

太湖流域武澄锡虞区降雨空间特征分析

李艳明,吴心艺,胡星星

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司,江苏苏州 215000)

摘要:为研究江苏省太湖流域武澄锡虞区降雨空间变化特征,利用武澄锡虞区20个雨量站点1951—2020年的多年逐日降雨资料,从降雨总量、频次、强度方面来分析典型年和实况点降雨空间分布情况。研究表明武澄锡虞区洪涝情势复杂,区域防洪压力已从传统单一型极端降水向复合型、长历时累积型风险转变。

关键词:降雨特征;空间分布;武澄锡虞区

中图分类号:TV125 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)03-0009-0005

Analysis of spatial characteristics of rainfall in Wuchengxiyu District of the Taihu Basin

LI Yanming, WU Xinyi, HU Xingxing

(Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to study the spatial variation characteristics of rainfall in the Wuchengxiyu District of the Taihu Basin, Jiangsu Province, daily rainfall data from 20 rainfall stations in this region during 1951—2020 were used to analyze the spatial distribution of rainfall in typical years and at actual stations in terms of total rainfall, rainfall frequency, and rainfall intensity. The results show that the flood situation in the Wuchengxiyu District is complex, and the regional flood control pressure has shifted from traditional single type extreme precipitation to compound and long duration cumulative risks.

Key words: rainfall characteristics; spatial distribution; Wuchengxiyu District

1 概述

武澄锡虞区位于太湖流域北部、江苏省南部,东自望虞河江边枢纽起沿望虞河东岸线直至太湖边沙墩港口止;南与太湖区为邻,自湖西区东界线起,沿太湖湖边自然走向到鼋头渚山军嶂山分水岭至山军峰,再沿太湖湖边至沙墩港口;西与湖西区接壤;北自湖西区东界线起沿长江堤岸至望虞河常熟枢纽,行政区划涉及无锡、常州和苏州等地,区内以白屈港控制线为界,分为武澄锡低片及澄锡虞高

片,是太湖平原腹地的关键水文单元,也是典型的高度城镇化区域^[1]。

武澄锡虞区河网密布、水系交错,易受西侧湖西高地洪水的侵袭,区域内部武澄锡低片易受东部澄锡虞高片洪水倒灌,北部及南侧又分别受长江洪潮和太湖高水的影响,洪水外排较缓,消涨历时较长。在全球气候变化与区域城镇化加快的双重影响下,下垫面改变,区域降雨时空分布格局发生了显著变化^[2-4],区域防洪安全也面临严峻挑战^[5-6]。本文选取武澄锡虞区作为研究区域,探究下垫面变

收稿日期:2025-11-18

作者简介:李艳明(1999—),女,硕士,主要从事水利工程规划研究工作。E-mail:1416238086@qq.com

化背景下区域降雨空间特征变化情况,采用年、月、日时间尺度对区域内重要雨量站点的雨量数据进行分析,探究降雨空间分布特征,旨在为区域防洪减灾提供一定参考。

2 数据与方法

2.1 研究数据

根据区域内雨量站点分布和雨量观测资料条件,综合考虑样本系列的可靠性、一致性和代表性,以现有雨量观测站网为基础,力求能控制区域面上降水量和暴雨特征值在区域范围内的分布规律为目标,且为充分利用雨量资料和较好控制雨量的空间分布,区域内的雨量站资料尽可能使用,区域边缘测站的雨量资料可以跨区使用。根据面雨量计算要求,武澄锡虞区雨量站选择增加湖西区的魏村闸、坊前、漕桥雨量站和阳澄淀泖区的望虞闸、甘露、望亭雨量站。按照上述原则,本次武澄锡虞区降雨特性分析共选取20个雨量代表站,站网密度平均达200 km²/站,各站资料均在30 a及以上。

根据各站雨量资料,1951年后区域逐步开始有较为系统的雨量观测,区域内代表性较好的站点均有较系统的观测。为使雨量系列具有一致性,便于统计参数比较和协调,使得区域面雨量计算及暴雨频率分析更为合理,基于现有数据,对资料进行插补延展和修正,统一采用1951—2020年雨量观测资料作为同步系列,系列长度为70 a。选用雨量站及资料系列统计情况见表1。

