

兰佳妮, 王宇骥, 高丽莎, 等. 2014年—2017年上海市降雨时空分布变化及其城郊差异[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 148-158.

Lan J N, Wang Y J, Gao L S, et al. Spatiotemporal distribution variation and urban-suburban differences of rainfall in Shanghai City from 2014 to 2017 [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 148-158.

2014年—2017年上海市降雨时空分布变化及其城郊差异

兰佳妮¹, 王宇骥², 高丽莎³, 雷 诺¹, 周正正^{1,4,5,*}, 刘曙光^{1,4,6}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. Oriel College, University of Oxford, Oxford OX1 4EW, UK; 3. 上海市水务规划设计研究院<上海市海洋规划设计研究院>, 上海 200030; 4. 同济大学土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092; 5. 上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室, 上海 200092; 6. 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)

摘要 【目的】 本文旨在通过时空统计与聚类分析方法, 系统揭示上海市不同等级降雨的时空分布规律, 重点解析暴雨的时空异质性特征及城郊差异, 为城市内涝防治与规划提供科学依据。【方法】 基于2014年—2017年上海市160个雨量站观测数据, 采用K-Means聚类算法对24 h暴雨过程进行雨型分类, 运用统计分析方法量化城郊暴雨差异, 并结合地理信息系统(GIS)空间插值技术刻画暴雨的时空分布格局。【结果】 小雨、中雨和大雨的雨量在上海市各区分布较均匀, 雨日分布规律各有不同; 上海市暴雨呈现显著时空异质性, 北部和东南沿海区域暴雨日数和雨量高于西部内陆区域; 暴雨季节性明显, 集中在汛期(占比超过55%), 在6月和9月达到峰值, 其中市区6月和9月暴雨频次高于郊区; K-Means聚类识别出4类暴雨雨型, 双峰型(占比为38%)具有最大累计雨量(均值为81.95 mm)但时间集中性最低(峰值降水比为30.7%); 各类暴雨在不同行政区和不同月份的发生概率不同; 市区暴雨日数(5 d)、雨量(71.82 mm)和峰值降水比(30%)分别较郊区(2 d, 62.46 mm, 20%)显著偏高。【结论】 建议针对暴雨时空异质性特征实施分区管理策略, 重点加强双峰型暴雨频发区域的排水能力建设, 并依据城区暴雨集中性特征优化中心城区排水系统设计。本文为上海市精细化排涝规划提供了数据支撑和决策依据。

关键词 不同等级降雨 暴雨 K-Means分析 时空分布 上海市

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0148-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.017

Spatiotemporal Distribution Variation and Urban-Suburban Differences of Rainfall in Shanghai City from 2014 to 2017

Lan Jiani¹, Wang Yuji², Gao Lisha³, Lei Nuo¹, Zhou Zhengzheng^{1,4,5,*}, Liu Shuguang^{1,4,6}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Oriel College, University of Oxford, Oxford OX1 4EW, UK;

3. Shanghai Water Planning and Design Research Institute <Shanghai Ocean Planning and Design Research Institute>, Shanghai 200030, China;

4. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

5. Shanghai Key Laboratory of Urban Renewal and Spatial Optimization Technology, Shanghai 200092, China;

6. Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai <CMACC>, Shanghai 200030, China)

Abstract [Objective] This paper aims to systematically investigate the spatiotemporal distribution patterns of rainfall of varying intensities in Shanghai City, with a particular focus on the spatiotemporal heterogeneity of rainstorms and urban-suburban disparities through spatiotemporal statistics and clustering analysis method. The goal is to provide a scientific basis for urban waterlogging prevention and planning. [Methods] Based on observational data from 160 rainfall stations in Shanghai City from 2014 to 2017, the

[收稿日期] 2025-04-01

[基金项目] 国家自然科学基金(42371030)

[作者简介] 兰佳妮(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市水文及极端气候条件下水旱灾害风险, E-mail: 2430936@tongji.edu.cn。

[通信作者] 周正正(1988—), 女, 副教授, 主要从事城市水文方面研究等工作, E-mail: 19058@tongji.edu.cn。

K-Means clustering algorithm was used to classify 24-hour rainstorm events. Statistical methods were applied to quantify urban-suburban differences, and geographic information system (GIS)-based spatial interpolation was used to map the spatiotemporal distribution of rainstorms. [**Results**] Light, moderate, and heavy rainfall showed relatively uniform spatial distributions across districts in Shanghai City, although their rainy-day frequencies varied; rainstorms exhibited significant spatiotemporal heterogeneity, with higher frequency and intensity in northern and southeastern coastal areas compared to inland western regions; rainstorms were strongly seasonal, mainly occurring during the flood season (>55% of total), with peaks in June and September. Urban areas experienced more frequent rainstorms during these months than suburban areas; K-Means clustering identified four types of rainstorm patterns. The bimodal type, accounting for 38% of cases, had the highest cumulative rainfall (mean value was 81.95 mm) but the lowest temporal concentration (peak precipitation ratio was 30.7%); Different rainstorm types exhibited varying probabilities of occurrence across administrative districts and months; urban areas experienced significantly higher rainstorm frequency (5 d vs. 2 d), intensity (71.82 mm vs. 62.46 mm), and peak precipitation ratio (30% vs. 20%) compared to suburban areas. [**Conclusion**] This paper recommends implementing zone-specific urban drainage strategies tailored to rainstorm heterogeneity, prioritizing drainage capacity enhancement in areas prone to bimodal-pattern storms, and optimizing drainage system designs in central urban areas based on precipitation concentration characteristics. This paper provides valuable data support and decision-making references for refined urban drainage planning and management in Shanghai City.

