

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.012

基于时空聚类的上海内涝积水时空分布规律

周正正^{1,2}, 徐嘉言¹, 刘曙光^{1,3}, 万 晖⁴, 孙 丽⁴, 刘 炎⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030;
3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 4. 上海市水旱灾害防御技术中心, 上海 200050)

摘要: 极端暴雨频发和快速城市化背景下, 内涝积水是当前城市发展面临的重要挑战。研究基于2013—2023年上海市积水数据, 采用K-means聚类和概率密度分析方法, 探讨了内涝积水的季节性、空间分布及典型暴雨积水过程特征。结果表明: ①内涝积水季节性显著, 夏季高发, 与台风暴雨同期性强; ②道路积水是最主要的积水类型, 空间异质性突出, 中心城区为高频发生区, 主要受限于排水系统的局限性和调蓄空间不足; ③K-means聚类识别的3类积水事件中, 高风险区域集中在嘉定与市区的交界处, 水深较大; ④典型暴雨积水过程呈现“快积快消”特征, 且持续时间小于等于10 h, 建议风险预警时间控制在40 min以内。研究成果可为提升城市内涝治理的精细化管理和应急响应能力提供关键支撑。

关键词: 城市内涝; K-means聚类; 概率密度分析; 时空分布; 上海

中图分类号: TV8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2025)02-0307-13

气候变化和快速城市化背景下, 极端暴雨事件增多趋强^[1-2], 城市内涝积水问题变得尤为复杂和紧迫^[3]。全球气候变化加剧了极端降水事件的发生频率和强度, 给城市防洪系统带来了前所未有的压力^[4]。同时, 城市化导致地面硬化、水域面积缩减, 显著加速了城市降雨-径流响应^[5-6], 导致地表径流量和汇流速度大幅增加, 然而城市排水系统的更新和扩容未能同步跟上水文响应的快速变化, 排水能力不足的问题日益凸显, 进一步加剧了内涝问题^[3]。因此, 深入掌握当前城市暴雨内涝积水时空分布规律已成为提升内涝防治与城市韧性的首要关键^[7]。

当前, 城市内涝积水分布规律的研究主要依赖于观测数据分析和数值模拟2种手段。基于观测数据的研究一般通过分析历史数据来研究城市内涝积水的时空分布及风险等级等。例如, 上海、广州等城市内涝风险等级划分标准中, 通常依据典型内涝事件的积水监测数据, 结合积水水深、积水时间、积水面积等关键特征进行内涝风险等级划分, 也有学者利用类似的手段, 基于场次积水监测数据, 采用百分位数法^[8-9]、专家调查^[10]等开展了城市内涝风险等级划分标准的研究; 此外, 李学峰等^[11]在上海市中心城区开展了基于指标体系法的内涝风险评估, 并识别出内涝高风险区域; 张乾柱等^[12]采用聚类分析方法开展了重庆市山洪灾害风险区划研究, 验证了聚类分析技术在多维度数据处理和内涝风险区划中的有效性。这些研究基于观测数据分析了内涝的时空分布特征, 但大多存在时间或空间尺度的局限性。在数值模拟方面, 研究者通过构建水文水动力模型探讨了内涝积水的形成机理和风险分布^[13]。例如, 薛丰昌等^[14]模拟了郑州市27场典型暴雨积水过程, 评估了区域积水风险并绘制了区域内涝预报图; 王建明^[15]基于SWMM模型模拟了西安市暴雨排水过程, 并提出了暴雨内涝灾害风险评估模型; Gigović等^[16]结合GIS和多准则决策分析方法, 对城市洪涝易发区进行风险评估。可见, 数值模拟技术在内涝风险评估中展现出优势, 但其适用性往

收稿日期: 2024-12-16; 网络出版日期: 2025-04-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250408.1033.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371030; 42271031)

作者简介: 周正正(1988—), 女, 浙江舟山人, 副教授, 主要从事城市水文方面研究。E-mail: 19058@tongji.edu.cn

通信作者: 刘曙光, E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn

往依赖于特定情景假设且受制于高精度输入数据的可获取性,难以有效反映复杂城市环境下内涝的长期演化规律。

尽管现有研究在内涝积水的时空分布分析和风险评估方面取得了一定成果,但大多数研究仍局限于较短时间范围或有限场次的积水深度数据的分析,无法全面描述包括范围、时间、类型等高度化城市地区内涝关键特征的时空分布规律^[17],亟待采用长序列、多时空尺度的观测数据,结合聚类分析等数据挖掘方法,增强对内涝积水深度变化、季节性、积水点分布等问题的认识,掌握区域性内涝积水的时空分布规律^[18-19],从而为制定多要素、多场景的城市内涝积水风险等级划分标准提供科学依据,也为提升城市内涝治理的精细化管理和应急响应能力提供关键支撑。上海作为中国的经济和人口中心,其独特的地理位置使其极易受到台风、暴雨、天文大潮、洪水等多种灾害的叠加影响^[20-21],导致内涝积水风险持续加剧^[22]。

本文以上海市为研究对象,基于 2013—2023 年长时间序列的内涝积水观测数据,采用 K-means 聚类算法和概率密度分布分析法,从长期趋势与典型场次相结合的角度,探讨不同类型(道路、下立交和小区等)内涝积水的关键特征,分析上海市内涝积水的季节性变化、时效性特征和空间聚集性。旨在揭示高密度城市环境下不同类型内涝积水的时空分布规律,为优化内涝风险预警机制、提升城市应急响应和精准防御能力提供科学依据。

1 研究区域及数据资料

上海市位于亚热带南缘和东亚季风区,地处长江流域和太湖流域最下游,滨江临海,地势低平,属于典型的平原感潮河网地区。全市年平均气温为 16.9℃,年均降水量约 1 244.0 mm,其中超过 53% 的降水集中在 6—9 月的汛期。受东亚季风和西太平洋副热带高压等影响,上海夏季降水多呈现突发性和高强度特征^[20-21]。尤其是近年来,极端暴雨事件在上海的发生频率和强度不断上升^[23],同时,城市建设用地面积显著增长,绿地和水面减少^[22],上海水患呈现出复杂、多变、突发的态势^[24],其影响在城市中心区和低洼地带尤为显著^[25-26]。例如,2022 年“梅花”台风、2021 年“烟花”台风期间^[27]上海均面临多处路段严重积水问题,给城市防洪、排水等基础设施运行与应急管理提出了更高要求^[28]。当前上海全市 608 处下立交与密集的主次干道网络构成内涝敏感空间载体,其中市中心区域道路网最为密集,但中心城区河湖水面率仅 5.72%,显著低于郊区 10%~15% 的水平。

