

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.017

浙江省降水特征及其参数空间变化分析

黄志珍,楼峰青,丁伯良,吕耀光,许红燕,吴珍梅

(浙江省水文管理中心,浙江 杭州 310009)

摘要:为提升浙江省水灾害防治能力,从流域区域和县级行政区域两种尺度分析不同时段和频率的面雨量及其统计参数在不同雨区、地形区分布特征和空间变化,并建立各区域面雨量时段-频率-面积-深度关系。结果表明:面雨量及其统计参数计算结果与相关规划设计值、《浙江省短历时暴雨》相关结果一致性较好,结果较合理;台风雨主控区和梅雨台风雨兼容区不同时段面雨量变差系数的平均值比梅雨主控区大;对于山区流域区域,在同一干流或支流上,相同时段和频率的面雨量及其变差系数与集水面积呈负相关关系;对于平原或县级行政区域,不同时段和频率的面雨量在台风雨主控区最高,梅雨台风雨兼容区和梅雨主控区次之。

关键词:降水特征;面雨量;统计参数;空间变化;浙江省

中图分类号:TV125

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2022)04-0117-07

Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province//HUANG Zhizhen, LOU Fengqing, DING Boliang, LYU Yaoguang, XU Hongyan, WU Zhenmei (*Hydrology Administration Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China*)

Abstract: In order to improve the capability of water disaster prevention and control in Zhejiang Province, the areal rainfall of different durations and frequencies and statistical parameters, as well as their spatial variations in different rainfall regions and terrain regions, were analyzed on watershed and county scales, and the relation of duration-frequency-area-depth was established for each region. The results show that the calculated results of areal rainfall and statistical parameters are in good agreement with relevant design values and the results in *Short Duration Storm of Zhejiang Province*, verifying the reasonability of the calculated results. The average values of the coefficient of variation C_v of areal rainfall for different durations are larger in the main control region of typhoon and Meiyu-typhoon-compatible region than in the main control region of Meiyu. For mountainous watershed areas, the areal rainfall and C_v of the same duration and frequency are negatively correlated with the catchment area in the same main stream or its branch. For plain areas or counties, the areal rainfall of different durations and frequencies is the highest in the main control region of typhoon, followed by the Meiyu-typhoon-compatible region and main control region of Meiyu.

Key words: precipitation characteristics; areal rainfall; statistical parameters; spatial variation; Zhejiang Province

降水是水灾害的重要致灾因素之一,其中面雨量是重要的区域降雨强度特征指标,是防洪形势分析和水文预报的重要因子之一。已有面雨量研究主要有3大类,第一类对不同面雨量推算方法进行结果比较及方法选优。如王增凯等^[1]采用等值线、泰森多边形、算术平均法;王汉东等^[2]采用反距离加权、普通克里金、协同克里金3种空间插值算法;陈晨等^[3]采用泰森多边形和算术平均法;段玮等^[4]采用泰森多边形法、反距离权重法、改进的谢别德法、

最小曲面法、克里金插值法5种栅格化插值算法;王皓等^[5]采用网格算术平均法和泰森多边形法分别对招远市、三峡区间、上海闵行区、澜沧江上游流域和淮河流域面雨量进行了计算结果对比分析。第二类采用多种降水时空特征表征指标和时序性趋势法对某一流域区域或行政区域面雨量进行时空分布特征和趋势分析。如姚越等^[6]利用降水发生率和贡献率分析了贵州省不同历时和等级降水条件下的时空变化规律,并用 Mann-Kendall 非参数检验法(以

基金项目:浙江省水利厅重点科技计划项目(RB1702)

作者简介:黄志珍(1979—),女,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:jennyhzz@126.com