Keywords rainfall at different levels rainstorm K-Means analysis spatiotemporal distribution Shanghai City

在全球气候变化和城市化高速发展的双重背景下,城市地区降雨时空格局发生显著改变,其时空异质性和城乡差异性日益显著,并且极端暴雨发生的频率和强度也在增大^[1-4],已成为城市发展面临的严峻挑战^[5]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次报告^[3]中也强调了全球极端降雨事件的变化及其对城市地区的潜在影响。上海市作为我国沿海的典型超大城市,受季风、梅雨和台风的多重影响,暴雨频繁引发城市内涝灾害,使得城市防洪排涝能力面临新的挑战。因此,在当前复杂环境下,亟待加强对上海地区降雨时空格局,尤其是暴雨时空格局的研究。

近年来,国内外学者^[2,6-7]对上海市降雨的空间分布、强度变化及极端暴雨事件的趋势进行了广泛研究。Jiang等^[8]研究了土地利用变化对上海市降雨的影响,发现城市核心区的降雨量和极端降水量大多呈增加趋势,而远郊则相反。Zhuang等^[9]分析了上海城区降雨的时空变化,并探讨了暴雨频率的变化趋势,而易文林等^[10]进一步研究了暴雨强度及易发时段的变化。可见上海市内部的降雨时空分布特征在当前变化环境下愈加复杂。然而,现有研究主要关注整体降雨趋势或极端降雨事件,缺乏对不同等级降雨的系统性分析,对城郊降雨差异的研究较为有限。因此,在韧性安全城市建设^[11]和水利高质量发展^[12]的大背景下,进一步开展上海市内部降雨的时空结构的精

细化解析,掌握暴雨雨型、雨量和雨强等的时空分布规律,为解决上海城市洪涝灾害关注的热点。

本文基于2014年—2017年上海市160个雨量站的资料,以上海市陆地区域为研究对象,对各个行政区、不同等级降雨的时空演化规律进行系统性分析和总结,对小雨、中雨、大雨和暴雨等不同等级降雨进行时空特征分析,并重点关注暴雨时空演化特性,开展上海市暴雨雨型聚类研究,并分析城郊暴雨差异。研究结论可为掌握区域性降雨的时空演化规律以及上海城市洪涝灾害防御提供科学依据。

1 研究数据及主要研究方法

1.1 研究区域和研究数据

本文研究范围是除了崇明区以外的上海陆地区域,总面积为5 155 km²,基于公众对上海市中心区域的普遍认知以及众多学者在研究^[13]中所采用的划分标准,本文将杨浦区、虹口区、静安区、普陀区、长宁区、黄浦区以及徐汇区等核心区域统一界定为上海市的中心区域,研究区域情况如图1所示^[14]。本文采用的各行政区数据有2017年末的面积(上海市统计局发布的《2018年上海统计年鉴》)^[15]以及土地不透水率^[13],如表1所示。

本文采用的降雨量数据是2014年—2017年上海地区160个雨量站资料,来源于上海市水务部门,时间分辨率为5 min,169个雨量站的空间分布情况如图1所示。各行政区的面平均雨量计算如下:其区域内所包含的站点雨量的算术平均值。在此基础

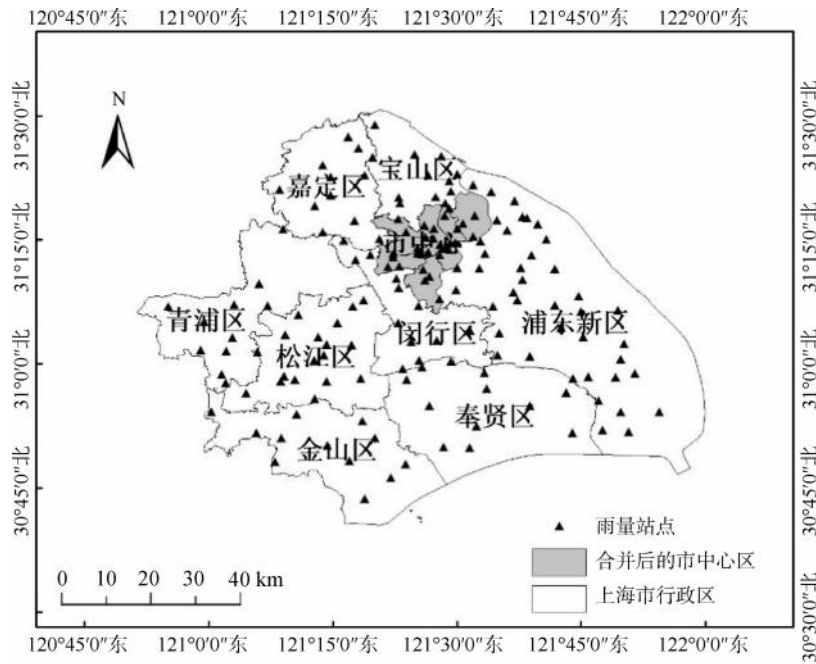


图1 研究区域

Fig. 1 Study Area

表1 上海市区域面积和土地不透水率统计^[13,15]

Tab. 1 Statistics of Land Area and Impervious Surface Ratio by District in Shanghai City^[13,15]

区域	面积/km ²	不透水率
嘉定区	464.2	51.8%
松江区	605.64	32.0%
青浦区	670.14	24.8%
金山区	586.05	17.7%
奉贤区	687.39	25.1%
闵行区	370.75	65.5%
宝山区	270.99	74.6%
浦东新区	1 210.41	44.1%
上海市中心	289.42	92.5%

上,计算 8:00—次日 8:00 累积降雨量作为日降雨量,最终形成各区日降雨资料序列。并依据我国气象上的规定,根据日降雨量的大小将降雨划分为 4 个等级:(0,10 mm)(小雨);[10 mm,25 mm)(中雨);[25 mm,50 mm)(大雨);[50 mm,+∞)(暴雨)。从而提取上海各区域内不同等级的降雨序列。

为验证以区内所有雨量站点的日降水均值作为该区降雨代表值的合理性,本文选取一次典型暴雨日(2016年10月22日),对各区开展留一法交叉验证。具体方法:对每个站点,使用同一区内其余站点

的日雨量均值作为预测值,并与该站点的实测值进行对比,计算绝对误差(MAE)及相对误差,随后统计各区内站点的平均绝对误差及相对误差,统计结果如表2所示。结果表明,所有区的站点平均相对误差均低于20%,其中大多数区相对误差低于10%,说明这些区域内站点降水量的空间差异较小,均值具有良好的代表性。即使在站点数量最多、空间异质性较高的浦东新区,相对误差亦控制在17.6%,表明在强降水背景下,区内均值仍能较为合理地反映整体降水状况。综上,采用区内雨量站点日降水的平均值来代表该区的降雨量在统计意义上

表2 交叉验证结果

Tab. 2 Results of Cross-Validation

区域	站点数	平均MAE/mm	平均相对误差
嘉定区	12	4.72	5.7%
松江区	17	9.58	11.3%
青浦区	10	5.02	6.9%
金山区	13	12.42	14.0%
奉贤区	13	17.23	15.5%
闵行区	11	13.45	13.4%
宝山区	13	6.46	8.1%
浦东新区	44	21.42	17.6%
上海市中心	27	9.73	10.7%