本文所采用的积水数据是由上海市水务局提供的 2013—2023 年期间按暴雨日收集的 2 228 条积水条记录,涉及 701 个积水点(图 1(b)),积水数据信息包含积水点类型、积水点位置(经纬度)、积水水深和积水日期等。数据的质量控制确保了其准确性和代表性,包括统一数据格式、去除重复记录、剔除异常值及处理缺失数据等。积水点类型分为 3 类:道路、下立交和居民区(在本研究中,下立交积水和道路积水分别为单独的类型),其中,道路积水次数最多,为 1 317 次,占比 59%;下立交积水次之,为 852 次;居民区积水最少,为 59 次。

从积水点位置上看(图 1(b)),市区积水点 315 个,其中普陀区积水点最多,共 116 个;郊区积水点 329 个,其中浦东新区积水点最多,共 128 个(图 1)。从积水次数上看,上海市中心区域(包含静安区、虹口区、杨浦区、普陀区、黄浦区、长宁区、徐汇区)积水点数总上报次数接近 800 次,远多于其他行政区,其中普陀区的积水点位数量明显多于市中心其他区域;市中心以外,各个行政区中浦东新区积水次数最多(521 次),其次为嘉定区(268 次),崇明区最少(14 次)。同时,为分析内涝积水的动态演化过程,本研究选取了 2013—2023 年间的 57 场典型暴雨积水事件,并利用全市 200 个自动积水监测点提取分钟级水位数据。

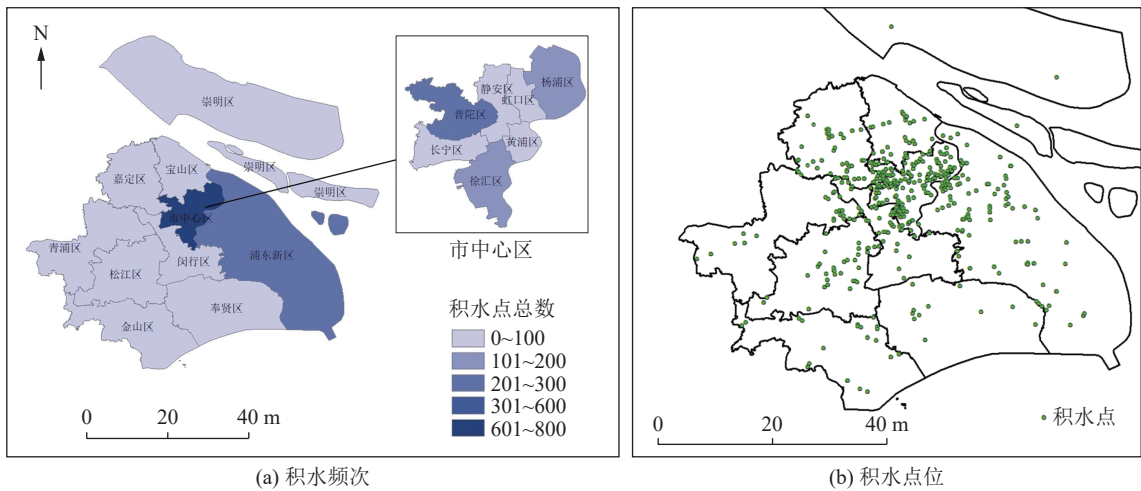


图1 2013—2023年上海市积水频次和积水点位分布

Fig. 1 Distribution of waterlogging frequency and waterlogging points across Shanghai from 2013 to 2023

2 研究方法

2.1 内涝积水特征指标

为量化描述内涝积水过程的关键特征, 包括积水的持续性、积水深度的动态变化及积水过程的快速性, 构建了以下积水特征指标。

(1) 积水持续时间 (T_{total}), 定义为从积水开始到完全退去的时长:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{st}} - T_{\text{end}} \quad (1)$$

式中: T_{st} 和 T_{end} 分别为积水开始和完全退去的时间点; 定义 $D(t)$ 为 t 时刻的积水深度, 满足 $D(T_{\text{st}}) = 0$ 且 $D(T_{\text{end}}) = 0$ 。

(2) 积水上升时间 (T_{rise}), 用于衡量积水过程的上升速度, 定义为积水深度从 0 达到峰值的时长:

$$T_{\text{rise}} = T_{\text{max}} - T_{\text{st}} \quad (2)$$

式中: T_{max} 为积水深度达到峰值的时间, 满足 $D(T_{\text{max}}) = \max(D(t)), t \in [T_{\text{st}}, T_{\text{end}}]$ 。

(3) 积水影响持续时间, 用于衡量对日常交通和居民生活产生一定深度积水的影响持续时间。参考国内现有城市内涝等级划分标准和《上海市防汛工作手册》^[29], 本研究定义了 2 种影响持续时间: 积水深度持续在全过程水深 25% 分位数以上的时间 ($T_{25\%}$) 和积水深度持续在 10 cm 以上的时间 ($T_{10\text{cm}}$)。

$T_{25\%}$ 用于衡量积水深度维持在较深程度的持续时间, 反映水深超过此分位数的持续时间对防汛的影响较为显著:

$$T_{25\%} = \int_{T_{\text{st}}}^{T_{\text{end}}} I_{D(t) \geq D_{25\%}} dt \quad (3)$$

式中: $D_{25\%}$ 为积水全过程中积水深度的 25% 分位数; $I_{D(t) \geq D_{25\%}}$ 为指示函数, 当 $D(t) \geq D_{25\%}$ 时取值为 1, 否则取值为 0。

$T_{10\text{cm}}$ 侧重考虑居民区积水的类型(《上海市防汛工作手册》中定义街坊积水阈值为 10 cm):

$$T_{10\text{cm}} = \int_{T_{\text{st}}}^{T_{\text{end}}} I_{D(t) \geq 10} dt \quad (4)$$

式中: $I_{D(t) \geq 10}$ 为指示函数, 当 $D(t) \geq 10$ cm 时取值为 1, 否则取值为 0。

(4) 积水过程的峰值系数 (R_{peak}), 用于衡量积水过程的快速性, 定义为积水深度达到最大值所需时间与积水持续时间的比值。该值越小, 表示积水在短时间内迅速达到峰值, 积水速率快; 反之, 值越大, 表明

积水上升过程较为缓慢。

$$R_{\text{peak}} = T_{\text{rise}} / T_{\text{total}} \quad (5)$$

2.2 概率密度分布分析

概率密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)是一种非参数统计方法,可用于分析空间数据的聚集特征及其分布趋势,适用于本研究中非均匀分布的内涝积水数据。KDE通过对每个数据点赋予一个核函数,将其空间分布映射为一个平滑的概率密度函数,从而能够描述数据在空间上的连续分布。设定第 i 个积水点的坐标为 (x_i, y_i) ,在本研究中由积水点的经纬度坐标代入, $f(x, y)$ 是其在位置 (x, y) 处的空间分布密度函数:

$$f(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{h^2}\right) \quad (6)$$