下简称 MK 法)分析变化趋势;张洁祥等^[7]采用一元线性回归、MK 法和小波分析法分析了上海市年代际降水、年降水、汛期与非汛期降水变化以及降水周期变化和频率特征;雷婧等^[8]从时间分布、频次分布及持续时间等方面对湖北省强降水特征进行了分析,并重点分析了局地短历时强降水时空分布特征;杨春等^[9]从降水比率、强降水频次、极大强降水及极端强降水阈值等方面分析了重庆地区降水时空分布特征;张文朝等^[10-11]采用气候倾向率、小波分析、MK 法分析了山东地区降水分布时间变化特征和“一带一路”西亚主体水资源区降水时空变化及其空间均衡特征;董满宇等^[12]运用 MK 法、R/S 法分析了太湖流域不同等级降水时空变化特征及其对年降水影响;宁学鹏^[13]利用样条函数空间插值、滑动平均、距平趋势及 MK 法分析了石羊河流域雨季逐月平均降水量时空分布及趋势变化特征;徐东坡等^[14]采用 MK 法、Pettitt 突变分析和小波分析法分析了全国及分区域降水量演变特征及相应时空分布规律;邹磊等^[15]采用创新趋势分析法、MK 法和 Pettitt 突变检验法分析了海河流域不同量级降水量时空演变特征;李鸿雁等^[16]选取降水量、降水日数和降水强度等指标,采用 MK 法和线性回归法分析了嫩江流域降水时空变化特征;王珂等^[17]采用趋势性检验等方法分析了青藏高原羌塘内流区降水时空分布特征;高冰等^[18]采用线性回归法进行趋势检验,分析了鄱阳湖流域极端降水时空变化特征;荣艳淑等^[19]分析了淮河流域极端日降水量、极端最大过程降水量和最大持续降水日数 3 个极端降水指标的时空变化特征;任国玉等^[20]采用平均年降水量距平百分率分析了海河流域 1956 年、1880 年和 1736 年以来降水量变化的主要特征。与前两类分析实际面雨量不同,第三类是分析设计面雨量,主要用于工程设计领域,当缺乏实测资料时,采用短历时暴雨“时面深”(时段-面积-深度)法,由点雨量推求面雨量,进而推求设计洪水^[21]。如郭金燕等^[22-27]采用“时面深”法分别对北京、山东、浙江、山西等省(市)和宿州、淮北、黄山等市暴雨定点定面关系进行了分析,研究成果为防洪排涝、工程设计和规划提供了重要的科学依据。这些成果距今已近 20 年,部分地区由于气候变化引起的降雨特征已发生较大改变,原先构建的点面关系已发生了一定程度的变化,随着降水量站点不断加密、系列不断加长,有必要基于目前丰富的降水数据对面雨量推算提出一种新方法,作为“时面深”法的补充。

本文针对水灾害防御需求,从历史长系列降水数据概率分布及其空间变化的角度,分析流域区域

和县级行政区域(以下简称县区)两种尺度不同时段和频率的面雨量及其统计参数在不同雨区、地形区分布特征和空间变化,建立各流域区域和县区时段-频率-面积-深度(duration-frequency-area-depth, DFAD)关系。

1 研究区概况

浙江省位于长三角南翼,陆域面积 10.56 万 km²,地形为“七山一水二分田”。浙江的山脉属岭南山系,分北、中、南 3 支进入浙江,这些山脉构成浙江地貌的基本骨架,且多为省内各江河的发源地。天目山脉是长江和钱塘江水系的分水岭;仙霞岭山脉是钱塘江与甬江分水岭;向东北伸展的天台山脉是椒江、曹娥江及甬江分水岭;南雁荡山脉是甬江与飞云江分水岭;括苍山脉是甬江与椒江分水岭。

浙江省面临大海,水汽来源丰富,属于典型的亚热带季风气候,降水丰沛,产水量大,多年平均降水量为 1 603.8 mm,为全国降水量较多的地区。浙江省降水时空分布不均,降水量地区差异显著,各降水量站多年平均降水量在 1 100~2 400 mm 间,多年平均降水量最多站点是最少站点的 2.38 倍;降水量自西向东、自南向北递减,山区大于平原,沿海山地大于内陆盆地,主要暴雨区分布在浙江东部的会稽山、四明山、大盘山、天台山、括苍山、北雁荡山、南雁荡山和浙江西部的天目山等地;降水受季风进退、台风活动的影响,年内分配很不均匀,主要集中在 4—9 月的梅汛期和台汛期,降水量占全年的 65%,易发生洪涝、洪潮灾害;降水量年际变化较大,有连续丰水年、枯水年,丰、平、枯交替发生,各降水量站历年最大降水量与最小降水量的比值为 1.59~3.38,平均为 2.23。

按降水成因大致可将全省分为梅雨主控区、台风雨主控区和梅雨台风雨兼容区 3 大雨区。梅雨主控区主要包括苕溪(含长兴平原)、钱塘江中上游、甬江中上游丽水以上地区,降水年内分配呈单峰型,雨峰出现在 3—6 月或 4—7 月。台风雨主控区主要包括甬江、曹娥江下游、椒江中下游、甬江下游及飞云江、鳌江一带,降水年内分配呈双峰型,雨峰分别出现在 3—6 月和 8—9 月。梅雨台风雨兼容区主要包括钱塘江下游、椒江上游、甬江中游丽水以下地区,降水年内分配呈双峰型,雨峰分别出现在 3—6 月和 8—9 月。