是合理的,尤其适用于暴雨分类分析、区域降雨特征归纳等研究场景。

1.2 暴雨时空特征指标

暴雨最大 1 h 雨强是指在某一区域内站点中的最大 1 h 雨强,以 I_{1h}^{\max} 表示,单位为 mm/h。它反映了暴雨期间降水强度的极值,是衡量暴雨强度的重要指标。

总降雨量是指在一定时间范围内的降水总量,单位为 mm,反映了降雨的总体情况。本文中有 24 h 总降雨量(日雨量)和年总降雨量。

峰值降水比是指降雨过程中最大 1 h 降雨量和总降雨量的比值,反映了暴雨在时间尺度上的集中性,可间接反映暴雨强度。本文针对 24 h 降雨,用其中最大 1 h 降雨量和 24 h 总雨量的比值表示峰值降水比,计算如式(1)~式(3)。

$$P_{\text{total}} = \sum_{t=1}^{24} P_t, \quad t \in [1 \text{ h}, 24 \text{ h}] \quad (1)$$

$$P_{\text{max}} = \max(P_t), \quad t \in [1 \text{ h}, 24 \text{ h}] \quad (2)$$

$$P_{\text{HR}} = P_{\text{max}}/P_{\text{total}} \quad (3)$$

其中: P_t —— t h 的雨强,mm;

P_{total} ——24 h 的总降雨量,mm;

P_{HR} ——峰值降水比;

P_{max} ——24 h 暴雨内最大的 1 h 降雨量,mm。

发生概率是指在某一时空范围内降雨发生次数与总观察次数的比值即为该时空范围内降雨的发生概率。本文中会采用各月降雨、各行政区降雨、各类型暴雨等的发生概率。

1.3 雨型分类

雨型是降雨过程的时程分配,也就是雨强在时间尺度上的变化过程,是降雨的重要参数特征。基于模糊识别法和聚类算法,可根据降雨过程中峰值的数量将降雨事件划分为单峰型和多峰型降雨,其中单峰型降雨可以根据降雨峰值出现的时间和降雨强度的分布特征又细分为前峰、中峰和后峰型降雨^[16]。

本文主要针对日降雨(8:00—次日 8:00),单峰型指在该日 8:00—次日 8:00 仅出现一个主要降雨峰值,而多峰型降雨则包含多个显著的降雨峰值,如双峰型降雨等,单峰型降雨可以分为以下几类。

(1) 前峰型降雨:降雨峰值出现在 8:00—

16:00;

(2) 中峰型降雨:降雨峰值出现在 16:00—24:00;

(3) 后峰型降雨:降雨峰值出现在 24:00—次日 8:00。

为突出降雨的时程分配特征,分类过程中首先将逐小时降雨量归一化为占当日总降雨量的比例,以保证聚类结果主要反映降雨在时间上的分布形态。随后结合各类雨型的平均总雨量,将归一化结果还原为逐小时雨强,单位为 mm/h,绘制成雨型图,使结果既体现时序特征,又符合雨型图的一般形式。

1.4 K-Means 算法

K-Means 算法是一种迭代求解的聚类分析算法,具有收敛速度快、聚类效果优、算法复杂度低、效率高的优点^[17]。K 为 K-Means 算法中簇的个数,算法的核心任务是根据设定好的 K 值,寻找样本中最优的 K 个质心,并将与其距离最近的样本分配给各个质心成为以质心为代表的簇。

算法具体过程如下:

(1) 确定分组数量 K;

(2) 随机抽选 K 个样本作为聚类中心;

(3) 计算各样本点 x_i 到聚类中心的欧氏距离;

(4) 根据距离最小原则,将样本点分配给距离最近的聚类中心与其成为一类;

(5) 求每一类样本内的数据均值;

(6) 若均值与原聚类中心不同,则将均值作为新的聚类中心,回到第(3)步直到收敛;

(7) 输出簇内平方和误差(SSE)。

SSE 的计算如式(4)。

$$S_{\text{SE}} = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} d(x, c_i)^2 \quad (4)$$

其中: C_i ——第 i 个簇;

c_i ——第 i 个簇的聚类中心;

$d(x, c_i)$ ——簇内样本点 x 和该簇聚类中心 c_i 的欧氏距离。

簇内的样本具有相似性,簇间的数据具有差异性,聚类算法追求的是簇内差异小而簇间差异大。K-Means 算法输出的结果 SSE 表示簇内数据的凝聚程度。不同 K 值会得到不同的 SSE 值,将其绘制为 SSE-K 关系图可以反映聚类数与误差之间的关系,从中选取最佳 K 值;SSE 随 K 值增大而减小,其关

系曲线通常存在一个“拐点”,拐点前凝聚程度随 K 增加而明显增强,拐点后 K 对凝聚度的提升趋于平缓,过大的 K 虽能略微降低误差,但会导致划分过细,不利于分类解释。为客观判定该拐点位置,本文引入最大垂距法,即计算每个 K 值对应点到首尾连线的垂直距离,并以垂距最大点所对应的 K 作为最优分类数。该方法基于肘部法则,通过识别误差下降的边际收益递减最显著位置,确定最佳聚类数,避免了主观判断误差。

在本文中, K -Mean 方法用于对雨型进行分类。具体而言,本文以每日 24 h 逐小时降雨量数据作为聚类样本,每个样本可视为一个 24 维向量,样本间的相似性通过欧氏距离进行度量。在 Python 环境下调用 K -Means 算法,设定聚类数 K 后,模型即可完成迭代聚类,最终得到若干具有代表性的降雨类型。

2 结果

2.1 不同行政区降雨分析

2.1.1 各区年平均总雨量分析统计

图 2 展示了 2014 年—2017 年年平均总降雨量的空间分布。由图 2 可知,年均降雨量在上海市中部和东南沿海地区较高,西部内陆地区较低,且各行政区之间差异较大,最大相差约为 156 mm。其中:浦东新区年平均总降雨量最高,达到 1 440.14 mm;市中心次之,为 1 428.43 mm;青浦区最低,只有 1 283.57 mm。说明上海市年均总降雨量有明显的空间不均匀性,在中部和东南沿海地区较高,西部内陆地区较低。