式中: K 为核函数,本研究选用二维高斯核函数(2D Gaussian Kernel); h 为带宽,决定了核密度估计的平滑程度; n 为积水点总数。

带宽对估计结果影响显著,如果 h 过小或过大,会造成曲线过拟合或欠拟合。本文采用交叉验证(Cross-Validation, CV)方法优化带宽,选取误差最小的带宽作为最优值,以使估计密度函数 $f(x, y)$ 准确地逼近真实分布。

2.3 K-means 聚类分析

K-means 聚类是一种基于迭代优化的非监督学习算法,适用于大规模数据的分类。本研究采用 K-means 聚类对积水事件的空间分布(距离市中心的距离)、日期特征和积水深度等多维特征进行分组,以识别不同类型积水的时空分布特征。

K-means 算法通过将积水数据点分为 k 个簇(Cluster),使得每个簇内的样本之间的相似度最大,而不同簇之间的相似度最小。具体步骤如下:

- (1)初始化:随机选择 k 个簇中心。
- (2)分配:将每个数据点分配到离其最近的簇中心。
- (3)更新:重新计算每个簇的中心,即该簇内所有点的均值。

(4)迭代:重复步骤(2)和(3),直到簇中心不再发生变化或达到最大迭代次数。本研究通过设置最大迭代系数,防止收敛速度过慢。

K-means 算法的目标是最小化簇内样本点的平方误差总和(Within-Cluster Sum of Squares, S_{WCS}),即

$$S_{\text{WCS}} = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (7)$$

式中: C_i 为第 i 个簇; μ_i 为簇 C_i 的中心; x_j 为簇 C_i 中的数据点。通过迭代优化,最终确定最佳的簇分配。

聚类效果受簇数(k)影响较大,选择合理的 k 值至关重要。本研究采用轮廓系数(Silhouette Score)和肘部法(Elbow Method)^[30-31]来选择最佳 k 值。轮廓系数衡量簇间距离和簇内紧密度,数值越高表示聚类效果越好;肘部法的目标是找到使得误差平方和(Sum of Squares due to Error, SSE)明显下降的拐点,即“肘部”位置来确定最优 k 。

3 结果与分析

3.1 内涝积水时空分布分析

3.1.1 内涝积水发生频次分析

根据 2013—2023 年上海市内涝积水频次的年际变化(图 2),可见上海市内涝积水频次的年际变化趋势

不显著。尽管总积水次数略有下降, 但不同类型的积水事件呈现出不同的变化趋势。道路积水仍然是最主要的积水类型, 频次虽有波动但呈下降趋势; 相比之下, 下立交积水和居民区积水事件则呈略微增加的趋势, 这一变化表明, 未来应关注下立交和居民区的排水能力和内涝风险管理。

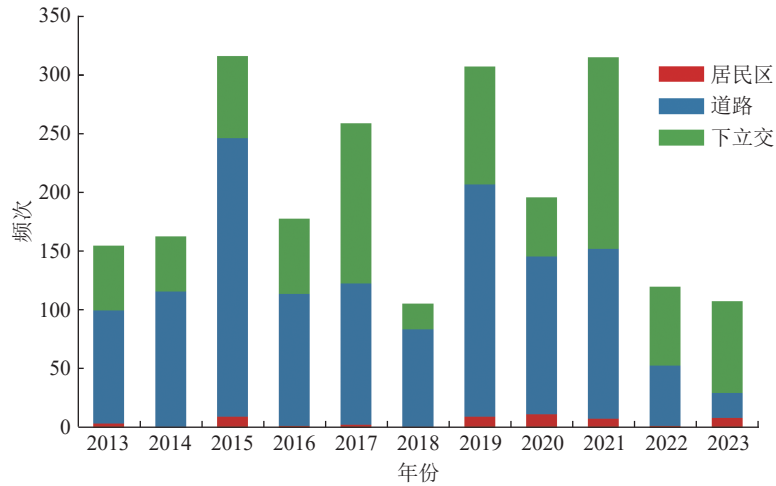


图2 2013—2023年上海市内涝积水频次的年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of waterlogging frequency in Shanghai from 2013 to 2023

从年内分布来看(图3(a)), 内涝积水表现出显著的季节性特征。高频发生的月份为6—8月, 其中8月的频次最高, 而春季和冬季积水发生频次相对较低, 11月至次年2月几乎为零。进一步分析不同类型的积水发现, 道路积水在8月的发生频次最高, 6月次之; 下立交积水在7月最为频繁, 8月次之, 3月、4月和10月偶有发生; 居民区积水在8月最为集中, 6月和7月次之, 10月偶发。

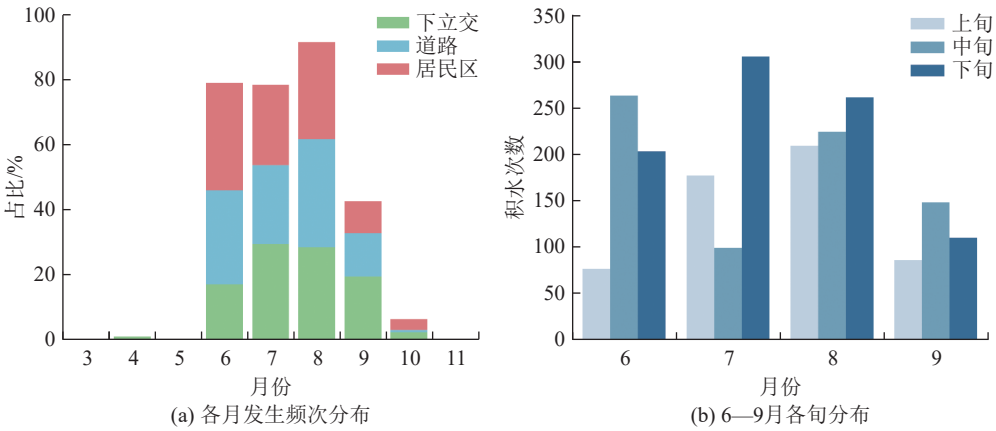


图3 上海市内涝积水事件发生的年内分布情况

Fig. 3 Intra-annual distribution of waterlogging events in Shanghai

汛期(6—9月)内涝事件的旬际分布(图3(b))显示, 6月和9月的积水事件通常在当月中旬高发, 下旬次之, 上旬积水频次较低; 而7月和8月的积水事件则普遍集中在下旬。从各旬频次的比较来看, 7月下旬的积水事件频次最高, 且显著高于其他旬, 6月中旬和8月下旬次之。可见, 7月下旬和8月下旬是内涝积水的高发期, 这与上海暴雨的季节性分布密切相关: 6月积水多半是梅雨期间暴雨引发, 而7月和8月的高频内涝积水与台风暴雨或强对流暴雨过程高度相关。由此可见, 分析防汛重点时期的气候特征和天气影响对

