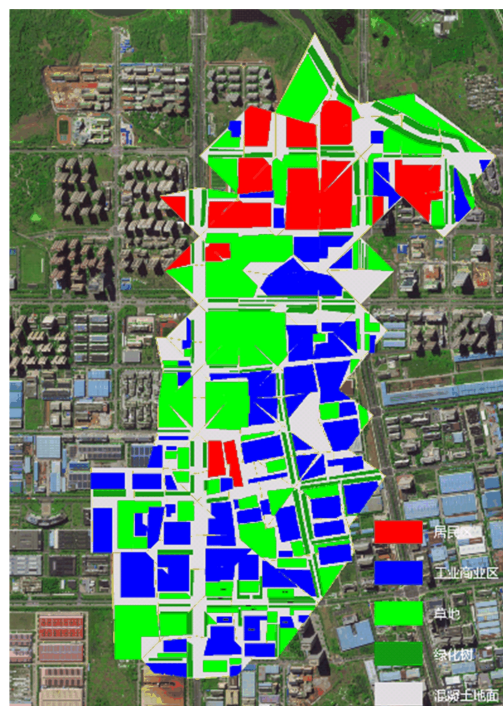


图 2 研究区域土地利用情况

使用 ARCGIS 软件对设计图数据进行处理,原始数据处理完毕后使用插件导入到 SWMM 获得区域概化模型。其中降雨数据在实际过程中由于长期监测成本高、维护管理困难难以获取,需人为选用设计降雨,使用合肥市城建局推荐的芝加哥暴雨强度公式合成的降雨公式如下:

$$q = \frac{3\,600(1 + 0.76 \lg P)}{(t + 14)^{0.84}} \quad (1)$$

其中: $q$  为设计暴雨强度; $P$  为暴雨重现期; $t$  为降雨持续时间。

其余 SWMM 模型的参数参考以往文献经验值,使用综合径流系数法对模型反复调试获取最终参数值,结果见表 1 所列。

表 1 模型参数率定结果

参数	物理意义	最终取值
N-imperv	不透水区域曼宁系数	0.02
N-perv	透水区域的曼宁系数	0.35
Dstore-imperv	不透水区域洼地的蓄水量/mm	3
Dstore-perv	透水区域洼地的蓄水量/mm	7
Conduit roughness	管道的曼宁系数	0.013
%zero-imperv	无洼地蓄水的的天水区域面积比	10
Max. infil. Rate	Horton 模型最大下渗速率/(mm/h)	85
Min. infil. Rate	Horton 模型最小下渗速率/(mm/h)	5
Decay constant	Horton 模型衰减常数	3
Drying time	前期干旱天数/d	7

## 1.2 降雨情景设置

本文主要研究降雨过程特征量对雨水排水系统溢流的影响,参照《室外排水设计规范(GB 50014—2021)》,排除低重现期和短降雨持续时间,进行系统溢流影响研究。参考相关文献[14, 16],设计重现期选择采用 10、20、30、50、100 a 多个重现期;雨峰系数取值范围设置为 0.1~0.9,以 0.1 为时间步长;降雨历时分别取 60、90、120、150、180 min。按照以上条件使用芝加哥雨型生成器合成总计 225 场降雨场景,将其应用在研究区域模型当中,采用 Python 软件 PySWMM 库进行模拟并读取模拟结果。

## 1.3 综合分析方法

RDA<sup>[15]</sup>是一种回归分析结合主成分分析的排序方法,常用在环境领域对微生物多样性研究,反映物种、样本、环境因子之间关系。在本文中用来分析降雨重现期、持续时间和雨峰系数 3 个降雨因素对排放口排放量、下渗量、洼地蓄水量以及节点溢流量多个指标影响,揭示两者之间联系。

K-means 均值聚类<sup>[17]</sup>将数据集中在某些方面相似的数据成员进行分类,本文把多场降雨造成节点溢流状况的多个指标进行综合评估分类。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 降雨过程特征量影响

不同降雨因素对城市排放口径流量、洼地蓄水量、下渗量、节点溢流量变化的影响如图 3 所

以变异系数  $C_v$  作为评判标准,对率定结果进行评价, $C_v$  小于 5% 即认为模型可靠度较高、能较为真实地反映研究区域实际特征,计算得到模拟综合径流系数与实际综合径流系数之间的变异系数在一年一遇 2 h 降雨和二年一遇 2 h 降雨下分别为 -3.9% 和 2.7%,在误差允许范围之内,模型具有较高的合理性。

