

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023411

谢雅洁, 刘敏. 太湖流域降雨时空特征与暴雨频率分析[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(1): 24-30. XIE Yajie, LIU Min. Analysis on the temporal and spatial characteristics of rainfall and the frequency of rainstorm in the Taihu Lake Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(1): 24-30. (in Chinese)

太湖流域降雨时空特征与暴雨频率分析

谢雅洁¹ 刘敏²

(1. 同济大学土木工程学院水利工程系, 上海200092; 2. 水利部太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海200434)

摘要: 为了探究太湖流域降雨时空分布情况及设计暴雨特征, 基于2001—2020年的GPM-IMERG-final卫星数据, 采用Spearman秩相关检验、Mann-Kendall趋势分析、Pettitt变点检验、滑动平均等方法, 对太湖流域降雨进行年、月、日尺度的时空分布分析, 并采用随机暴雨移置法(SST法)对太湖流域内防洪形势严峻的杭嘉湖区进行暴雨频率分析。结果显示: ①太湖流域年降雨量及汛期降雨量基本保持同频显著增加趋势, 以突变点2014年为界, 年均降雨量较突变前呈全流域增加趋势, 且在环绕太湖区一周的范围内增幅更大。小雨多分布在流域西南部, 而暴雨多分布于流域东南部。②太湖流域月降雨量及较大降雨日数均集中在6—8月。③太湖流域极端降雨呈由西向东、由北向南递增趋势, 东部的浦东浦西区是极端降雨的重点研究区域。太湖区和太湖流域在年降雨量及年最大1d降雨量上均保持高相关性。④SST法计算的设计暴雨值具有较高可靠性。同一降雨历时, 设计降雨量增速随重现期的增加而变缓, 同一重现期, 设计降雨量增幅随降雨历时增加而增加。研究成果可为太湖流域防洪减灾提供参考。

关键词: 降雨时空分布; 随机暴雨移置法(SST法); 设计暴雨; 太湖流域

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2025)01-24-07

1 研究背景

在气候变化和人类活动的影响下, 全国多地暴雨洪灾频繁发生, 威胁到人民生命财产安全。未来, 气候变化不确定性将进一步加大, 而中国位于气候变化的敏感区^[1-2], 其降雨对全球气候变暖的响应会更为敏感, 暴雨形势将愈演愈烈, 进行降雨时空分布分析及合理的暴雨频率分析是处置好暴雨问题永恒的课题^[3-4]。

太湖流域地处我国长江三角洲, 改革开放以来, 随着社会经济的高速发展, 逐渐形成了以特大城市上海为核心的世界级城市群, 是我国人口最密集、产业最集中、经济最发达的地区之一。高速城市化发展在有力推动经济发展的同时, 也导致水文序列非一致性日渐显著, 降雨空间异质性进一步升高, 而两者常在水文分析

中遭到简化或忽略; 加之太湖流域易受由春夏期冷暖气流遭遇形成的“梅雨”及由盛夏期副热带高压控制引起的“台风雨”影响, 降雨充沛, 易引发暴雨洪涝灾害。因此研究太湖流域的降雨时空特征并进行有效的暴雨频率分析具有必要性和紧迫性, 其成果可靠性也关系到流域的防洪安全^[5-6]。

因此, 本文以太湖流域为研究区域, 采用GPM-IMERG-final卫星数据, 运用Spearman秩相关检验、Mann-Kendall趋势分析(M-K)、Pettitt变点检验、滑动平均等方法, 从年、月、日等时间尺度及空间分布综合研究太湖流域降雨时空分布情况及极端降雨情况, 并采用随机暴雨移置法(SST法)对太湖流域内人类活动频繁、防洪形势严峻的杭嘉湖区进行暴雨频率分析, 以期以太湖流域防洪减灾提供参考。

收稿日期: 2023-10-19

第一作者信息: 谢雅洁, 女, 硕士研究生, E-mail: 2216464232@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371030)。

2 数据及研究范围

2.1 降雨数据

本文选用的 GPM-IMERG-final 卫星格点降雨数据集来源于美国国家航空航天局(NASA, <https://www.nasa.gov/>), 时间序列为 2001 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日, 时空分辨率分别为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 、30 min。该数据集具有降雨捕捉准确度高^[7-8]、时空分辨率高、全天候观测等优势, 且已有大量研究表明该数据集在我国有良好适用性^[9], 可以应用