提升内涝防控能力至关重要。未来研究将进一步探讨降水特征与内涝之间的关系，本文在此不作详细讨论。

总体而言，尽管 2013—2023 年间上海市内涝积水的年际变化较小，但积水发生仍表现出强烈的季节性分布特征，其中 7 月下旬和 8 月下旬最为显著。此外，2015 年 6 月 17 日的极端降水事件导致单日上报积水次数超过 100 次，为研究期内积水上报频次最多的一次。

3.1.2 内涝积水深度分析

积水深度的分析结果(图 4)表明，大多数积水事件的水深集中在 16~80 cm 之间(10%~90% 分位数区间)，平均水深为 37.3 cm，瞬时最大水深可达 165.0 cm，出现在下立交积水事件中。不同积水类型在频率和分布范围上存在明显差异(图 5)。道路积水的发生频次最多，水深分布较广，均值略高而中位数略低，与居民区中位数一致，表明道路积水在某些区域发生频率较高，且其影响范围较广；与道路积水相比，下立交积水的分布范围相对较窄，且分布形态更为集中，但均值显著高于中位数，接近 75% 分位数，说明水深波动比道路小，整体水深较大；居民区积水则更窄且更集中，中位数和均值都较低，分布较为平稳，说明该类积水空间差异性较低。

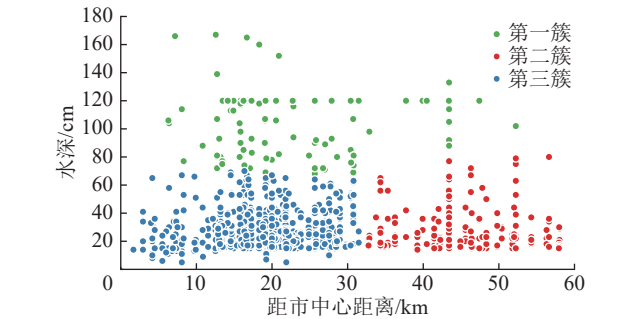


图 4 2013—2023 年上海市内涝积水深度散点图
Fig. 4 Scatter plot of waterlogging depth in Shanghai from 2013 to 2023

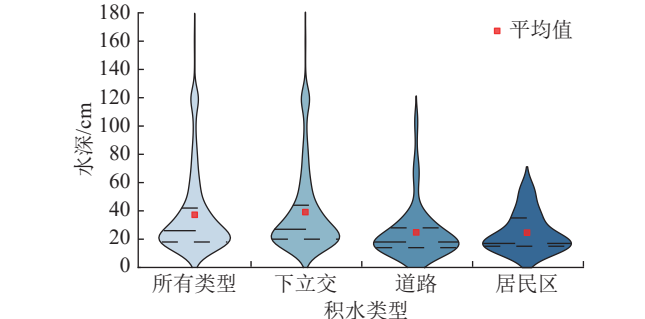


图 5 上海市不同类型内涝积水深度小提琴图
Fig. 5 Violin plots of waterlogging depth for different types in Shanghai

3.1.3 积水点位置分析

基于 KDE 对积水点的空间分布特征进行分析(图 6)，上海市内涝积水概率的空间分布呈现出由市中心向周边递减的趋势，积水事件在市中心区域(外环内)尤为高发，尤其在普陀区及其附近，积水概率最高，表明市中心区域的内涝问题更为集中。不同类型的积水事件在空间分布上的特征也存在差异(表 1)：道路积水的空间聚集性更强，市中心区域发生概率显著高于其他区域；下立交积水集中发生在郊区，如嘉定区南部、闵行区及浦东新区等；居民区积水事件尽管总体概率较低，但也呈现出市中心向周边逐渐递减的分布趋势，反映了局部居民区在内涝问题中的潜在脆弱性。这一现象与以下几个因素密切相关：①市中心排水系统的局限性，上海市中心城区以强排为主，其他地区以自排为主^[27]。根据《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035 年)》要求，中心城区排水标准需从 1 年一遇提高到 5 年一遇，表明市中心现有排水系统面临较大压力，亟待排水提标。②中心城区调蓄空间不足，上海的城镇排涝设施主要由“河湖水网+泵闸”组成，但河道分布不均，中心城区河湖水面率仅 5.72%，河道密度低且水系不完善，调蓄空间有限；而郊区河湖水面率基本维持在 10%~15%，排水能力较强。③人口密度与基础设施压力，根据《2023 年上海统计年鉴》显示，上海市中心人口密度远超郊区，市中心各行政区的人口密度均在 1.7 万人/km² 以上，远超郊区的 0.9 万人/km²。人口与基础设施的高度集聚进一步增加了市中心排水设施的承载压力。④地理因素影响，上海地势低平，受潮汐影响显著，当遭受台风、暴雨、天文大潮、洪水等多碰头情景下，市中心、黄浦江沿岸面临的排水压力更大。综上所述，上海市中心的内涝问题源于多重因素的叠加，因此，提升排水系统标准、增