示。在图 3 中,箱线图显示了中间值、第 1 个和第 3 个四分位数,晶须延伸到在四分位数间距的 1.5 倍内的最远数据点,灰色数据点包含 378 场降雨。

#### 2.1.1 降雨重现期影响

降雨重现期变化增加了单位时间降雨强度和总降雨量,增加降雨量主要以管网排放和节点溢流形式释放。变化过程中地表洼地蓄水量略微增加,增加  $0.45 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,下渗量基本不发生变化;而排放口径流量和节点溢流量会显著增加,排放口径流量增加  $5.14 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,变化幅度为 38.63%,节点溢流量增加  $2.71 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,是初始节点溢流量的 10.3 倍。

#### 2.1.2 雨峰系数影响

雨峰系数变化过程中的降雨总量保持恒定,会导致节点溢流量和地表洼地蓄水量显著增加,而排放口径流量明显下降。雨峰系数增大意味着前期降雨强度减小,即在排水系统排水能力达到上限前,排出初期降雨变少,系统排水能力也会下降。

从图 3 可以看出,排放口径流量大小由  $20.326 \times 10^5 \text{ m}^3$  减至  $16.824 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,变化量为  $3.502 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,下降幅度为 17.3%;下渗量则略微下降,由原来的  $4.143 \times 10^5 \text{ m}^3$  下降至  $3.700 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,变化量为  $0.443 \times 10^5 \text{ m}^3$ ;降雨过程中多余降雨量更多以地表洼地蓄水量和节点溢流量形式呈现,其中地表洼地蓄水量增加,其大小由

$2.40 \times 10^5 \text{ m}^3$  变为  $3.50 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 变化量为  $1.10 \times 10^5 \text{ m}^3$ ; 节点溢流量由  $0.6 \times 10^5 \text{ m}^3$  增长为  $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 变化量为  $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

### 2.1.3 降雨持续时间影响

降雨持续时间延长会使排放口径流量和地表洼地蓄水量明显增加, 但是节点溢流量不受影响, 同时相应的地表下渗量略微下降。降雨过程中地

表下渗量由  $4.156 \times 10^5 \text{ m}^3$  降为  $3.700 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 洼地蓄水量则由  $1.67 \times 10^5 \text{ m}^3$  增加到  $3.34 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 增长了 1 倍, 说明洼地蓄水量与降雨时间关系密切; 排放口径流量由  $15.060 \times 10^5 \text{ m}^3$  增至  $20.526 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 降雨持续时间延长会增强雨水管网排水能力, 直至 180 min 达到排水系统排放能力上限。