2.2 研究方法

2.2.1 面雨量计算方法

综合考虑区域暴雨的区域分布规律和空间尺度,地形地貌及产汇流特征,水系的相对闭合性,以及以往暴雨产汇流单元划分习惯等因素,将武澄锡虞区划分为武澄锡低片和澄锡虞高片2个暴雨分区。其中,沙洲自排片纳入澄锡虞高片范围统一计算。根据雨量站点数量及空间分布情况,本次在计算分区逐日面平均雨量时,采用泰森多边形法计算,计算公式为

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_i} f_j p_{ij} + f_2 p_{i2} + \dots + f_n p_{in} \quad (1)$$

式中: P_i 为分区第*i*日面平均雨量,mm; P_j 为分区第*j*座雨量站日雨量,mm; n_i 为用于计算分区平均雨量的站点数; f_i 为各雨量站用泰森多边形面积计算的权重系数。

表1 雨量代表站选取情况

序号	站名	所在区域	资料系列年份
1	常州	武澄锡虞区	1923—2020
2	焦溪	武澄锡虞区	1977—2020
3	横林	武澄锡虞区	1977—2020
4	洛社	武澄锡虞区	1977—2020
5	无锡	武澄锡虞区	1923—2020
6	定波闸	武澄锡虞区	1960—2020
7	青阳	武澄锡虞区	1929—2020
8	白茆山	武澄锡虞区	1967—2012
9	长寿	武澄锡虞区	1960—2020
10	张泾	武澄锡虞区	1982—2020
11	杨舍	武澄锡虞区	1980—2015、2018—2020
12	陈墅	武澄锡虞区	1953—2020
13	张家港闸	武澄锡虞区	1959—2020
14	十一圩港闸	武澄锡虞区	1957—2020
15	魏村闸	湖西区	1977—2020
16	坊前	湖西区	1971—2020
17	漕桥	湖西区	1957—2020
18	望虞闸	阳澄淀泖区	1962、1967—2020
19	甘露	阳澄淀泖区	1956—2020
20	望亭	阳澄淀泖区	1951—2020

由于区域内部各暴雨分区面积不同及雨量站点疏密有所差异,对分区组合及整个区域的面平均雨量,直接按各分区面积采用权重平均法计算,其计算式为

$$\bar{P} = \frac{1}{F} \sum_{m=1}^k f_m P_m \quad (2)$$

式中: \bar{P} 为武澄锡虞区面平均雨量,mm; F 为武澄锡虞区面积,km²; P_m 为第*m*分区平均雨量,mm; f_m 为所属第*m*分区面积,km²; k 为分区数目。

根据雨量资料统计,20世纪七八十年代后各雨量站观测系列基本完整和同步,雨量站点多、密度大,而此前大部分站点均有缺测和停测现象,在计算面平均雨量时可采用的站点相对较为稀少。为增加雨量系列的一致性和提高面雨量的计算精度,对早期少站的平均雨量拟利用后期多站面雨量和少站面雨量的相关关系进行修正。

根据各分区不同时期的雨量资料情况,分别建立近期的多站平均雨量与同期少站平均雨量的相关关系,同期的少站平均雨量和多站平均雨量相关

关系均较好,不同站点数量的平均雨量相关系数均在0.90~1.00之间,并且有历时越长相关性越好的趋势。因此,通过建立并利用近期的多站平均雨量与同期少站平均雨量的线性相关线,分别对各分区早期少站平均雨量进行系统修正,即利用相关线延展多站平均雨量作为区域面雨量,由此得到各分区一致性较好的1951—2020年同步面雨量系列,供频率分析计算用。

2.2.2 暴雨频率分析方法

武澄锡虞区各时段雨量的均值按矩法估计, C_1 和 C_2 的初值按经验频率点据与P-Ⅲ型理论曲线绝对离差和最小为准则得出,然后通过目估适当调整得出结果。采用现行配线法,即对降雨系列进行排序统计,并考虑特大值处理,计算经验频率,然后通过P-Ⅲ型曲线进行适线,调整参数,最后选择与经验点据配合较好的1条理论频率曲线,由此可求出各保证率的设计雨量。经验频率计算采用期望公式来估算,其计算式为

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 为等于和大于水文要素的经验频率; m 为水文要素由大到小排列的序号; n 为样本容量,即资料系列的总项数。

2.2.3 暴雨空间分布分析方法

根据《降水量等级》气象国家标准(2012年),24 h降水量在50.0~99.9 mm范围内的降雨为“暴雨”,100~249.9 mm范围内的降雨为“大暴雨”,大于等于250 mm的降雨为“特大暴雨”。分别对武澄锡虞区20个雨量站长系列(1951—2020年)以及近20年系列(2001—2020年)发生暴雨(降雨50 mm)以上的日数进行统计,计算得到表征各站点暴雨发生