于太湖流域的降雨研究分析中。

2.2 研究范围

本文研究区域为太湖流域(北纬 $30^\circ 07' - 32^\circ 14'$ 、东经 $119^\circ 03' - 121^\circ 54'$)。太湖流域以平原为主, 平原占总面积的 4/6, 水面占 1/6, 丘陵和山地占 1/6。三面临江滨海, 地形特点为周边高、中间低。太湖流域位于中纬度地区, 属湿润的北亚热带气候区, 气候具有明显的季风特征, 四季分明。太湖流域地域广阔, 水文情况空间差异较大, 根据其相似性和差异性, 将太湖流域分为 7 个水利分区(图 1)。

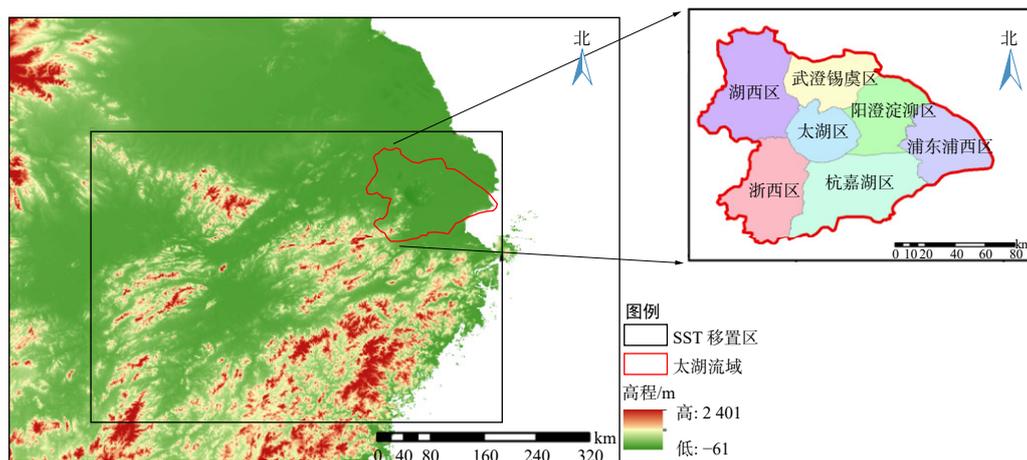


图 1 太湖流域地理位置图

3 研究方法

因篇幅有限, M-K、Pettitt 变点检验、滑动平均等方法本文不做详细介绍, 以下对 Spearman 秩相关检验法和 SST 法做简要介绍。

3.1 Spearman 秩相关检验法

Spearman 秩相关检验法用以反映两个变量间的相关性, 通过研究两变量间的秩次差异来衡量它们之间的相关性, 由 Spearman 于 1904 年发表。 X, Y 为两列长度均为 N 的时间序列, Spearman 秩相关系数 r 定义为:

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)}$$

式中: $d_i = R_{x_i} - R_{y_i}$, 为两者秩次差; R_{x_i} 和 R_{y_i} 分别为将时间序列 X, Y 从大到小排序后 x_i, y_i 的位置秩次。

r 的值域为 $[-1, 1]$, $r = 0$ 表示两变量间无相关性, $r = -1$ 表示完全负相关, $r = 1$ 表示完全正相关。 r 的绝对值越大,

表明两变量间相关性越强。

3.2 SST 法

本文采用 SST 法对杭嘉湖区进行暴雨频率分析, 可有效模拟延长研究区域的年极值暴雨序列, 已在国内外各地得到应用和发展^[10-12]。详细步骤可参考文献^[13], 简要介绍如下:

(1) 选定移置区: 选定一个包含研究区域在内的移置区 A' , 该区域需包含足够多的降雨事件, 且水文气象条件相似。本文选取的 SST 移置区如图 1 所示。

(2) 生成暴雨目录: 在选定的移置区 A' 内, 从 n 年的降雨序列中选取历时为 t 的最大 m 场降雨(各场降雨之间无时间重叠), 形成暴雨目录。本文选取 m 为 200, n 为 20。

(3) 空间异质性检验: 基于暴雨目录中 m 场降雨的位置, 采用非参数估计法中的二维高斯核密度估计法来估计移置区 A' 内不同位置暴雨发生的概率。移置区内各部分降雨量和概率相似时, 移置区 A' 称为“一致区”, 否则称为“非一致区”。据图 2 可知本文移置区为“非一致区”。