浙江省独特的地形地貌形成发达的水系、众多的河湖,主要有钱塘江、甬江、椒江、苕溪、甬江、飞云江、鳌江和运河(杭嘉湖东部平原)八大水系^[28],集水面积均在 1 000 km² 以上,其中钱塘江为浙江“母

亲河”。八大水系中,除苕溪及长兴平原流入太湖,其余均流入东海。浙江山溪性河流多呈羽状分布,源短、坡陡、流急,下游感潮,遇大暴雨时,山溪性河流的洪峰流量极大,其洪峰模数在全国属高值区。平原河网主要分布于杭嘉湖、萧绍甬及温台等地。

浙江省洪涝台灾害主要呈现 4 大特点:暴雨强度大,灾害严重;旱涝急转近年多发,灾害防御难度大;局地降雨频发,小流域山洪灾害损失大;城乡一体化进程快,流域内硬化面积比例大,大中城市及中小城镇内涝损失严重。

2 研究方法

2.1 对象选取及数据来源

研究区域包含流域区域和县区,以每个区域所含降水量站作为计算依据站点集。流域区域选取山区流域、平原不同地形条件共 48 个重要区域作为研究对象,其中,山区流域区域包含干支流上中下游重要控制断面以上各区域;县区选取全省 82 个区域(部分合并)作为研究对象。流域区域面积大、站点多,以系列较长的 322 个省级报汛站作为计算依据站;县区多数面积较小,涵盖省级报汛站少,故采用资料系列较长、分布密度更高的 600 余个国家基本降水量站(含省级报汛站)作为计算依据站。资料均选自《中华人民共和国水文年鉴》,实测资料大多 60 年以上,系列长,涵盖丰、平、枯水年,具有较好的可靠性、代表性和一致性。

2.2 时段及频率选取

浙江省主要降水类型为梅雨和台风雨,台风雨时间短、强度大,梅雨强度相对较小,但持续时间长,因此降水频率分析时段须根据防汛所关注的降水对研究区影响的时间跨度进行选择,流域区域选取 1 d、3 d、5 d、7 d 和 15 d,县区选取 1 d、3 d、7 d 和 15 d;频率选取较常用的 1%、2%、5%、10%、20% 和 50%。

2.3 分析方法

因防汛时需同时关注流域区域和县区水雨情,本文从流域区域和县区两种尺度进行分析。

a. 面雨量计算。采用年最大值法取样,得出各区域历年不同时段最大面雨量,组成数据系列,即用算术平均和滑动统计法得出各区域最大 1 d、3 d、5 d、7 d 和 15 d 面雨量系列,然后采用 P-Ⅲ型频率曲线适线,得出各区域不同时段和频率的面雨量,并将结果与相关规划设计值和《浙江省短历时暴雨》(以下称暴雨图集)相关结果进行对比,验证结果的合理性。

b. 降水特征和统计参数空间变化分析。分别

从流域区域和县区两种尺度分析各区域不同时段和频率面雨量及其统计参数——变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 的空间分布特征,在此基础上,建立各流域区域和县区面雨量的 DFAD 关系。

DFAD 法运用于流域区域尺度时,将同一干流或支流从上游至下游各断面以上区域不同时段和频率的面雨量与集水面积点绘于图中,防汛应急分析时可根据 DFAD 关系由已知区域面雨量推断未知区域面雨量或重现期。若已知两控制断面间任一区间的集水面积,可推求相应区域不同时段和频率的面雨量;若已知某一断面以上区域的集水面积及某时段实时面雨量,可快速判断其相应频率或频率区间,预估可能发生的水雨情和灾情严重程度。DFAD 法运用于县区尺度时,基于 DFAD 关系和 ArcGIS 技术,构建全省县区各时段面雨量等值面分布图,直观地展现各县区不同时段和频率面雨量和参数的空间分布,可预报一定时段类似重现期暴雨的空间分布情况(高值区、低值区空间变化趋势),为分析和预报暴雨可能影响范围及致灾严重程度并采取适度防灾减灾救灾措施提供科学依据。该方法有望为防汛提供较为有效、便捷的汛情预判手段,支撑调度决策。