加调蓄空间、优化城市基础设施建设是解决内涝问题的关键措施^[24, 29]。

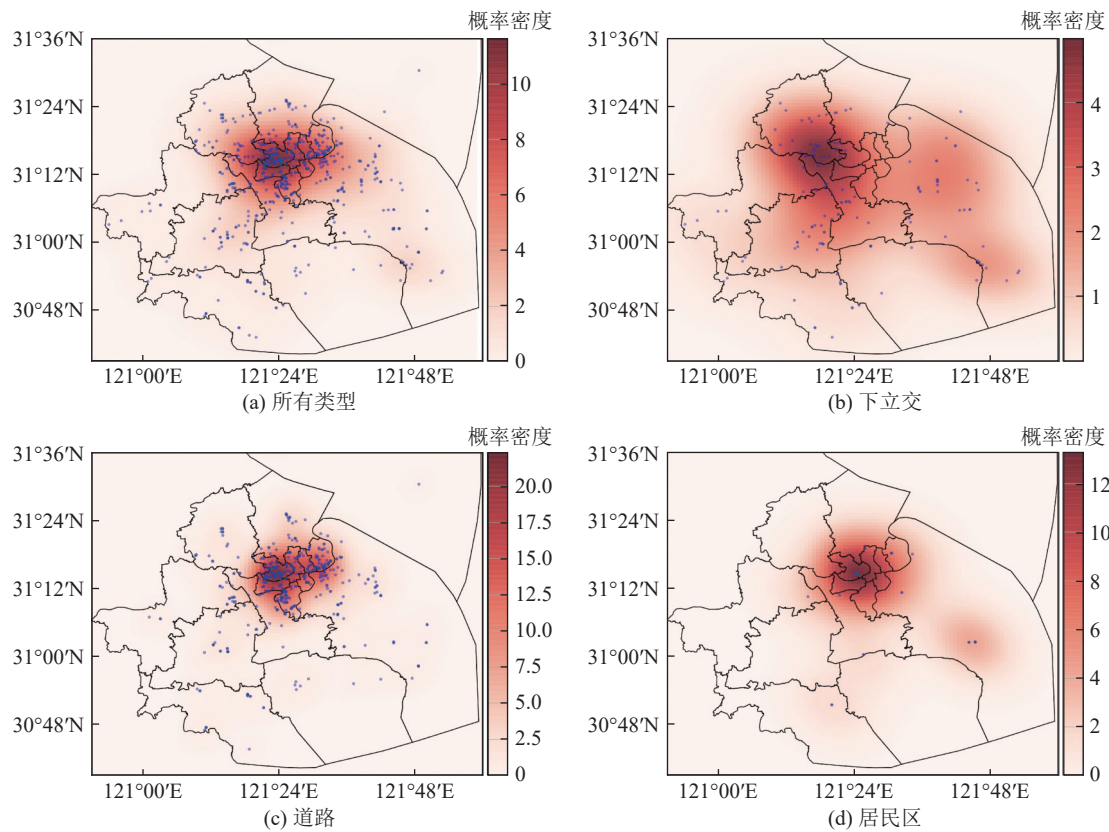


图6 上海市积水概率空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of waterlogging probability in Shanghai

表1 上海市不同类型积水事件的时空分布特征

Table 1 Spatiotemporal characteristics of different types of waterlogging events in Shanghai

积水类型	积水频次	年内分布特征	空间分布特征	平均水深/cm
道路	1 317(59%)	8月发生频次最高, 6月次之	空间聚集性强, 市中心区域发生概率最高	24.8
下立交	852(38%)	7月发生频次最高, 8月次之, 3—4月和10月偶发	郊区, 如嘉定区南部、闵行区及浦东新区等	39.1
居民区	59(3%)	8月发生频次最高, 6月和7月持平, 10月偶发	分布较分散	22.5

3.2 K-means 聚类分析

为了进一步分析上海市内涝积水的空间特征, 选取了积水点到市中心(人民广场)的距离、积水深度和发生日期(年月日)作为分类特征, 采用 K-means 聚类方法对积水事件进行分类。轮廓系数和肘部法的评估结果表明(表2), 当聚类数 k 为 2~4 时, SSE 显著下降, 随后趋于平缓, 说明增加更多聚类数量对误差的降低效果逐渐减弱。同时, 轮廓系数在 $k=2$ 和 $k=4$ 时表现最佳, $k=3$ 时略差。综合考虑聚类效果和实际意义, 最终选择 $k=3$ 作为最优聚类数。

采用 SHAP(Shapley Additive Explanations)量化分析 3 个特征对聚类结果的影响(图7), SHAP 值的大小表示该特征对分类结果的贡献程度。结果显示, 距市中心的距离对聚类结果的影响最大, 是影响积水类型的最主要因素, 表明市中心区域是积水事件的高发区; 其次, 积水深度的 SHAP 贡献值较大, 且分布较为分散, 表明积水深度较大的点在分类中具有较高的影响权重; 相比之下, 发生日期(季节性)的 SHAP 贡献值分

布居中且接近零，表明季节性因素对聚类结果的影响较弱。因此，积水点位的空间位置(距离市中心的远近)是影响聚类的主要因素，积水深度影响次之，而季节性的影响较为有限。

表 2 K-means 算法的聚类数分析
Table 2 Analysis of the number of clusters using the K-means algorithm

聚类数	2	3	4	5	6	7	8	9
SSE	2 099.9	1 472.8	995.8	885.4	791.7	702.8	640.4	585.8
轮廓系数	0.387	0.383	0.386	0.369	0.374	0.330	0.336	0.317

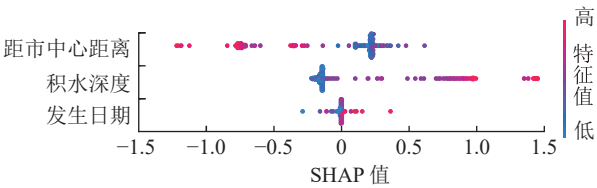


图 7 SHAP 总结图
Fig. 7 SHAP summary diagram

综合聚类分析结果和 SHAP 结果(图 8 和表 3)，上海市内涝积水事件可划分为以下 3 类：第 1 类积水事件集中在上海西南部，距市区较远，平均水深中等(28.7 cm)，但积水点数量相对较少；第 2 类积水主要集中于市中心区域，积水点数量最多，但平均水深较小(平均 28.0 cm，最大 70 cm)；第 3 类积水则主要出现在市区与郊区交界处，尽管积水事件数量较少，但平均水深(107.5 cm)和最大水深(167 cm)均远高于前 2 类，如果以积水平均水深和最大水深作为风险衡量标准，则第 3 类积水属于典型的高风险积水事件。进一步分析发现，高风险区域呈现出 3 个集中区，分别为嘉定区南部与普陀区交界处、松江区东部靠近闵行区以及浦东新区与奉贤区交界处。

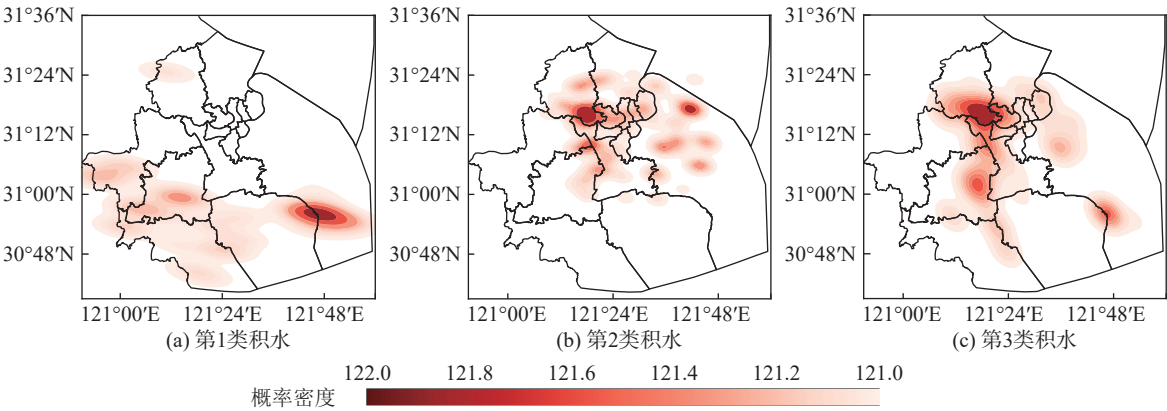


图 8 基于 K-means 的内涝积水聚类空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of waterlogging clusters based on K-means

表 3 基于 K-means 的内涝积水聚类分析结果
Table 3 Results of K-means-based clustering analysis of waterlogging events

分类	频次	距市中心的平均距离/km	距市中心的最大距离/km	平均积水深度/cm	最大积水深度/cm
1	191	45.5	58.0	28.7	80.0
2	624	18.5	32.8	28.0	70.0
3	120	23.9	52.2	107.5	167.0