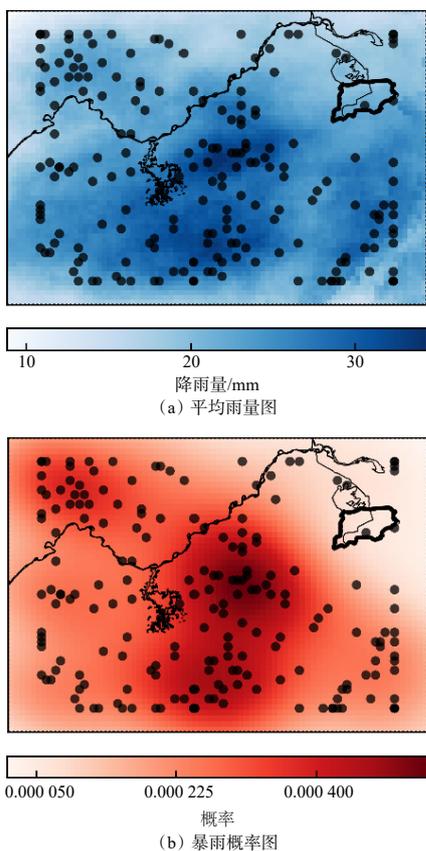


图2 暴雨诊断图

(4)得到年最大暴雨序列:从暴雨目录 m 中选取 k 场暴雨,假设其中 k 服从泊松分布($\lambda=m/n$),作为该年的暴雨数量。对每场被选定的暴雨进行随机移动,移动仅改变降雨场的坐标,而不改变其运动和演化,该过程称为“随机移置”。移置后,计算研究区域内 t 时长的降雨累计量,并取其最大值作为“年最大降雨值”,该过程称为“重采样”。该过程重复 N 次,得到 N 年、 t 时长的“年最大降雨”序列,对其从大

到小排序,则可得到重现期 $T_i=N/i$ 的设计暴雨估计量 R_i 。

(5)得到最终设计暴雨量:为了尽可能减小随机误差,增加结果可靠性,将步骤(3)重复 S 次,并取 S 次结果的中位数作为最终设计暴雨量,得到结果可绘制成强度—历时—频率图或输入后续水文模型进行进一步研究。

4 结果分析

4.1 年降雨量变化分析

太湖流域年降雨量 1 140.87 ~ 2 149.22 mm,多年平均降雨量 1 445.00 mm。最小值为 1 140.87 mm,出现在 2003 年,最大值为 2 149.22 mm,出现在 2020 年,最大值与最小值相差 1.88 倍,年际差异较大。经 M-K 检验,年降雨量整体呈显著增长趋势。由 Pettitt 检验,突变点在 2014 年出现,其中 2001—2014 年年降雨量以 10.4 mm/a 增加,2014—2020 年年降雨量以 95.1 mm/a 增加。据 5 年滑动平均和累计距平图显示,太湖流域年降雨量在突变点之后基本呈持续上升趋势,在 2018 年有小幅下降。

太湖流域汛期(5—9月)降雨量 591.38 ~ 1 373.06 mm,多年平均汛期降雨量为 855.16 mm。最小值为 591.38 mm,出现在 2003 年,最大值为 1 373.06 mm,出现在 2020 年,最大值与最小值相差 2.32 倍,可见汛期降雨年际差异大于年降雨量。经 M-K 检验,汛期降雨量也呈显著增长趋势。汛期平均降雨量占年平均降雨量的 59%,Spearman 相关系数达 0.81,可见太湖流域年降雨与汛期降雨基本保持同频变动。汛期多年平均降雨日数为 89 d,占全年总降雨日数的 50.93%,降雨量较降雨日数相比更集中在汛期。全年、汛期降雨量及累计距平图如图 3 所示。