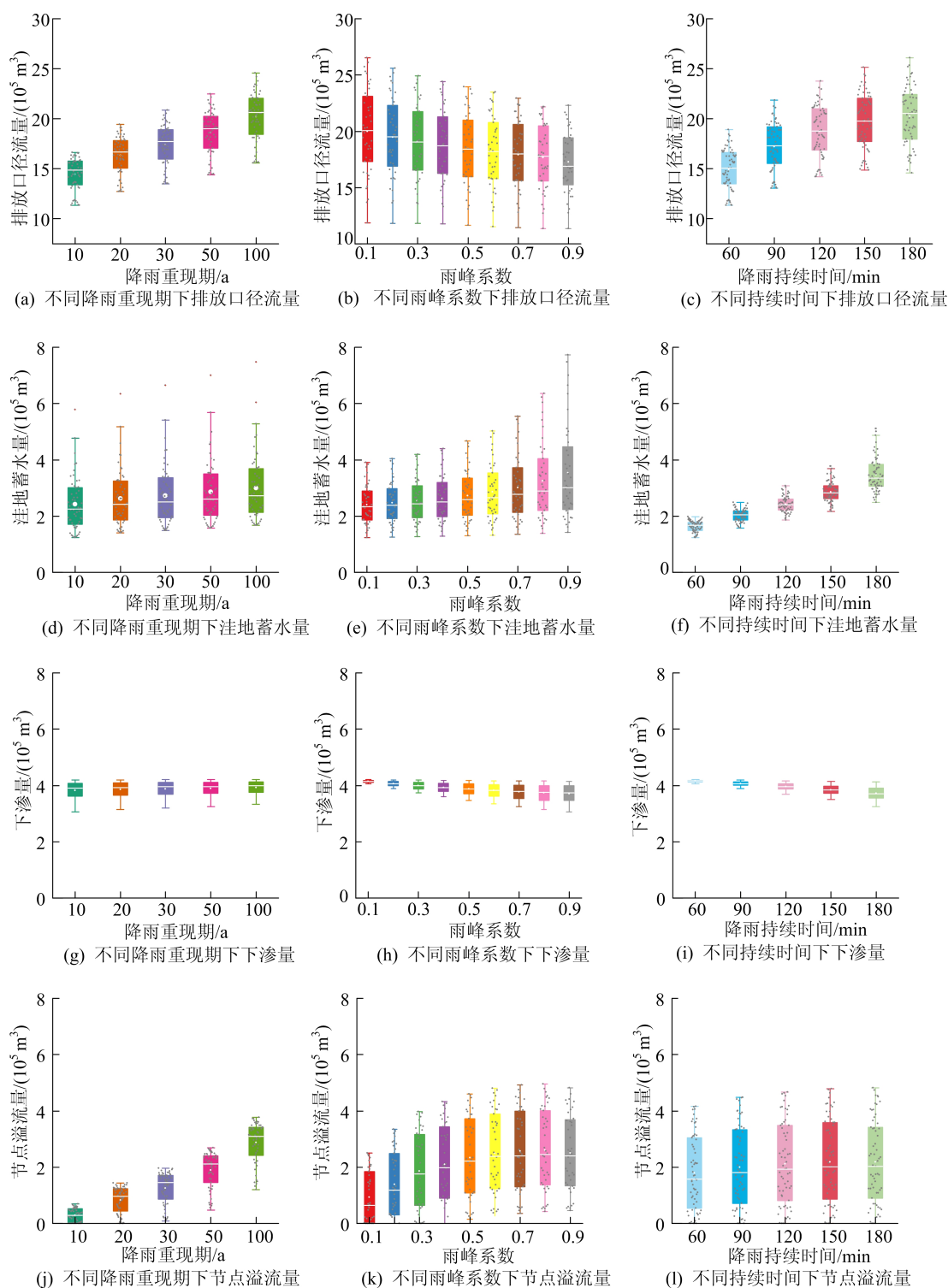


图 3 降雨过程特征量影响箱线图

不同降雨过程特征量对排放口径流量、洼地蓄水量、下渗量、节点溢流量影响 RDA 分析如图 4 所示。节点溢流量和排放口径流量受降雨重现期影响最大,可能是由于管道径流量对总降雨量比较敏感,而重现期的变化能显著增加总降雨量;地表洼地蓄水量则受降雨持续时间影响最大,其次是雨峰系数,而受降雨重现期影响较小,说明洼地蓄水量与降雨历时关系更大;而下渗量与雨峰系数、降雨持续时间变化呈现明显负相关关系,与降雨重现期相关性则较弱。

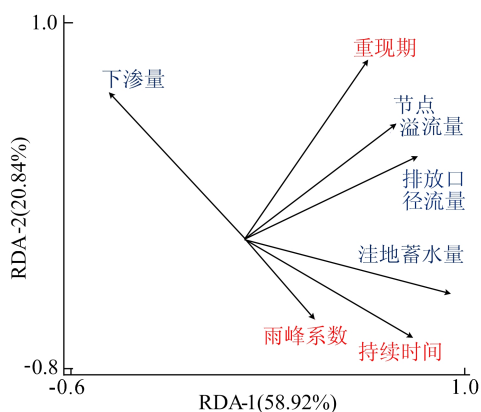


图 4 降雨过程特征量 RDA 图

图 4 中 RDA-1、RDA-2 轴分别有 58.92%、20.84% 的几率解释上述数据,同时在众多数据降维组成的 RDA-1 与 RDA-2 坐标轴中,降雨持续时间贡献度为 47.6%,降雨重现期贡献度为 33.0%,而雨峰系数的贡献度只有 19.4%,说明降雨持续时间和降雨重现期较为重要,但 3 个因素对于降雨分布的影响都具有极显著效果。