3.3 典型暴雨内涝积水过程分析

为进一步探讨上海暴雨内涝积水过程的时空变化特征，选取了 2013—2023 年间 57 场典型暴雨积水事件（723 次积水过程）进行分析，重点分析积水持续时间、涨水速度以及积水深度的动态变化过程等，以揭示不同类型内涝事件的演化规律。

从内涝积水过程的统计指标来看(图 9)，积水持续时间的中位数为 1.58 h，90% 分位数为 10 h，表明 90% 的积水事件可在 10 h 内(半天内)完全排涝，显示出大多数内涝事件具有较短的持续时间。 T_{rise} 中位数为 0.68 h，且 75% 事件在 3 h 以内达到最大深度，表明暴雨引发的积水过程通常在短时间内迅速发展，因此，为确保及时应对积水风险，建议积水风险预警时间宜控制在 40 min 以内。此外，积水深度维持较高水平的持续时间也具有显著规律，积水深度持续在 25% 分位数以上的时间和持续在 10 cm 以上的时间均在 1~6 h 之间，中位数约为 2 h，说明多数积水事件在发生后通常会维持 2 h 以上的较深积水状态。从峰值系数上看，75% 事件的峰值系数在 0.51 以内，说明大部分积水事件呈现“快积”的特征。

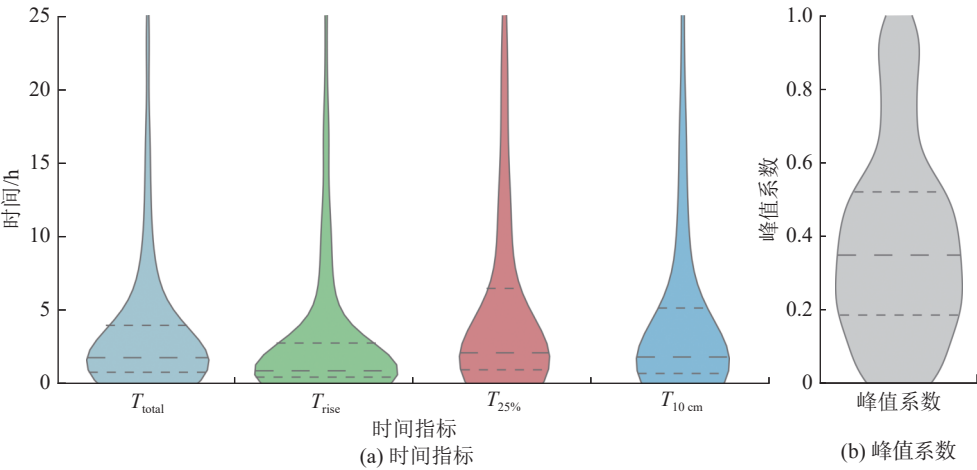


图 9 典型内涝积水过程时间特征的小提琴图

Fig. 9 Violin plots of temporal characteristics for typical waterlogging processes

基于最大水深、总持续时间、涨水时间、显著积水持续时间和峰值系数等特征，采用 K-means 算法对积水过程进行时空聚类分析(过程略)。结果表明，上海市的暴雨积水过程可划分为 3 种典型模式：第 1 类，占比最多，积水水深相对较小且持续时间短、涨水速度快(如图 10(b)中的蓝色实线，积水时间为 1 h，积水深度不超过 10 cm)；第 2 类，积水点数量最少，水深略高于第 1 类，持续时间长且涨水速度较慢(如图 10(b)中

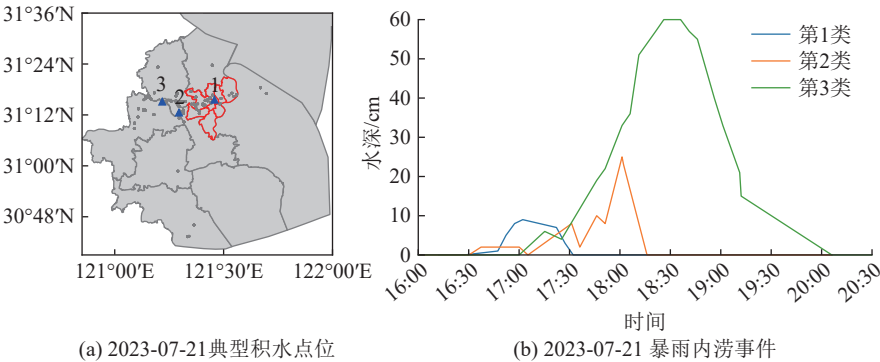


图 10 “2023-07-21”积水事件中典型积水点位置及其水深变化过程

Fig. 10 Locations of typical waterlogging points and their water depth variation processes during the "2023-07-21" event

的黄色实线，积水时间约为 2.25 h，最大水深为 25 cm)；第 3 类，水深最大且涨水速度快，但持续时间略高于第 1 类(如图 10(b)中的绿色实线，积水时间约为 3 h，最大水深为 60 cm)，3 种典型模式见图 11。

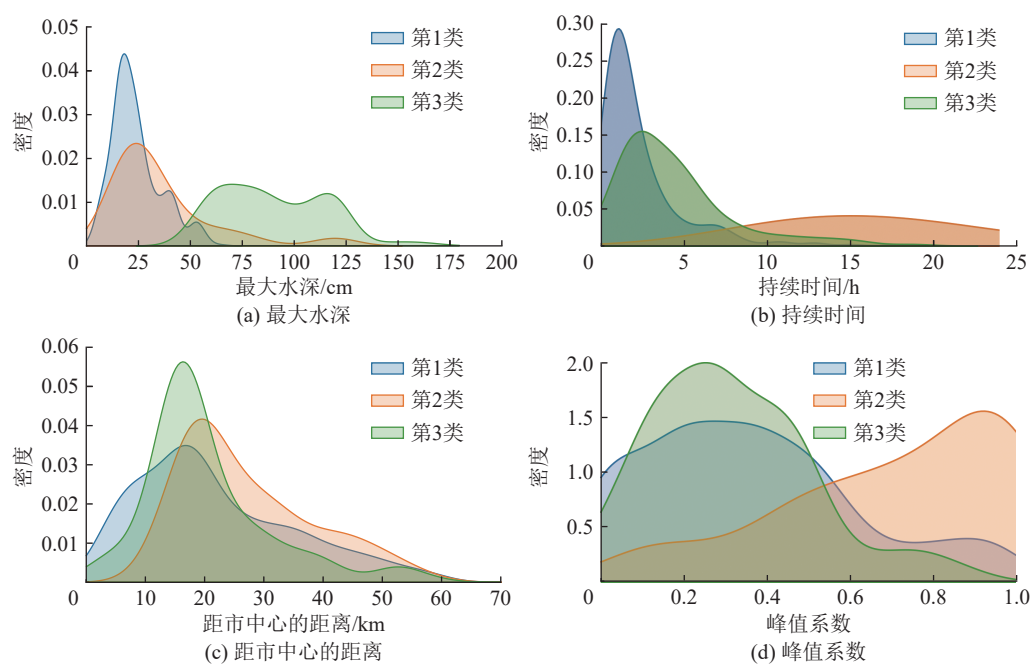


图 11 基于 K-means 聚类的典型暴雨内涝积水过程特征

Fig. 11 Characteristics of typical rainstorm waterlogging processes based on K-means clustering