频次的多年平均年暴雨日数,并应用反距离权重法进行分析,研究其空间分布特征。

3 结果分析

3.1 典型年降雨特性分析

根据太湖流域及武澄锡虞区历年暴雨实际情况,选取对武澄锡虞区影响较大的1991年、2016年、2020年梅雨型降雨,从降水量、降雨空间、降雨时程等方面进行分析。

3.1.1 降水量分析

1991年武澄锡虞区最大3 d降水量253.1 mm,重现期约40 a;7日降雨约340.6 mm,重现期约为50 a;30~60 d时段降水量较大,重现期为100 a以上。2016年最大1 d、3 d降雨分别为92.7 mm、184.4 mm,重现期分别为4 a一遇、9 a一遇;最大15 d降雨458.7 mm,重现期超60 a一遇;对区域洪水位起控制作用的最大1~15 d各时段降水量小于1991年,总体偏大6%~30%,2016年短历时降雨更集中、降雨强度更大。2020年武澄锡虞区短时段雨量并不突出,最大1 d至最大7 d雨量重现期均在5 a以下。受长时段降雨影响,武澄锡虞区最大15 d和30 d雨量分别为346.3 mm和522.2 mm,重现期分别为12 a一遇、28 a一遇,均超越1999年同时段雨量。由于降雨持续时间长,武澄锡虞区最大30 d雨量超过20 a一遇。武澄锡虞区最大60 d降水量最大,达到56 a一遇,最大90 d雨量也超过20 a一遇。

3.1.2 降雨空间分布

武澄锡虞区单站最大1 d、最大3 d分布情况如图1所示。1991年太湖流域暴雨中心位于流域北部的湖西区 and 武澄锡虞区,降雨总体北部大于南部,

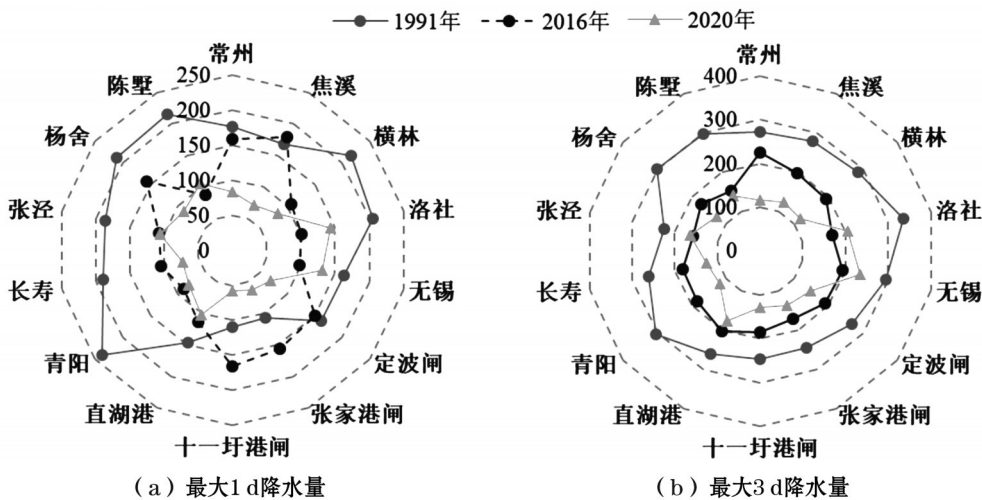


图1 武澄锡虞区单站降雨分布情况(单位:mm)

上游大于下游,武澄锡虞区内部武澄锡低片最大1~45 d降雨重现期达45~115 a一遇,澄锡虞高片为36~96 a一遇;其中单站最大1 d降雨出现在青阳站,点雨量238.5 mm;最大3 d降雨出现在洛社站,点雨量335.1 mm。2016年武澄锡低片最大7~15 d降雨重现期达33~58 a一遇,澄锡虞高片为23~38 a一遇;其中单站最大1 d降雨出现在焦溪站,点雨量179.5 mm;最大3 d降雨出现在常州站,点雨量224.5 mm。2020年武澄锡低片最大30~45 d降雨重现期达21~49 a一遇,澄锡虞高片为22~43 a一遇,其他短时段降雨重现期并不突出;其中单站最大1 d降雨出现在洛社站,点雨量143.4 mm;最大3 d降雨出现在无锡站,点雨量235.0 mm。