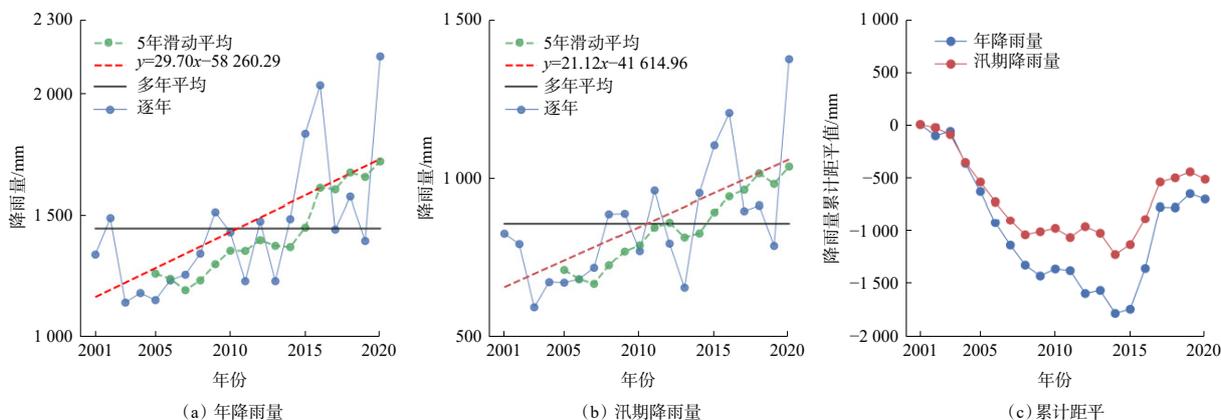


图3 全年、汛期降雨量及累计距平图

图4(a)为20 a年均降雨量分布图,可以看出,年均降雨量北少南多,东少西多,呈由西南向全流域递减趋势。以Pettitt检验突变点(2014年)为界,分别绘出2001—2014年年均降雨量分布图(图4(b))和2014—2020年年均降雨量分布图(图4(c)),对比发现,降雨量整体空间分布形态基

本不变,绘出两者差值图(图4(d)),发现全流域降雨量均有不同程度增加,在环绕太湖区一周的范围(以下简称为环太湖区)内,包括整个浦东浦西区降雨量增幅更大,增幅大致在240~270 mm,在杭嘉湖区西部增幅最大,达近330 mm。

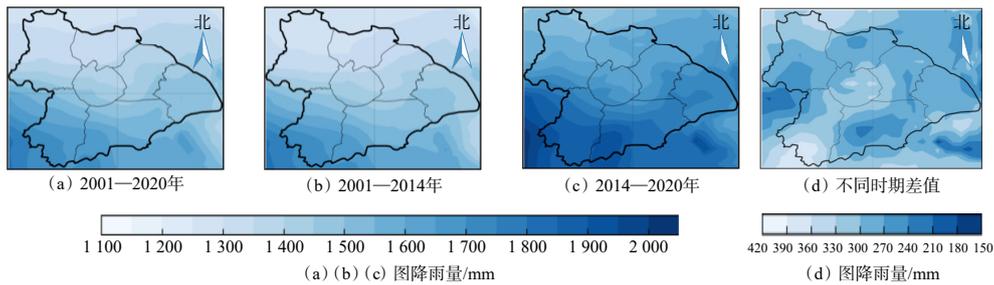


图4 太湖流域不同时期年均降雨量空间分布变化及差值图

将太湖流域的日降雨量分为小雨、中雨、大雨、暴雨及以上4个等级,2001—2020年各等级降雨量及降雨日数变化情况见表1,各等级降雨量和降雨日数趋势见图5。可以看出,除小雨降雨量和降雨日数外,其他等级降雨量和降雨日数均呈上升趋势。20 a间,年均暴雨及以上为两场。小雨降雨日数占全年降雨日数74.3%,而降雨量只占29.0%,大雨、暴雨及以上降雨日数仅占7.4%,却贡献了35.5%的降雨量。

表1 2001—2020年各等级降雨量及降雨日数变化情况表

等级	年均降雨量/mm	年均降雨日数/d	年均降雨量比重(%)	年均降雨日数比重(%)
小雨(0.1~10 mm/d)	422	130	29.0	74.3
中雨(10~25 mm/d)	516	32	35.5	18.3
大雨(25~50 mm/d)	366	11	25.1	6.3
暴雨及以上(≥ 50 mm/d)	151	2	10.4	1.1