### 2.2 雨水排水管网中各节点溢流状况分析

多降雨情景下各汇水区节点溢流量占比如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在所有节点进流量中溢流量占比可以分为 3 部分,其中溢流量占比较小的部分基本集中在 0.10% 以下,包括节点 4、5、6、11、15、16、18、19、20、22、25 等 33 处节点;而溢流量占比较大的部分在 0.10%~10.00% 范围内浮动,包括节点 8、27、34、36、42、46、49、55、60、70、71 等 28 处节点;剩余的节点 2、3、8、34 等溢流状况较为严重,但是其情况比较罕见,存在溢流量占比超过 10.00% 的情况。这些溢流量占比较大部分的节点现有设置不合理,需要进行改造来减缓节点溢流状况。

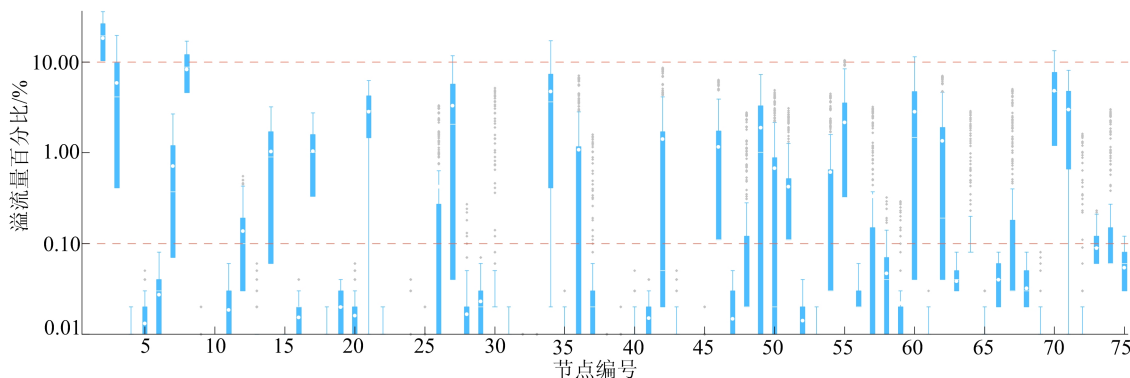


图 5 多降雨情景下各汇水区节点溢流量占比箱线图

相比模拟结果所给的节点溢流量,溢流量与进流量的比值能反映节点转输能力。模拟结果中在节点 21 处的溢流量比节点 2、3 处的溢流量大很多,这是由于节点 21 处于排水系统主干管的下游,转输流量更多,但是节点 2、3 位于排水管道起始位置处就开始产生较大的溢流量,说明该节点处管道设计严重不合理,若能将节点 3 处问题解决,则下游节点 21 处的溢流问题将得到极大缓解。

各降雨因素对节点溢流指标 RDA 相关性分析如图 6 所示。节点溢流多个指标整体受降雨重

现期变化最明显,其中峰值溢流速率和溢流时间受降雨重现期影响最大;而节点的超载时间与降雨持续时间的关系较大,与雨峰系数成负相关;节点溢流量对降雨持续时间变化最为敏感,雨峰系数对其也有影响效果,但是降雨持续时间基本不影响节点溢流量。

图 6 中 RDA-1、RDA-2 轴分别有 77.83%、4.38% 的几率解释上述数据,同时在众多数据降维组成的 RDA-1 与 RDA-2 坐标轴中,降雨持续时间的贡献度为 87.5%,降雨重现期贡献度为 10.0%,而雨峰系数的贡献度只有 2.0%,说明降