3.1.3 降雨时程分型特征

武澄锡虞区1991年、2016年、2020年最大15 d降雨过程如图2所示。1991年总体集中度最高,武澄锡虞区降雨峰靠前,主要集中在前4天,区域最大3 d降水量占最大7 d降水量的74%,最大7 d降水量占最大15 d降水量的65%。2016年武澄锡虞区降

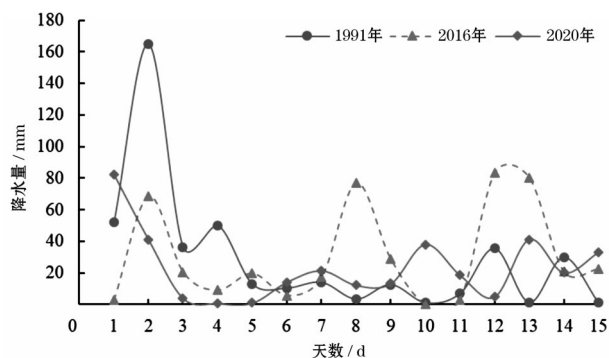


图2 武澄锡虞区1991年、2016年、2020年最大15 d降雨过程

雨雨峰靠后,主雨峰偏后将对区域防洪更为不利,最大3 d降水量占最大7 d降水量的63%,最大7 d降水量占最大15 d降水量的64%。2020年武澄锡虞区最大15 d降雨雨峰靠后,使得水位迅速抬升,最大7 d降水量占最大15 d降水量的48%。

3.2 频次及分布特征

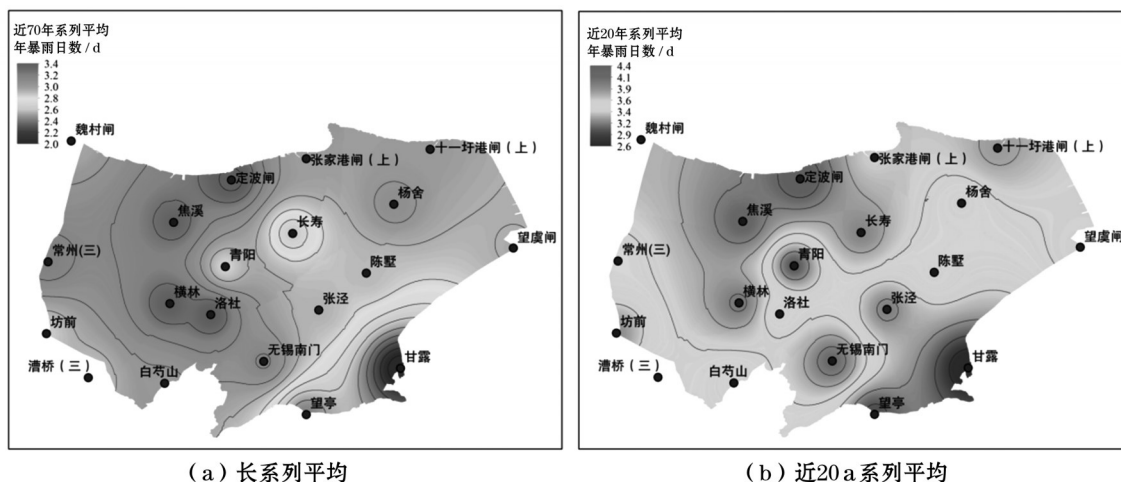
3.2.1 点暴雨发生频次及分布

按照《降水量等级》气象国家标准,分别统计了武澄锡虞区各测站1951年来发生“暴雨”“大暴雨”“特大暴雨”的年平均暴雨日数,如图3所示。位于武澄锡低片的洛社站和锡澄虞高片的张家港闸站2个站均发生过“特大暴雨”,即单日雨量达到250 mm以上,各站均发生过1次;单站历史最大1 d降水量发生在洛社站,雨量为323.3 mm。

从长系列各站点的年暴雨日数看,年暴雨日数呈现西北高、东南低的分布特征,最大值位于武澄锡低片的定波闸站,年平均暴雨日数为3.34 d。从近20 a系列各站点的年暴雨日数看,武澄锡低片的年暴雨日数仍较高,最大值位于定波闸站,为4.4 d,相较于长系列各测站年暴雨日数总体增加,表明近年来武澄锡虞区暴雨发生频次有增加趋势,且最大值主要位于武澄锡低片。同时,位于澄锡虞高片地区的十一圩港闸、张家港闸等站点暴雨发生频次也呈现增加趋势。