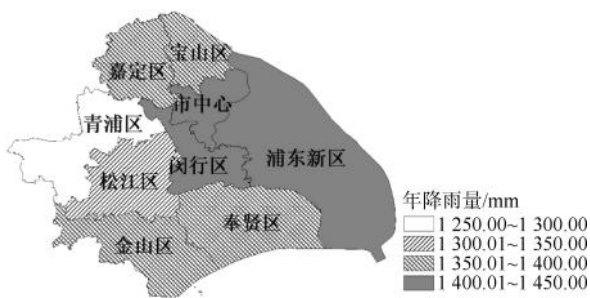


图 2 年降雨量空间布局

Fig. 2 Spatial Distribution of Annual Precipitation

2.1.2 各区不同等级降雨雨量分析

由表 3 和图 3 可知,小雨、中雨和大雨雨量在各区差异较小,小雨最大相差 9%,中雨为 4%,大雨为 6%;而暴雨雨量在各区域分布有明显差异,最大相差 22%,其中宝山区暴雨量最高,达到 76.37 mm,嘉定、上海市中心和金山区次之,分别为 72.41 mm、

71.82 mm 和 71.13 mm,市郊的奉贤区暴雨量最低,为 62.46 mm。说明研究期内上海市的年平均暴雨量分布有显著的空间差异性,上海市北部的宝山区、嘉定区、市中心和南部的金山区雨量较高。近年来,随着城市化进程的加快,城市热岛和雨岛效应日益显著,已有研究^[18]指出,这些效应可能增强城市核心区的降雨强度,在本文中,地表不透水率较高的宝山区(74.6%)、嘉定区(51.8%)和市中心区域(92.5%)的暴雨量亦相对较高,该现象在一定程度上或可与城市热岛与雨岛效应有关,但其具体影响机制仍需进一步研究加以明确。

表 3 上海市各区域不同等级降雨的年平均雨量统计(单位:mm)

Tab. 3 Statistics of Annual Mean Precipitation on Different Rainfall Levels in Various Regions of Shanghai City(Unit: mm)

区域	小雨雨量	中雨雨量	大雨雨量	暴雨雨量
嘉定区	3.97	15.69	33.79	72.41
松江区	3.97	16.16	33.56	68.87
青浦区	4.13	15.49	32.41	65.18
金山区	3.96	15.94	32.50	71.13
奉贤区	4.13	16.11	34.36	62.46
闵行区	4.23	16.18	34.33	69.91
宝山区	4.08	15.86	32.70	76.37
浦东新区	4.08	16.07	33.08	66.78
上海市中心	4.16	15.82	34.00	71.82

2.1.3 各区不同等级降雨雨日分析

由表 4 可知,年平均降雨日数在各区差异不大,为 106~116 d,其平均值为 111 d,表明上海地区一年中 1/3 是雨日。其中小雨日数为 61~70 d,市中心最少,金山区最多;中雨日数为 30~34 d,各区域差异不大;大雨日数为 10~14 d,在嘉定区和浦东新区最少,金山区最多;暴雨日数为 2~5 d,市中心、嘉定区和浦东新区最多,宝山区和闵行区次之,其余区域较少。可见,不同等级降雨的降雨日数在各行政区的分布规律不同,其中暴雨在上海市北部和东部地区发生更为频繁。

2.1.4 暴雨季节性分析

图 4 展示了 2014 年—2017 年各区暴雨在年内的发生概率,由图 4 可知,所有区暴雨的年内分布规律相同:季节性明显,集中在汛期的 6 月—9 月,在 6 月和 9 月 2 次达到峰值,6 月发生概率最高,但各区

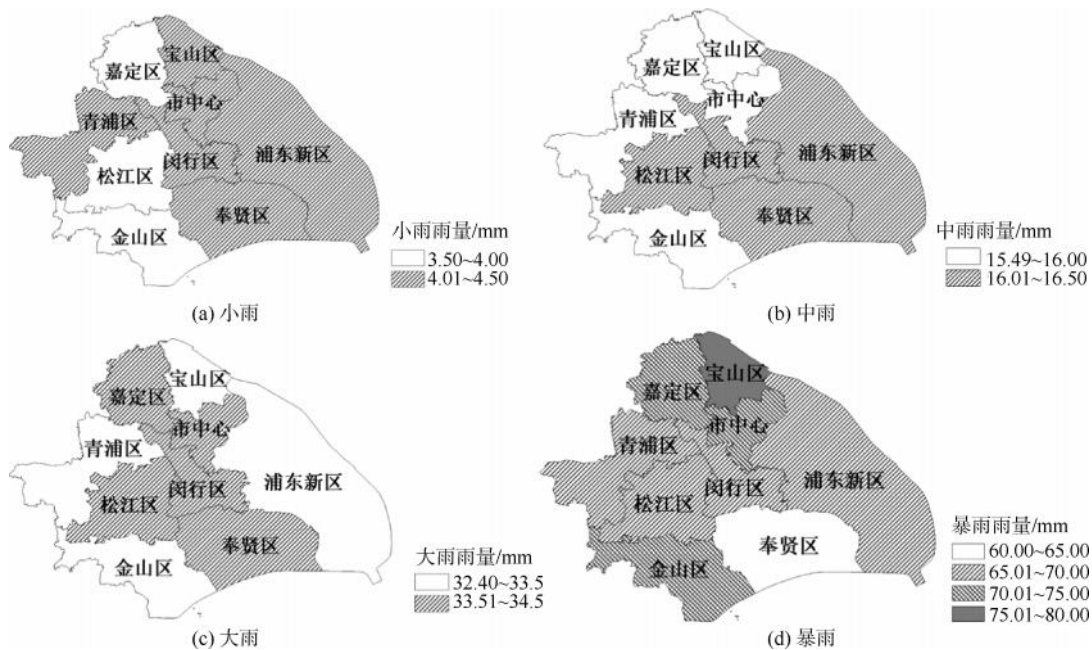


图3 上海市各区域不同等级降雨的年雨量分布图

Fig. 3 Distribution of Annual Precipitation on Different Rainfall Levels in Different Regions of Shanghai City

表4 上海市各区域不同等级降雨的年平均雨日统计 (单位:d)

Tab. 4 Statistics of Annual Mean Rainy Days on Different Rainfall Levels in Various Regions of Shanghai City (Unit: d)

区域	小雨 日数	中雨 日数	大雨 日数	暴雨 日数	总降雨 日数
嘉定区	64	30	10	5	109
松江区	67	32	12	2	113
青浦区	70	30	13	2	115
金山区	66	33	14	2	115
奉贤区	60	34	13	2	109
闵行区	64	31	11	4	110
宝山区	61	30	11	4	106
浦东新区	67	34	10	5	116
上海市中心	63	30	11	5	109