雨持续时间最重要,但 3 个因素对于降雨分布的影响都具有极显著效果。

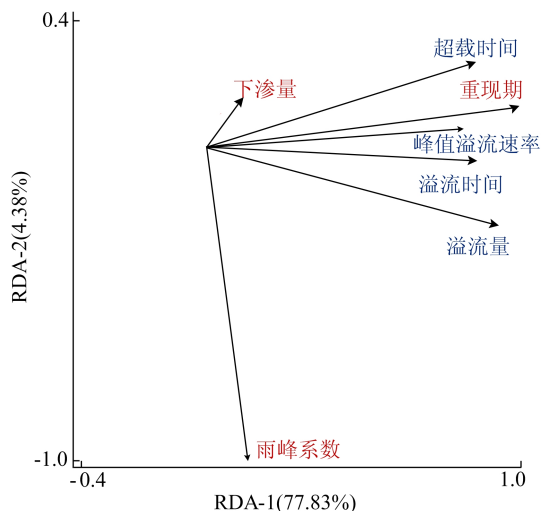
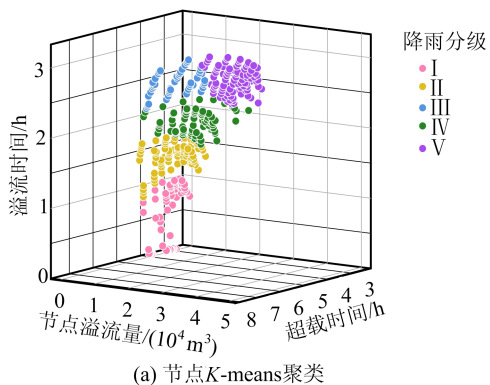


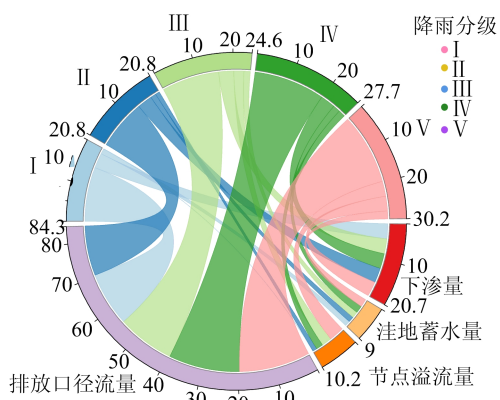
图 6 降雨过程特征量对节点溢流指标 RDA 分析

### 2.3 雨水排水系统溢流状况综合评估

多降雨情景下雨水排水系统溢流状况综合评估如图 7 所示。



(a) 节点K-means聚类



(b) 降雨特征分布弦图

图 7 雨水排水系统溢流状况综合评估

从图 7a 可以看出,多降雨情景下模型模拟结果,将降雨持续时间、降雨重现期和雨峰系数三因

素控制下城市节点溢流多个指标进行 K-means 聚类,按照节点内涝程度划分为 5 类,根据分类状况随着等级的提高更多降雨会以城市节点溢流形式释放,按照此方法对三因素控制的众多降雨划分,参考未来降雨状况即可对未来的雨水排水系统溢流状况进行预估和规划。

从图 7b 可以看出,聚类后 5 类降雨下渗能力基本保持不变,但是不同级别的降雨下,其排放口径流量有明显变化趋势,同时地表洼地蓄水量稍有增加。节点内涝溢流状况随着降雨级别变化也在显著增加,说明按照此聚类方法对未来降雨所产生的雨水排水系统溢流状况有很好的评估效果。

### 3 结 论

本研究建立区域排涝模型,对多降雨情景下雨水排水管网进行模拟并使用 RDA 分析雨水排水系统溢流风险,以合肥市某易涝区域为例,得出结论如下。

1) 节点溢流量和排放口径流量受降雨重现期影响最大,地表洼地蓄水量受降雨持续时间影响最大,下渗量与雨峰系数、降雨持续时间变化呈现明显负相关关系。

2) 各降雨过程特征量对城市节点溢流状况的影响从大到小依次为降雨重现期、降雨持续时间、雨峰系数,三者的变化对节点溢流状况都具有显著影响。

3) 采用现有多降雨情景下模拟结果, K-means能够对城市节点溢流状况进行综合评估并建立降雨分级,用于未来降雨对产生的雨水排水系统溢流风险进行预估。

### [参 考 文 献]

[1] PENG J, YU L, CUI Y, et al. Application of SWMM 5.1 in flood simulation of sponge airport facilities[J]. Water Science & Technology, 2020, 81(6):1264-1272.

[2] ZHOU Q, LUO J, SU J, et al. Impacts of changing drainage indicators on urban flood volumes in historical urbanization in the case of Northern China[J]. Urban Water Journal, 2021, 18(7):487-498.

[3] LI F, YAN X F, DUAN H F. Sustainable design of urban stormwater drainage systems by implementing detention tank and lid measures for flooding risk control and water quality management [J]. Water Resources Management, 2019, 33(9):3271-3288.