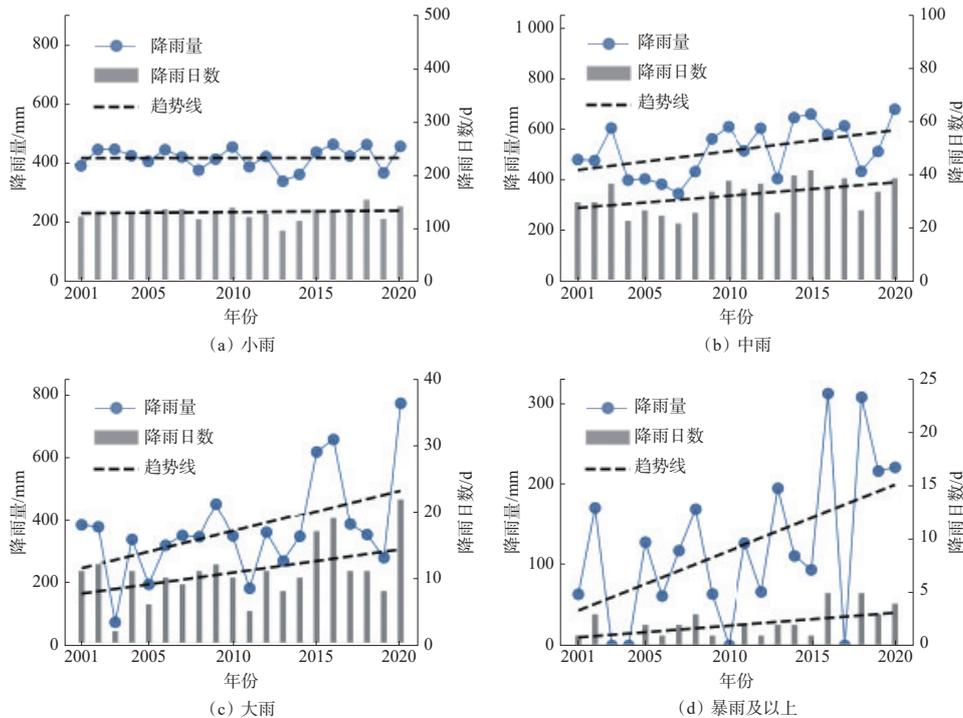


图5 2001—2020年各等级降雨量及降雨日数趋势图

各等级降雨量空间分布为:小雨呈四周向流域中心减少趋势;中雨集中在流域西南部,呈流域西南部向流域内减少趋势;大雨集中在流域中部;暴雨及以上集中在流域东部与南部。可见,太湖流域各等级降雨空间分布明显不均,且随着雨强的增加,雨量中心从流域西南部逐渐移向流域东南部。因此,太湖流域东南部是极端降雨的重点研究区域。