结合 3.2 节聚类结果，可以进一步揭示不同类型积水事件的空间分布特征(图 12)。不同类型的积水事件在水深、持续时间和空间分布上存在显著差异。第 1 类典型事件主要与总体分类中的第二簇相对应，即市区范围内的高频次、低水深积水事件，表明市区积水的主要特点为水深小、积水速度快且持续时间短，该类积水事件在上海市中心占主导地位；第 3 类典型事件主要对应于总体分类中的第三簇，分布于郊区，表明郊区部分积水事件的主要特点为水深大、持续时间长，风险较高。



图 12 典型暴雨事件分类桑基图

Fig. 12 Sankey diagram of typical storm event classification

基于不同类型积水事件的时空分布特征，可为上海市分区施策开展内涝防治工作提供针对性建议：对于市中心区域，由于积水频发但水深较浅，应提升排水标准、优化管网排水能力，并增加雨水调蓄设施，以降低高频积水对城市交通和居民生活的影响；对于高风险区域(如嘉定区南部等)，应加强低洼区域的排水

能力建设,提高防洪排涝基础设施,特别是对下立交等易积水区域进行重点治理;此外,针对道路积水频发区域,建议优化雨水收集与排放管网,提高路面排水效率,减少积水风险。本研究的聚类结果可为上海市制定更精准的内涝预警阈值、更加精细化的内涝防控措施、应急管理策略及城市防洪规划提供科学依据,同时也可与其他快速城市化地区的洪涝治理与应急管理提供参考。

4 结 论

本研究基于2013—2023年上海市内涝积水观测数据,采用K-means聚类算法和概率密度分析方法,探讨了内涝积水的季节性、空间分布及典型暴雨积水过程的特征。主要结论如下:

(1)上海市的内涝积水事件具有明显的季节性,主要集中在每年汛期的6—8月,其中7月下旬和8月下旬为积水高发期,与暴雨和台风活跃期高度吻合。大多数积水事件的水深在16~80 cm之间,平均水深为37.3 cm,最大水深可达165 cm。上海市内涝积水的空间分布具有明显的异质性,积水概率呈现由市中心向周边递减的趋势,中心城区积水问题尤为突出。

(2)道路积水是上海最主要的内涝类型,其发生频次最高,空间聚集性更强,市中心区域发生概率显著高于其他区域;相比之下,下立交和居民区的积水事件数量相对较少,下立交积水多发于市中心与郊区的交接处,居民区积水事件尽管总体概率较低,但也呈现市中心向周边逐渐递减的分布趋势。

(3)K-means聚类分析揭示了上海市内涝积水的空间分布模式,可分为3类:第1类主要发生在市中心区域,水深较小、积水持续时间短、涨水速度快,在上海市内涝积水事件中占主导地位;第2类集中在市中心与郊区的交界处,水深和持续时间适中;第3类积水风险最高,发生频次最少,但积水深度较大,持续时间较长,主要集中在嘉定区南部等郊区。

(4)典型暴雨内涝事件分析表明上海市内涝过程呈现出“快积快消”的特点。强降雨驱动的积水过程通常在3 h内达到最大水深,且多数事件在2 h内维持较深积水状态,也反映出短历时强降雨对城市排水系统的巨大压力;为确保及时应对积水风险,建议积水风险预警时间控制在40 min以内。

参考文献:

- [1] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.(KONG F, SHI P J, FANG J, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 165-174. (in Chinese))
- [2] TORELLÓ-SENTELLES H, MARRA F, KOUKOULA M, et al. Intensification and changing spatial extent of heavy rainfall in urban areas[J]. Earth's Future, 2024, 12(9): e2024EF004505.
- [3] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等.中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J].水科学进展,2024,35(3):357-373.(SONG X M, XU N T, ZHANG Z Y, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 张永勇,侯进进,夏军,等.中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异[J].中国科学:地球科学,2022,52(8):1427-1442.(ZHANG Y Y, HOU J J, XIA J, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2022, 52(8): 1427-1442. (in Chinese))
- [6] 傅春,黄金燕,付耀宗,等.不同城市化程度对内涝弹性的影响研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(6):1402-1412.(FU C, HUANG J Y, FU Y Z, et al. Research on the influence of different urbanization degrees on waterlogging elasticity[J]. Resources