3.2.2 最大点雨量发生频次及分布

为进一步研究武澄锡虞区历年最大降雨点位空间分布情况,对武澄锡虞区20个雨量站近70年(1951—2020年)全周期出现最大1 d、最大3 d降水量的站点及频次进行统计分析,如图4所示。武澄锡虞区历年最大1 d点雨量发生在澄锡虞高片的张



(a) 长系列平均

(b) 近20 a系列平均

图3 系列统计暴雨日数空间分布

家港闸站和武澄锡低片的常州站、青阳站、长寿站的频次较高,次数最多的为张家港闸站,其次为常州站;最大3 d点雨量发生在武澄锡低片的青阳站、常州站、长寿站、洛社站的频次较高,次数最多的为

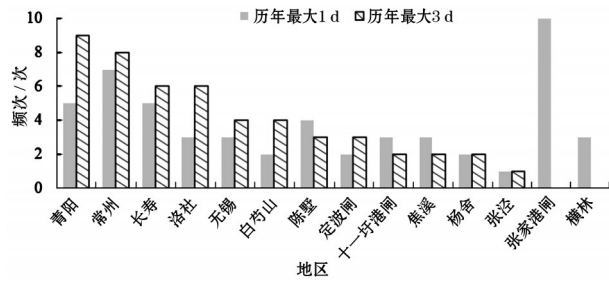


图4 武澄锡虞区历年最大1 d、3 d降雨站点及出现频次

青阳站,其次为常州站、长寿站。根据降雨出现时间统计,如图5所示,最大1 d、3 d单站点雨量主要发生在6月至7月(梅雨期间),出现次数占系列年的60%左右。

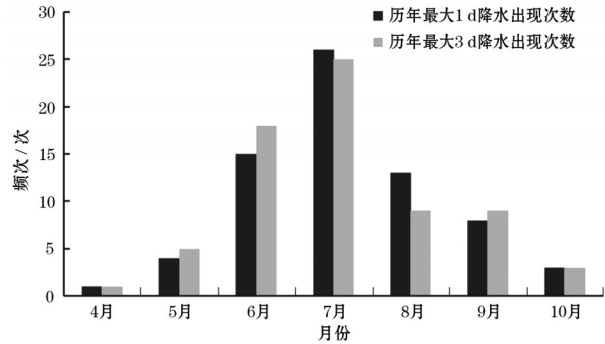


图5 武澄锡虞区历年最大1 d、3 d单站降雨出现频次

4 结 论

基于对武澄锡虞区各雨量站典型年降雨特征及近70年降雨空间特征的分析,武澄锡虞区极端降雨过程呈现“短历时强度加剧”与“长历时频率增加”并存的演变趋势,且暴雨中心在空间上存在动态迁移,武澄锡低片洪涝风险相对较高。同时,降雨过程结构发生显著变化,雨峰偏后、降雨集中度下降导致洪涝响应更为复杂,叠加近年来暴雨日数总体增加的趋势,以及受梅雨影响更大的现象,表明区域防洪压力已从传统单一型极端降水向复合型、长历时累积型风险转变。现行防洪体系须超越以静态重现期为核心的评估框架,更加重视降雨时空分布与过程结构的协同影响,推动防洪策略从固定设防向动态适应与分区精准调控转变,以进一步提升相关区域应对未来气候不确定性的整体韧性。

参考文献:

- [1] 刘敏,王雪姣,薛涛,等. 城镇化背景下太湖流域武澄锡虞区降雨-水位响应关系[J]. 水利水电技术(中英文), 2022,53(增刊2):107-114.
- [2] 王跃峰. 城市化地区圩垸防洪影响下的暴雨洪水演变与洪涝风险变化研究[D]. 南京:南京大学,2019.
- [3] 罗爽,尤迎华,何玉秀,等. 太湖平原河网地区水文要素变化特征[J]. 江苏水利,2022(12):30-33.
- [4] 蒋飞卿,朱易青,朱超,等. 基于STNSRP扰动降尺度的太湖流域未来降雨预测[J]. 水资源保护,2026,42(1):173-183.
- [5] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18.
- [6] 陆志华,蔡梅,马农乐,等. 武澄锡虞区河湖水系连通与安全保障研究的思考[J]. 人民长江,2020,51(8):118-122.