4.2 月降雨量变化分析

图6为各等级月均降雨量及降雨日数箱式图。可以发

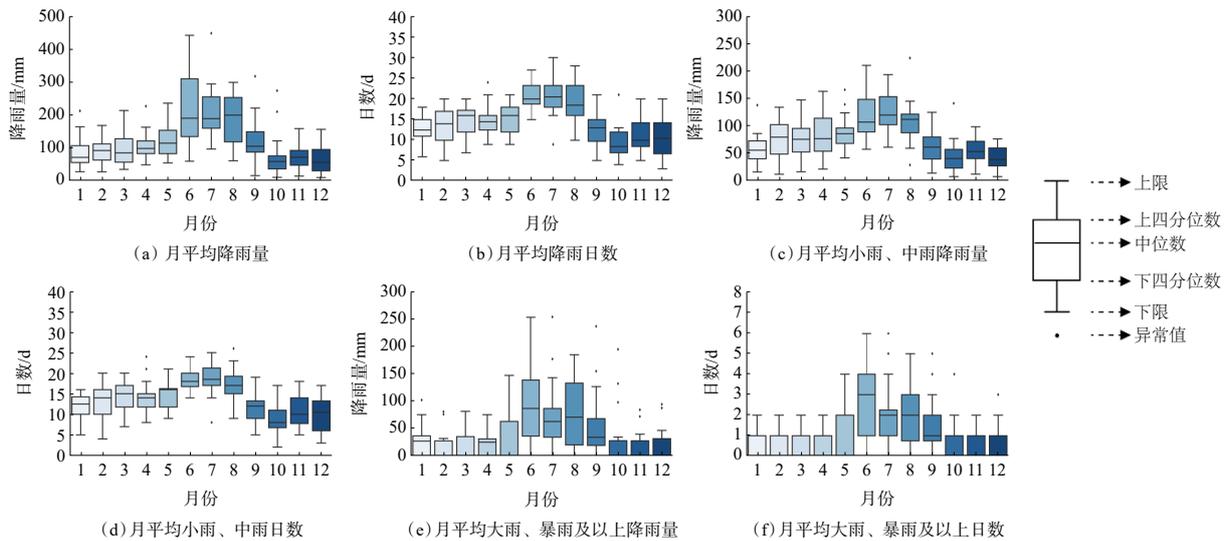


图6 各等级月均降雨量及降雨日数箱式图

4.3 最大1 d降雨量变化分析

图7为2001—2020年太湖流域单格点最大1 d降雨量值分布图,可直观看出各格点20 a间最大1 d降雨量值及流域极端降雨总体分布情况。据图可知,其分布由西向东、由北向南呈增加趋势,其中太湖区由中心向四周呈递减趋势。最大值为122.9 mm,发生于浦东浦西区东部,最小

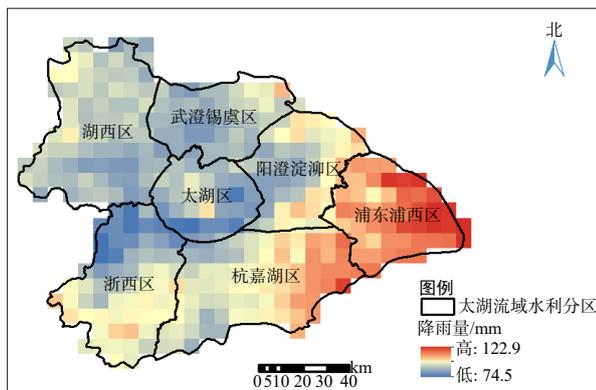


图7 2001—2020年太湖流域单格点最大1 d降雨量值分布图

现,各等级月均降雨量及降雨日数均主要集中在汛期的6—8月,为梅雨期末和台风期初(6—7月为梅雨期,8—9月为台风期),其中6月月均、大雨和暴雨及以上降雨量和降雨日数均处高值,而7月小雨、中雨降雨量和降雨日数水平更为突出。月均、小雨、中雨降雨量及降雨日数在1—4月内呈缓慢增加趋势,大雨、暴雨及以上在该时期内无明显趋势,各类降雨量及降雨日数在10—12月均处于低值水平。

值为74.48 mm,发生于浙西区西北部。结合图4(d)发现,虽然在环太湖区一周为格点最大1 d降雨量低值区,但是近年来,年降雨量有升高趋势。与暴雨空间分布一致,极端降雨多发生于太湖流域东部。

图8、图9分别为太湖流域各水利分区暴雨次数与年均暴雨量统计图,单日面平均降雨量50 mm以上称为一次暴雨事件,并统计其暴雨量,可进一步研究面极端降雨量及极端降雨次数。两图分布一致,浦东浦西区暴雨次数与年均暴雨量均居流域内最高位,位于流域西北部的湖西区两值均为最低,最高和最低暴雨次数相差23次、年均暴雨量相差85 mm。暴雨次数与年均暴雨量在流域内整体分布为北少南多、西少东多,与单格点多年最大1 d降雨量值分布相似。