域的季节性强弱略有差异,相比于其他区,上海市中心暴雨季节性更显著,6月概率最高。

2.1.5 最大1h暴雨强度分析

表5展现了各区域在研究期内的最大1h暴雨强度,由表5可知,最大1h暴雨强度在青浦区和奉贤区最小,为49.0 mm/h,两者都不是受台风引起的暴雨;最大1h暴雨强度在浦东新区最大,达到100.50 mm/h,发生在2015年8月23日“天鹅”台

风影响期间,该场台风导致了嘉定、闵行和浦东新区3个区最大1h暴雨强度的发生,说明台风是引发短时极端暴雨的关键因素,尤其在浦东新区等区域,其对高强度短时暴雨的形成起到了显著的驱动作用。

2.2 暴雨聚类分析

160个站点共计获得2525场暴雨事件,从聚类分析得到的SSE-K图(图5)中发现,在K=4处垂距最大,判定此处为拐点,故将暴雨分为4类,分别是前峰型降雨、中峰型降雨、后峰型降雨和双峰型降雨(图6)。

各类暴雨的特征不同。表6展示了4类暴雨的场次、平均降雨量和平均峰值降水比,由表6可知,双峰型暴雨的占比最高,达到38%;后峰型暴雨占比最小,为14.5%;双峰型暴雨的平均日雨量最大(81.95 mm),前峰型暴雨的平均日雨量最小(58.99 mm);后峰型暴雨(37.7%)和前峰型暴雨(37.1%)的峰值降水比最高,在24h内有较强集中性,双峰型暴雨的峰值降水比最低(30.7%)。说明在研究期内,上海地区双峰型暴雨最多且雨量最高,但时间集中性最低;后峰型暴雨的雨量和时间集中性很高,但场次最少。

各类暴雨在各区域的分布不同。图7展示了各区暴雨的雨型组成,由图7可知,青浦区以前峰型

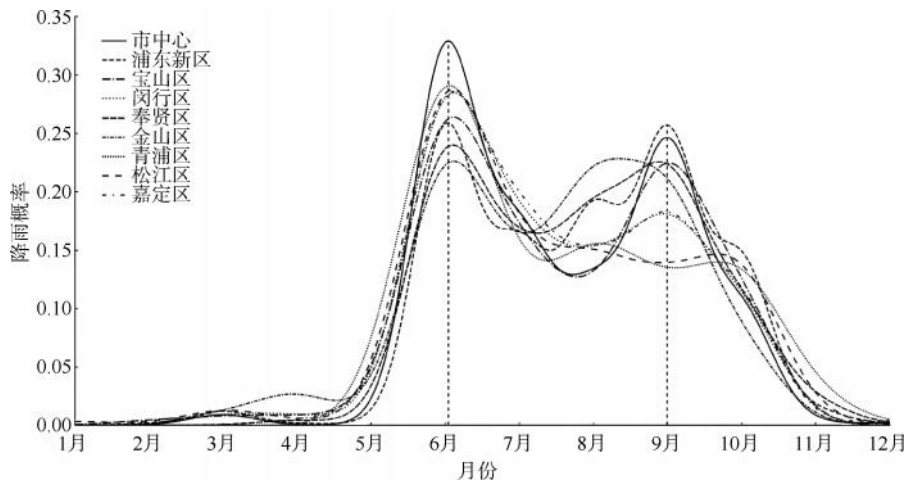


图4 上海市各区域暴雨年内发生概率图

Fig. 4 Probability Curves of Rainstorm Events in Different Regions of Shanghai City

表5 上海市各区域最大1h雨强统计表

Tab. 5 Statisticals of Maximum 1-Hour Rainfall in Different Regions of Shanghai City

区域	最大1h雨强/mm	发生时间	有无台风
嘉定	75.0	2015-08	有
松江	89.0	2014-07	有
青浦	49.0	2016-06	无
金山	66.0	2014-08	无
奉贤	49.0	2016-06	无
闵行	64.0	2015-08	有
宝山	59.5	2017-08	无
浦东新区	100.5	2015-08	有
市中心	68.5	2014-08	无

心和金山区以双峰型暴雨为主,占比为50%左右;松江区、奉贤区、闵行区和浦东新区的前峰型、中峰型和双峰型暴雨占比接近。

各类暴雨的年内分布也不同,由图8可知,前峰型暴雨主要集中在7月—11月,峰值在9月,占此类降雨总量的41.5%;中峰型暴雨则主要集中在10月、11月,这2个月总和占此类降雨总量的69.4%;后峰型暴雨则主要集中于7月、9月和10月,这3个月总和占此类降雨总量的88.3%;双峰型暴雨则主要发生于7月—11月,分布较平均,峰值在7月,占此类降雨总量的32.2%。

以上结果表明各类暴雨的特征不同:双峰型暴雨场次最多且降雨量较大,但时间集中性最低,在汛期各月发生概率比较平均;中峰型暴雨发生较多,雨

暴雨为主,占比为40%左右;嘉定区、宝山区、市中

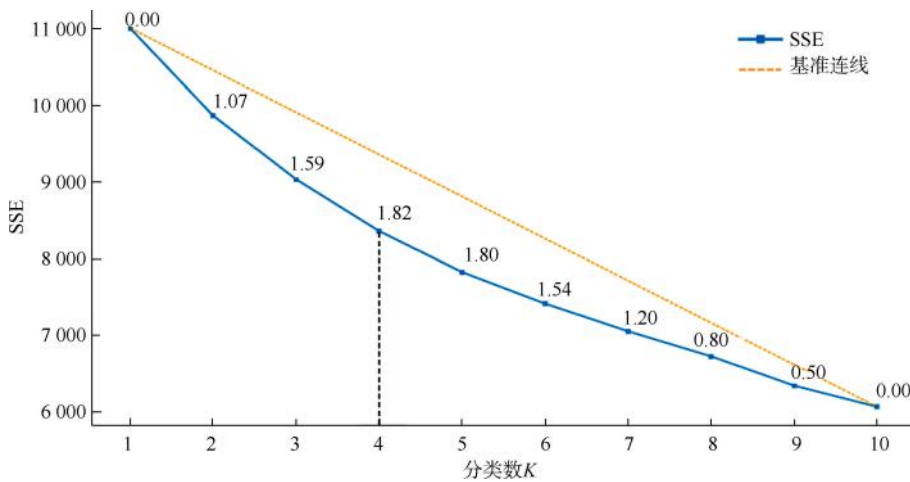


图5 SSE随K的变化折线图(每个点旁为各点到基准连线的垂距)