[4] QI W, MA C, XU H, et al. A comprehensive analysis meth-

- od of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135:108565.
- [5] LI C, LIU M, HU Y, et al. Spatial distribution patterns and potential exposure risks of urban floods in Chinese megacities[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610:127838.
- [6] QI W, MA C, XU H, et al. Urban flood response analysis for designed rainstorms with different characteristics based on a tracer-aided modeling simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355:131797.
- [7] WANG Y, LIU Z, WANG G, et al. Cellular automata based framework for evaluating mitigation strategies of sponge city [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796:148991.
- [8] BAEK S S, LIGARAY M, PYO J, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586:124886.
- [9] GUPTHA G C, SWAIN S, ALANSARI N, et al. Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban drainage system: a case study of Gurugram City, India [J]. *Urban Climate*, 2022, 41:16.
- [10] 辛雨.《中国气候变化蓝皮书(2021)》发布 [N]. *中国科学报*, 2021-08-05.
- [11] TABARI H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):13768.
- [12] CANN K F, THOMAS D R, SALMON R L, et al. Extreme water-related weather events and waterborne disease [J]. *Epidemiology and Infection*, 2013, 141 (4): 671-686.
- [13] GAO Z, ZHANG Q H, XIE Y D, et al. A novel multi-objective optimization framework for urban green-gray infrastructure implementation under impacts of climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825:153954.
- [14] QIN H P, LI Z X, FU G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129:577-585.
- [15] LUO Z, TIAN J, ZENG J, et al. Resilient landscape pattern for reducing coastal flood susceptibility[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856:159087.
- [16] LI J, BORTOLOTTI Z J. Quantifying the impacts of land cover change on catchment-scale urban flooding by classifying aerial images [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 344:130992.
- [17] LIU L, LI X, XIA G, et al. Spatial fuzzy clustering approach to characterize flood risk in urban storm water drainage systems [J]. *Natural Hazards*, 2016, 83: 1469-1483.

(责任编辑 吴 亮)

**(上接第 1280 页)**

- [5] PATEL D, TIWARI R P, SHRIVASTAVA R, et al. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199:406-415.
- [6] 余小小, 李如燕, 董祥, 等. 机械力粉磨对再生微粉性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2017, 46(4):688-692.
- [7] ZHI G, GAO Z, SUN R, et al. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 289-293.
- [8] 翟梦怡, 赵计辉, 王栋民. 锂渣粉作为辅助胶凝材料在水泥基材料的研究进[J]. *材料导报*, 2017, 31(5):139-144.
- [9] 张圣彩, 耿欧, 赵桂云. 再生微粉混凝土的抗压强度及其活性激发[J]. *混凝土*, 2015(11):49-52.
- [10] SHI C, DAY R L. Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends [J]. *Advances in Cement Research*, 1999, 11(4):189-196.
- [11] SZEREMENT J, SZATANILKLOC A, JAROSE R, et al. Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311(2014):127461.
- [12] YANG Y, KANG Z, ZHAN B, et al. Short review of recycled powder in cement-based materials: preparation, performance and activity excitation [J]. *Buildings*, 2022, 12:1568.
- [13] ALENA S, PAK M. The effect of a high amount of microfillers on the long-term properties of concrete[J]. *Materials*, 2019, 12(20):3421.
- [14] 杨南如. 机械力化学过程及效应(I): 机械力化学效应[J]. *建筑材料学报*, 2000, 3(1):19-26.
- [15] YUAN C, WANG D, SETIAWAN H, et al. Effect and mechanism of different excitation modes on the activities of the recycled brick micropowder[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28(1):676-688.
- [16] FLOREA M, NING Z, BROUWERS H. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50:1-12.
- [17] 刘聪. 碱激发再生微粉胶凝材料制备及其应用研究[D]. 扬州:扬州大学, 2021.
- [18] 田青, 屈孟娇, 张苗, 等. 废弃混凝土再生微粉激活方式研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8):2476-2485.
- [19] 马保国, 高立, 蹇守卫, 等. 激发剂对废弃加气混凝土活性的影响及其机理研究 [J]. *材料导报*, 2011, 25 (8): 111-114.

(责任编辑 吴 亮)