图10、图11分别为太湖流域年降雨量和年最大1 d降雨量的Spearman秩相关系数。据图可知,太湖区在年降雨量和年最大1 d降雨量上均与全流域相关性最高,湖

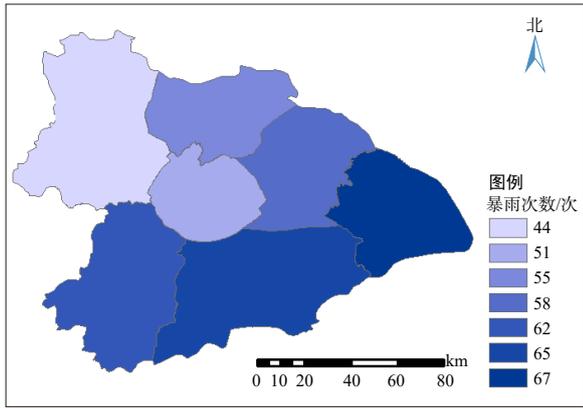


图8 太湖流域各水利分区暴雨次数统计图

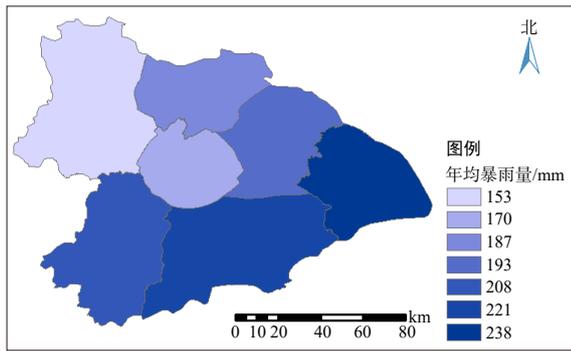


图9 太湖流域各水利分区年均暴雨量统计图

西区与全流域相关性最低。对比各水利分区发现,湖西区与杭嘉湖区、浦东浦西区在两种雨量上相关性都很低,而阳澄淀泖区与湖西区在年降雨量上有较高的一致性,但在年最大1d降雨量上相关性却很低。可见流域内各水利分区不仅在空间尺度上降雨量分布差异大,在时间尺度

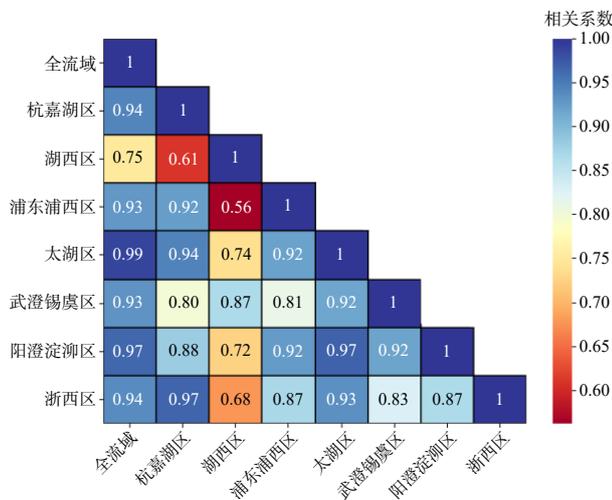


图10 太湖流域年降雨量Spearman秩相关系数

上,各分区年降雨量及年最大1d降雨量相关性差异也显著。

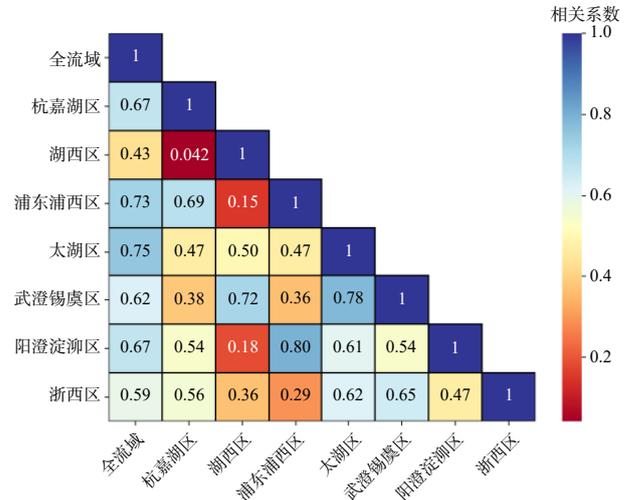


图11 太湖流域年最大1d降雨量 Spearman秩相关系数

4.4 暴雨频率分析

分别采用 SST 法和传统矩法得到历时 t 为 3 h、24 h、72 h 的强度—历时—频率曲线图(图 12)及不同重现期及降雨历时下的设计暴雨量表(表 2)。图中彩色曲线为不同重现期下 $N=1\ 000\ a$, $S=1\ 000$ 个设计暴雨估计值的中值,上下限(阴影区域)为估计值的 90% 置信区间,黑色曲线为矩法计算结果。各历时矩法的 C_V 值分别为 0.29、0.41、0.42,且 $C_S=3.5C_V$ ^[14]。由图可知, SST 法与矩法结果相近,且矩法结果均在 SST 法得到的置信区间内,但矩法结果在高重现期下略有高估,主要是由于在高重现期时, SST 法计算的设计暴雨值是由暴雨目录中少数暴雨事件移置得到,其结果的离散程度相对较大,因而可能会出现上限。总体