Fig. 5 Variation of within-Cluster SSE with K(Each Label = Distance to Chord)

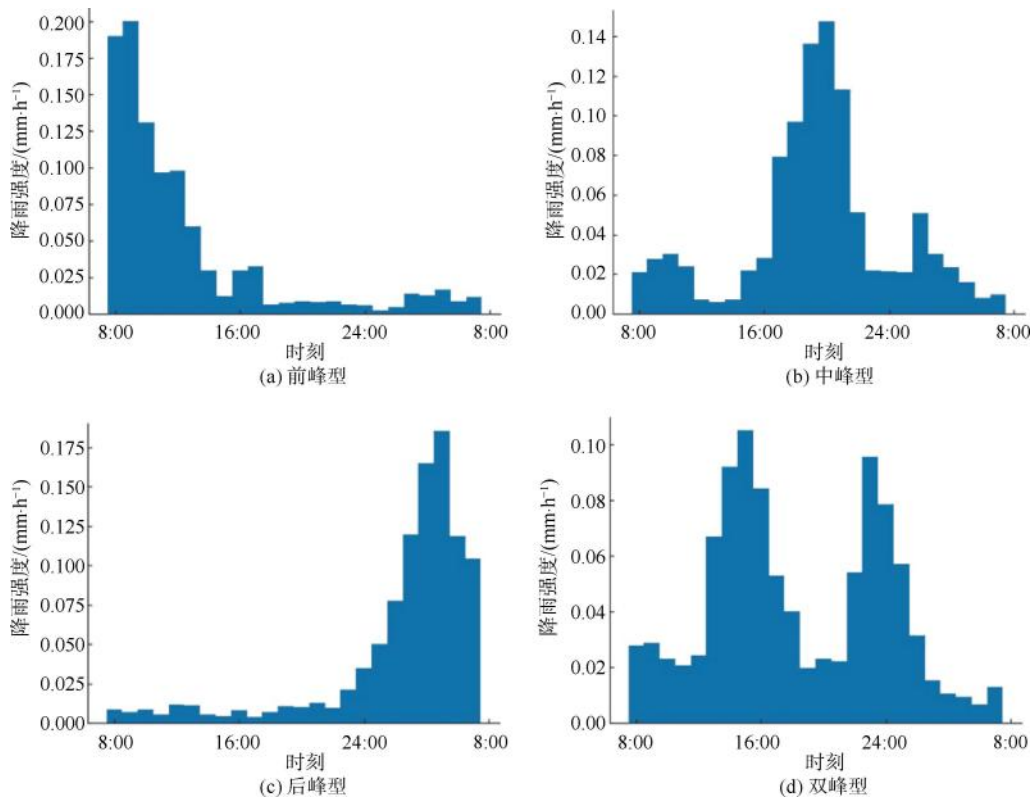


图6 各类暴雨雨型图

Fig. 6 Hyetographs of Different Rainstorm Types

表6 各类型暴雨特征统计

Tab. 6 Characteristic Statistics of Different Rainstorm Types

雨型	场次	平均降雨量/mm	峰值降水比
前峰型	550	58.99	37.10%
中峰型	648	70.24	33.00%
后峰型	366	80.78	37.70%
双峰型	961	81.59	30.70%

量大但时间集中性低,主要发生在10月、11月;前峰型暴雨较少,雨量小但时间集中性高,主要发生在9月;后峰型暴雨最少,但雨量和时间集中性最高,主要发生在7月。各区的暴雨组成不同:青浦区以前峰型暴雨为主;嘉定区、宝山区、市中心和金山区以双峰型暴雨为主。建议在暴雨洪涝防御工作中,各行政区在不同月份重点关注特定雨型的暴雨事件。