- and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1402-1412. (in Chinese))
- [7] 姜波, 陈涛, 袁宏永, 等. 基于情景时空演化的暴雨灾害应急决策方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 52-59. (JIANG B, CHEN T, YUAN H Y, et al. Emergency decision-making method for rainstorm disasters based on spatiotemporal scenario analyses[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(1): 52-59. (in Chinese))
- [8] 郝莹, 陈靖, 王元, 等. 基于高时空分辨率降水预报产品的城市内涝预警研究 [J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 229-237. (HAO Y, CHEN J, WANG Y, et al. Research on urban waterlogging risk early warning based on high spatial-temporal resolution precipitation forecast products[J]. [Torrential Rain and Disasters](#), 2019, 38(3): 229-237. (in Chinese))
- [9] 李京梅, 常有奎, 张婷华, 等. 西宁市暴雨内涝灾害特征和等级分析研究 [J]. 农业灾害研究, 2024, 14(10): 183-185. (LI J M, CHANG Y K, ZHANG T H, et al. Characteristics and grading analysis of rainstorm-induced waterlogging disasters in Xining City[J]. [Journal of Agricultural Catastrophology](#), 2024, 14(10): 183-185. (in Chinese))
- [10] 张书函, 肖志明, 王振昌, 等. 北京市城市内涝判定标准量化研究 [J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(9): 1-5. (ZHANG S H, XIAO Z M, WANG Z C, et al. Quantitative study on the criteria for determining urban flood in Beijing[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(9): 1-5. (in Chinese))
- [11] 李学峰, 谭琼, 钱真. 上海市城市内涝风险分析与评估 [J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(6): 26-32. (LI X F, TAN Q, QIAN Z. Risk analysis and assessment of urban flooding in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(6): 26-32. (in Chinese))
- [12] 张乾柱, 王彤彤, 卢阳, 等. 基于 AHP-GIS 的重庆市山洪灾害风险区划研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 91-102. (ZHANG Q Z, WANG T T, LU Y, et al. Regionalization of torrential flood disasters in chongqing based on AHP-GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 91-102. (in Chinese))
- [13] 王静, 李娜. 上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析 [J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(3): 61-76. (WANG J, LI N. The dynamic flood hazard map application system of urban area in Shanghai and typical rainstorm waterlogging analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(3): 61-76. (in Chinese))
- [14] 薛丰昌, 杨盟, 陈剑飞, 等. 网格化城市内涝风险积水深度 CID 计算模型 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(11): 4383-4390. (XUE F C, YANG M, CHEN J F, et al. CID calculation model for grid urban waterlogging risk depth[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(11): 4383-4390. (in Chinese))
- [15] 王建明. 西安市暴雨内涝灾害风险评估及韧性策略研究 [D]. 西安: 西北大学, 2021. (WANG J M. Study on risk assessment and toughness strategy of heavy rain and flood disaster in Xi'an [D]. Xi'an: Northwest University, 2021. (in Chinese))
- [16] GIGOVIĆ L, PAMUČAR D, BAJIĆ Z, et al. Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas[J]. [Water](#), 2017, 9(6): 360.
- [17] 庄琦, 刘曙光, 周正正. 降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响 [J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 398-408. (ZHUANG Q, LIU S G, ZHOU Z Z. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(3): 398-408. (in Chinese))
- [18] 乔贤玲, 侯精明, 刘园, 等. 降雨空间分辨率对城市内涝模拟敏感性研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(3): 81-89. (QIAO X L, HOU J M, LIU Y, et al. Sensitivity of rainfall data spatial resolution to urban inundation simulation[J]. [Journal of Water Resources and Water Engineering](#), 2024, 35(3): 81-89. (in Chinese))
- [19] 李双双, 杨赛霓, 刘焱序, 等. 1960—2013 年京津冀地区干旱-暴雨-热浪灾害时空聚类特征 [J]. 地理科学, 2016, 36(1): 149-156. (LI S S, YANG S N, LIU Y X, et al. Spatio-temporal clustering characteristics of drought, heavy rain and hot waves in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960—2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(1): 149-156. (in Chinese))
- [20] ZHUANG Q, ZHOU Z Z, LIU S G, et al. Bivariate rainfall frequency analysis in an urban watershed: combining copula theory with stochastic storm transposition[J]. [Journal of Hydrology](#), 2022, 615: 128648.
- [21] 易文林, 顾圣华, 俞汇, 等. 上海市暴雨特征变化趋势分析 [J]. 中国水利, 2024(18): 32-37. (YI W L, GU S H, YU H, et al. An evaluation on changes of rainstorm characteristics in Shanghai Municipality[J]. [China Water Resources](#), 2024(18): 32-37. (in Chinese))
- [22] 万晖. 上海市防御风暴潮洪“四碰头”极端灾害对策思考 [J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 78-82. (WAN H. Reflection on the prevention countermeasures for the extreme disasters caused by winds, storms, tides, and floods in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 78-82. (in Chinese))
- [23] 庄琦, 刘曙光, 周正正. 上海城区降雨时空分布变化与暴雨频率分析 [J]. 水文, 2021, 41(4): 74-80. (ZHUANG Q, LIU S G, ZHOU Z Z. The change of spatio-temporal precipitation and rainfall frequency analysis in Shanghai[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 74-80. (in Chinese))
- [24] 刘晓涛. 中国式现代化视角下超大城市水安全战略思考: 以上海市为例 [J]. 中国水利, 2023(1): 15-17, 31. (LIU X T.

- Strategic thinking on water security of megacities from the perspective of Chinese path to modernization: taking Shanghai as an example[J]. *China Water Resources*, 2023(1): 15-17, 31. (in Chinese))
- [25] 丁一汇. 气候变化与城市化效应对中国超大城市极端暴雨的影响[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 1-2. (DING Y H. Effects of climate change and urbanization on extreme rainstorm in megacities of China J]. *China Flood & Drought Management*, 2018, 28(2): 1-2. (in Chinese))
- [26] 胡恒智, 董强, 辛辰, 等. 上海汛期极端降雨阈值时空分布与内涝影响评估[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 28-38. (HU H Z, DONG Q, XIN C, et al. Spatial-temporal distribution of extreme rainfall thresholds and assessment of urban waterlogging impact during flood seasons in Shanghai[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(3): 28-38. (in Chinese))
- [27] 沙治银. 上海市防御 202106 号台风“烟花”的过程及思考[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(4): 52-54. (SHA Z Y. The process and thinking of Shanghai's defense against typhoon "In-Fa" No. 202106[J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(4): 52-54. (in Chinese))
- [28] 李学峰, 赵敏华, 林发永. 上海市排水防涝“蓝-绿-灰”海绵空间融合探索[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(5): 14-18. (LI X F, ZHAO M H, LIN F Y. Exploration of the integration of "Blue-Green-Grey" sponge space for drainage and flood management in Shanghai[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(5): 14-18. (in Chinese))
- [29] 王梦江. 上海市防汛工作手册[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2018. (WANG M J. Shanghai flood control work manual[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2018. (in Chinese))
- [30] RICHES N O, GOURIPEDDI R, PAYAN-MEDINA A, et al. K-means cluster analysis of cooperative effects of CO, NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀, and SO₂ on incidence of type 2 diabetes mellitus in the US[J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113259.
- [31] MEHEDI HASSAN M, MOLICK S, YASMIN F. An unsupervised cluster-based feature grouping model for early diabetes detection[J]. *Healthcare Analytics*, 2022, 2: 100112.

Spatiotemporal distribution patterns of urban waterlogging in Shanghai based on spatiotemporal clustering analysis*

ZHOU Zhengzheng^{1,2}, XU Jiayan¹, LIU Shuguang^{1,3}, WAN Hui⁴, SUN Li⁴, LIU Yan⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Flood and Drought Disaster Prevention Technology Center, Shanghai 200050, China)

Abstract: Under the combined influence of frequent rainstorm events and rapid urbanization, urban waterlogging has emerged as a critical challenge in contemporary urban development. Based on Shanghai waterlogging data from 2013 to 2023, this study investigates the seasonal variations, spatial distribution, and characteristics of typical rainstorm-induced waterlogging utilizing K-means clustering and probability density analysis. Results indicate significant seasonality, with peak occurrence in summer strongly synchronized with typhoon-related rainstorms. Road inundation constitutes the primary waterlogging type, exhibiting prominent spatial heterogeneity; notably, the central urban areas experience frequent inundation primarily due to limited drainage capacities and insufficient water retention spaces. Among the three waterlogging categories identified via K-means clustering, high-risk zones with deeper water depths are concentrated at the interface between Jiading District and central urban areas. Typical storm-related inundation events are characterized by rapid accumulation and recession ("fast in and fast out"), with durations typically not exceeding 10 hours. It is recommended that the risk early-warning lead time be controlled within 40 minutes. These findings provide critical insights to support the refinement of urban waterlogging management and enhance emergency response capabilities.

Key words: urban waterlogging; K-means clustering; probability density analysis; spatiotemporal distribution; Shanghai

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42371030; No. 42271031).