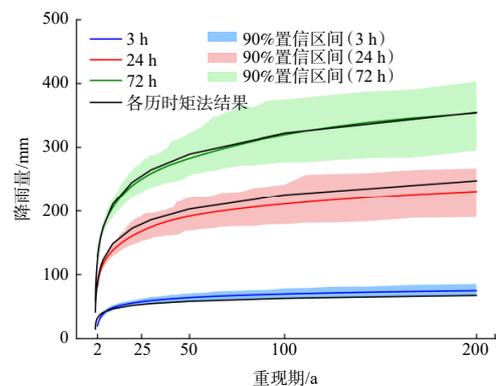


图12 强度—历时—频率曲线图

而言, SST法计算的设计暴雨值具有较高可靠性。分析SST法结果可知,随着降雨历时或重现期的增加,置信区间的范围都随之扩大。对比同一降雨历时,重现期较低时,设计暴雨量增速更快,随着重现期的增加,增速逐渐变慢。对比不同降雨历时,同一重现期下,历时越大设计暴雨量增幅越大。

表2 不同重现期及降雨历时下的设计暴雨量表

降雨历时/h	mm			
	2 a	25 a	50 a	200 a
3	19.6	57.5	63.9	74.8
24	81.3	167.9	191.5	230.6
72	128.2	250.1	282.7	353.7

5 结 论

(1)2001—2020年,时间上,太湖流域年降雨量及汛期降雨量基本保持同频显著增加趋势;空间上,以突变点(2014年)为界,年均降雨量较突变前呈全流域增加趋势,且在环太湖区附近增幅更大。各等级降雨的空间分布存在明显不均匀性。

(2)太湖流域月均降雨量及降雨日数均较为集中在6—8月,而在10—12月均处于低值水平。

(3)空间上,太湖流域极端降雨呈由西向东、由北向南递增趋势,东部的浦东浦西区应是极端降雨的重点研究区域。时间上,与全流域对比,太湖区的年降雨量和最大1d降雨量与其相关性最高,湖西区相关性最低;各水利分区相关性对比,湖西区和阳澄淀泖区、浦东浦西区相关性都很低。

(4)对比SST法与传统矩法的暴雨频率分析结果发现,SST法计算的设计暴雨值具有较高可靠性,结果显示,同一降雨历时,重现期低的设计降雨量增速更快,随着重现期的增加,增速逐渐变慢。同一重现期时,降雨历时越大则设计降雨量增幅越大。所得结果可为太湖流域设计暴雨研究提供参考。

参考文献

- [1] XU Y, GAO X J, GIORGI F. Regional variability of climate change hot-spots in East Asia[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 783-792.
- [2] 孙林海, 王凌, 李威, 等. 2022年我国主要天气气候特征[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(1): 8-15, 21.
- [3] 张小稳, 刘国庆, 陈光育, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害风险评估与对策研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(8): 13-18.
- [4] 赵丽平, 邢西刚, 王刚, 等. 基于常规矩与线性矩的IWHR暴雨洪水频率分析计算软件研发与应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(2): 44-48.
- [5] 胡艳, 林荷娟, 刘敏. 太湖流域设计暴雨修订[J]. *水文*, 2016, 36(5): 50-53.
- [6] 刘克强, 蔡文婷. 太湖流域圩区治理现状调查与思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(8): 19-22, 28.
- [7] 胡庆芳, 张野, 李伶俐, 等. GPM近实时反演数据对河南省2021年“7·20”极端暴雨的比较分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 567-580.
- [8] 张茹, 雍斌, 曾岁康. GPM卫星降雨产品在中国大陆的精度评估[J]. *人民长江*, 2021, 52(5): 50-59.
- [9] 吴一凡, 张增信, 金秋, 等. GPM卫星降雨产品在长江流域应用的精度估算[J]. *人民长江*, 2019, 50(9): 77-85, 152.
- [10] 周正正, 刘曙光, WRIGHT B D. 基于随机暴雨移置方法的都市设计暴雨分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 583-591.
- [11] WRIGHT D B, SMITH J A, BAECK M L. Flood frequency analysis using radar rainfall fields and stochastic storm transposition[J]. *Water resources research*, 2014, 50(2): 1592-1615.
- [12] 王帆, 王晓童, 庄玲, 等. 基于郑州“7·20”特大暴雨移置的山东省傅疃河流域洪水形势分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 19-24, 55.
- [13] WRIGHT B D, SMITH J A, VILLARINI G, et al. Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 488: 150-165.
- [14] 王家祁, 张建云. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

编辑 姚力玮