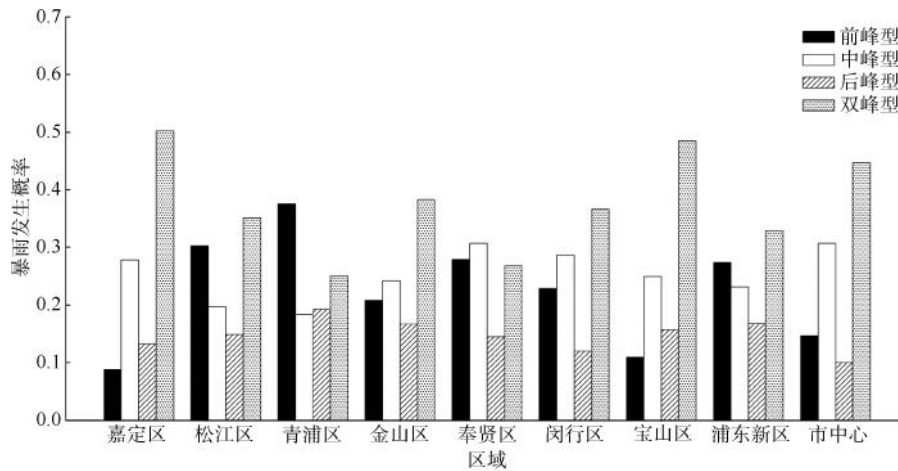


图7 各区域暴雨雨型组成图

Fig. 7 Rainstorm Types Composition of Different Regions

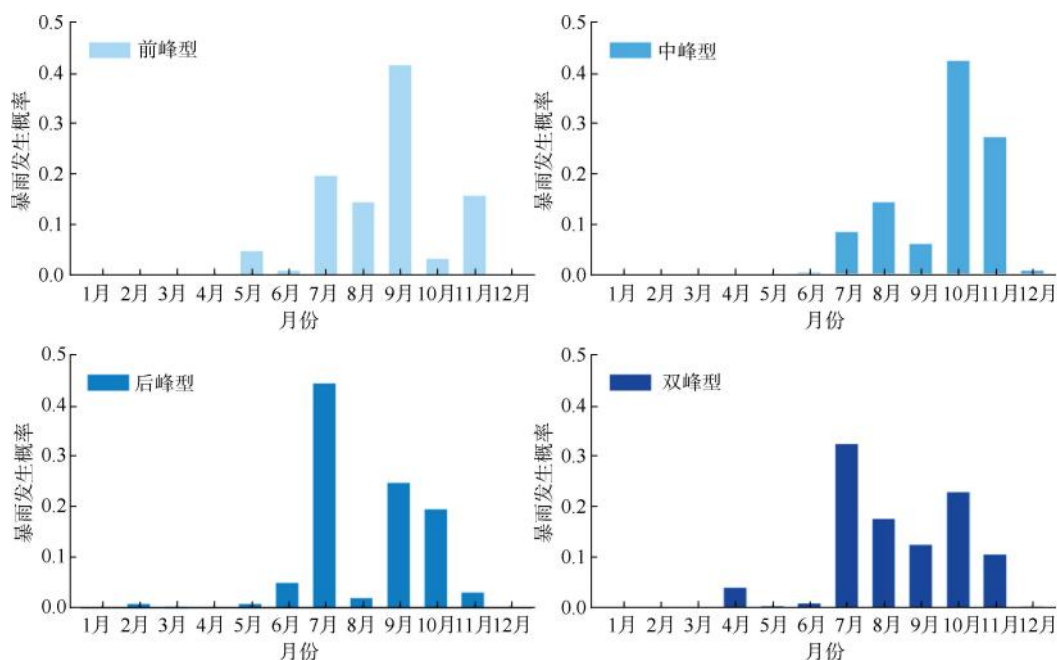


图8 各类型暴雨年内分布

Fig. 8 Monthly Distribution of Various Rainstorm Types

2.3 城郊暴雨差异比较

本文选择奉贤区作为郊区代表,与中心城区进行对比。尽管金山区不透水率最低(约为18%),但其传统工业属性明显,集中了大量工业园区,难以代表典型城郊特征。相比之下,奉贤区不透水率约为25%,在全市中仅高于金山区,并且注重新能源产业与生态建设,绿化良好,拥有丰富的森林和湿地资源,更符合典型“次城市化”郊区特征,因此适合作为与中心城区(>90%)的对比对象。表7和图9展示了城郊暴雨时空特性的对比结果,从中可以看出:市中心暴雨日数和日雨量高于奉贤区,分布高出150%和15%;市中心暴雨的峰值降水比高于奉贤区,在时间尺度上的集中性更强;市中心暴雨以中峰型和双峰型为主,两者占比超过75%;除后峰型暴雨最少外,其余3类暴雨在奉贤区的占比接近,在30%左右。以上结果表明,市区暴雨在日数、日雨量、时间上的集中性方面都强于郊区,并且相比于奉贤区,市中心的双峰型暴

表7 市中心和奉贤区暴雨特征统计表

Tab. 7 Characteristic Statistics of Rainstorms in Urban Center and Fengxian District

区域	暴雨日数/d	暴雨日雨量/mm	峰值降水比
上海市中心	5	71.82	30%
奉贤区	2	62.46	20%

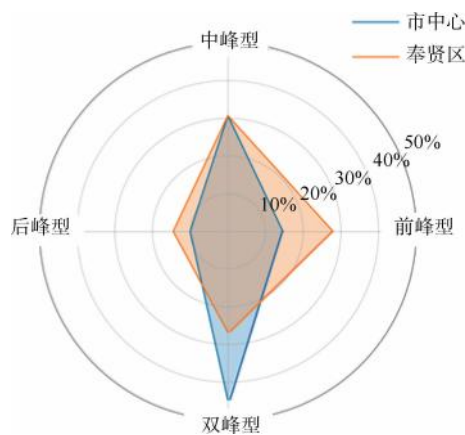


图9 市中心和奉贤区暴雨雨型组成图

Fig. 9 Composition Diagram of Rainstorm Types in Urban Center and Fengxian District

雨占比更高,由此可见,在当前环境下城市和郊区的暴雨在时空分布规律上存在显著差异,市区面临更大的暴雨威胁。

3 结论

本文基于2014年—2017年上海地区160个雨量站的雨量数据,研究不同等级降雨的降雨量和降雨日的时空分布规律,并重点关注暴雨事件,研究暴雨强度和雨型等时空分布规律,主要结论如下。

(1)在雨量方面,小雨、中雨和大雨的雨量在上海各区分布较均匀,而暴雨雨量有明显区域性,在市

区和南部沿海较高;在雨日方面,不同等级降雨的日数在各区分布规律不同,其中暴雨在北部和东部地区发生更为频繁。

(2)暴雨时空特征在上海各区域的分布不同,且有显著的时空差异性。在空间分布上,上海市北部和东南沿海区域的暴雨日数和雨量较高,而西部内陆区域则相反;在时间分布上,全市各区域暴雨发生概率的年内分布相似,季节性明显,集中在汛期,在6月、9月达到峰值,其中市中心相比于其他区域,暴雨在6月发生概率更高。

(3)上海的24 h暴雨雨型可分为单峰型和双峰型,其中单峰型又可分为3类:前峰型、中峰型和后峰型。各类型暴雨的特征不同:双峰型暴雨场次最多且降雨量最大,但时间集中性较低,在汛期各月发生概率比较平均;中峰型暴雨场次较多,主要发生在10月、11月;前峰型暴雨场次较少,主要发生在9月份;后峰型暴雨场次最少,但雨量和时间集中性较高,主要发生在7月。各区域的暴雨雨型组成不同:青浦区以前峰型暴雨为主;嘉定区、宝山区、市中心和金山区以双峰型暴雨为主。建议在暴雨洪涝防御工作中,对双峰型暴雨频发区域:应优化排水调度机制,在首次降雨后预排管网余量,以应对可能的第2次降雨高峰;对前峰型(中峰型)暴雨频发区域:应提前预警,并合理调控排水泵站启停,降低城市交通高峰期的积水风险;对后峰型暴雨频发区域:需加强夜间值班监控与自动化调度,防止凌晨突发积水。结合气象短临预报与实时监测,可建立多部门联动的预警-响应机制,实现排涝系统的动态优化与风险最小化。

(4)暴雨时空分布特征有明显的城乡差异性。上海市中心和奉贤区的暴雨时空特性和雨型比较结果表明,上海市中心暴雨的日数、雨量和在时间上的集中性都明显强于郊区,并且相比于奉贤区,上海市中心的双峰型暴雨占比更高,市区面临更大的暴雨威胁。

需要指出,本文结论主要基于2014年—2017年的降雨数据,存在一定时间局限性。已有研究^[10]表明,上海市近几十年来暴雨频率与强度呈现总体增加趋势,极端暴雨的发生概率也在上升,这意味着未来在更长尺度上,暴雨的发生概率及雨量仍有上升的潜在风险。

参考文献

- [1] 胡畔,陈波,史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1148-1162.
Hu P, Chen B, Shi P J. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1148-1162.
- [2] 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.
- [3] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.
- [4] 周正正,刘曙光, Daniel B Wright. 基于随机暴雨移置方法的城市设计暴雨分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 583-591.
Zhou Z Z, Liu S G, Wright D B. Analysis of urban design storm based on stochastic storm transposition[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 583-591.
- [5] 刘曙光,郑伟强,周正正,等. 极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2023, 44(2): 22-29, 81.
Liu S G, Zheng W Q, Zhou Z Z, et al. Flood risk and control in urban underground spaces with extreme rainfall[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2023, 44(2): 22-29, 81.
- [6] 陶贤成,张欣,王锡清. 上海地区降雨空间分布特征分析[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 25-28.
Tao X C, Zhang X, Wang X Q. Analysis on characteristics of rainfall distribution in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(10): 25-28.
- [7] 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.
- [8] Jiang Q, He X G, Wang J, et al. Spatiotemporal analysis of land use and land cover (LULC) changes and precipitation trends in Shanghai[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7897. DOI: 10.3390/app10217897.
- [9] Zhuang Q, Liu S G, Zhou Z Z. Spatial heterogeneity analysis of short-duration extreme rainfall events in megacities in China[J]. Water, 2020, 12(12): 3364. DOI: 10.3390/w12123364.
- [10] 易文林,俞汇,韦浩,等. 上海近42年暴雨强度及易发时段

- 特征分析[J]. 中国水利, 2023(8): 45-48.
- Yi W L, Yu H, Wei H, et al. Analysis of the characteristics of rainstorm intensity and its frequent period in Shanghai in recent 42 years[J]. China Water Resources, 2023(8): 45-48.
- [11] 褚明华, 杜晓鹤, 何秉顺. 我国水旱灾害防御应对[J]. 水利发展研究, 2024, 24(8): 1-8.
- Chu M H, Du X H, He B S. China's prevention and response to flood and drought disasters[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(8): 1-8.
- [12] 左其亭, 王子尧, 马军霞. 我国现代治水研究热点与发展展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 13-19.
- Zuo Q T, Wang Z Y, Ma J X. Hot spots and development prospects of modern water governance research in China[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 13-19.
- [13] Lei N, Gao L S, Liu S G, et al. The spatiotemporal clustering of short-duration rainstorms in Shanghai City using a sub-hourly gauge network[J]. Earth and Space Science, 2024, 11(3): e2023EA003442. DOI:10.1029/2023EA003442.
- [14] Li Z H, He W, Cheng M F, et al. SinoLC-1: The first 1 m resolution national-scale land-cover map of China created with a deep learning framework and open-access data[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(11): 4749-4780.
- [15] 上海市统计局. 2018年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2025-03-09) [2025-04-01]. <https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/nj18.htm?d1=2018tjnj/C0202.htm>.
- Shanghai Municipal Statistics Bureau. Shanghai statistical yearbook in 2018 [EB/OL]. (2025-03-09) [2025-04-01]. <https://tjj.sh.gov.cn/tjnj/nj18.htm?d1=2018tjnj/C0202.htm>.
- [16] 黄国如, 陈易德, 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.
- [17] 李雨欣, 王瑛, 马庆媛, 等. 基于DTW与K-means算法的河北场雨及雨型分区特征研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 860-868.
- Li Y X, Wang Y, Ma Q Y, et al. Research on the characteristics of rainfall events and rain pattern zoning in Hebei based on data mining technology [J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(5): 860-868.
- [18] 赵彦军, 夏军, 徐宗学, 等. 深圳市雨岛效应分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2021, 57(6): 768-775.
- Zhao Y J, Xia J, Xu Z X, et al. Rain island effect in Shenzhen City[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2021, 57(6): 768-775.

(上接第147页)

- [14] 李任超, 周琰, 郑琳, 等. 熵权-TOPSIS模型在九龙江北溪水质评价中的研究与应用[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 137-139.
- Li R C, Zhou Y, Zheng L, et al. Study and application of entropy weight-TOPSIS model in water quality evaluation of Jiulong River [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(24): 137-139.
- [15] 秦聪, 郭华. 基于熵权-TOPSIS法的汾河水水质评价[J]. 水资源开发与管理, 2020(9): 34-39.
- Qin C, Guo H. Evaluation of Fenhe river water quality based on EW-TOPSIS method [J]. Water Resources Development and Management, 2020(9): 34-39.
- [16] 闫沛初, 宋扬, 杜欢. 基于熵权-TOPSIS模型的华池县地下水水质评价研究[J]. 地下水, 2023, 45(1): 39-42.
- Yan P R, Song Y, Du H. Evaluation of groundwater quality in Huachi county based on entropy weight-TOPSIS model [J]. Ground Water, 2023, 45(1): 39-42.
- [17] 郭新园, 胡文佳, 陈彬, 等. 基于熵权TOPSIS模型的厦门湾海洋环境质量20年时空变化评估[J]. 应用海洋学学报, 2024, 43(4): 646-658.
- Guo X Y, Hu W J, Chen B, et al. Spatiotemporal changes assessment in marine environmental quality of Xiamen Bay over the past 20 years based on the entropy-weighted TOPSIS model [J]. Journal of Applied Oceanography, 2024, 43(4): 646-658.
- [18] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权TOPSIS评价法的上海市应对太湖流域超标洪水调度策略研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 55-61.
- Kong L T, Qian Z, Liu M. Study on scheduling in Shanghai city for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method [J]. Advances in Science Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 55-61.
- [19] 魏源源, 黄瑾, 姜莉, 等. 上海市生态清洁小流域水质提升治理模式探究[J]. 中国市政工程, 2025(2): 58-62, 145.
- Wei Y Y, Huang J, Jiang L, et al. Research on the governance model for improving water quality in ecological clean small watersheds in Shanghai [J]. China Municipal Engineering, 2025(2): 58-62, 145.
- [20] 程逸群, 陈向超, 黄志金, 等. 上海市泵站放江污染现状及治理对策浅析[J]. 净水技术, 2022, 41(S1): 259-262.
- Cheng Y Q, Chen X C, Huang Z J, et al. Analysis on current situation and control measures of discharge pollution of pumping station in Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S1): 259-262.