3 结果与分析

3.1 流域区域面雨量特征及其统计参数空间变化

3.1.1 面雨量计算

对 48 个重要流域区域不同时段面雨量作频率适线和统计参数空间协调分析,得出各流域区域不同时段和频率面雨量结果。表 1 为梅雨台风雨兼容区的运河流域区域不同频率面雨量和统计参数计算结果。

表 1 运河流域区域面雨量和统计参数计算结果
Table 1 Calculated results of areal rainfall and statistical parameters of the Grand Canal Basin

时段/d	各频率面雨量/mm						C_v	C_s/C_v
	1%	2%	5%	10%	20%	50%		
1	260.9	222.5	172.6	135.9	100.8	58.8	0.63	4.0
3	315.4	275.2	222.2	182.3	142.6	91.0	0.52	4.0
5	358.6	315.7	258.7	215.5	171.9	113.5	0.48	4.0
7	398.7	352.5	291.1	244.3	196.8	132.1	0.46	4.0
15	494.1	443.1	374.5	321.3	266.4	188.5	0.40	4.0

流域区域面雨量分析中, C_v 、 C_s 取值有以下特点:随时段从 1 d 增长至 15 d, C_v 逐渐减小或相同;为遵循浙江省地区规律和工程设计值分布规律,且适线方便,根据经验, C_s 一般取 C_v 的倍数(为 0.5 的若干倍)。基于各流域区域不同时段和频率的面雨量统计参数空间协调性分析,确定除瓯江流域上显滩以上区域 C_s 值取 3.5 C_v 外,其他流域区域的 C_s 值均

取 $4.0C_v$ 。

将流域区域面雨量分析结果与流域综合规划、防洪规划、排涝工程规划设计值以及暴雨图集相关结果进行比较,一致性较好,故流域区域不同时段和频率的面雨量计算结果总体较合理。

3.1.2 面雨量特征及其统计参数空间变化分析

表2为流域区域不同时段面雨量统计参数按不同雨区分析的结果。从表2可以看出,流域区域台风雨主控区和梅雨台风雨兼容区各时段面雨量的 C_v 平均值,即面雨量的平均相对离散程度,总体比梅雨主控区大。 C_v 主要表征降雨的年际变化,而这又与降雨笼罩面积和空间分布均匀性的年际间变化有关。相对于台风雨而言,梅雨往往空间覆盖面更广,降雨空间分布更均匀,持续时间更长,年际变化更小;而台风雨影响范围主要受台风活动路径及风圈规模、活动方式影响,一般降雨影响范围较集中,空间分布不均匀,持续时间较短,年际间变化较大,因此,梅雨主控区 C_v 相对较小,其余两个区较大。

表2 流域区域不同雨区面雨量统计参数变化范围
Table 2 Ranges of areal rainfall statistical parameters for different rainfall regions in watershed areas

雨区	时段/d	C_v		C_s/C_v
		范围	平均	
梅雨主控区	1	0.41 ~ 0.72	0.54	3.5 或 4.0
	3	0.33 ~ 0.69	0.48	
	5	0.32 ~ 0.69	0.47	
	7	0.31 ~ 0.69	0.47	
	15	0.30 ~ 0.69	0.44	
台风雨主控区	1	0.49 ~ 0.77	0.60	4.0
	3	0.45 ~ 0.77	0.55	
	5	0.44 ~ 0.73	0.53	
	7	0.43 ~ 0.71	0.53	
	15	0.39 ~ 0.62	0.48	
梅雨台风雨兼容区	1	0.58 ~ 0.71	0.63	4.0
	3	0.49 ~ 0.59	0.54	
	5	0.46 ~ 0.55	0.51	
	7	0.44 ~ 0.52	0.49	
	15	0.38 ~ 0.45	0.43	

注:仅对48个流域区域中41个属于单独雨区的区域进行统计,涵盖两个雨区的区域不计入;梅雨主控区中仅1个流域区域 C_s/C_v 为3.5,其余均为4.0。

利用 DFAD 法对不同时段和频率的面雨量及其统计参数按山区流域、平原不同地形区进行空间变化分析,其中,山区流域区域以控制断面较多的钱塘江流域为例,平原区域以典型平原为例,结果(以时段为1d不同频率的面雨量为例)如图1所示,图1(a)横轴用开化、常山、衢州、洋港、兰溪、富春江电站和闸口7个钱塘江干流断面代表相应断面以上区域;图1(b)横轴表示典型平原。由图1(a)可知,山区流域一方面受暴雨中心分布和两侧山脉等自然地

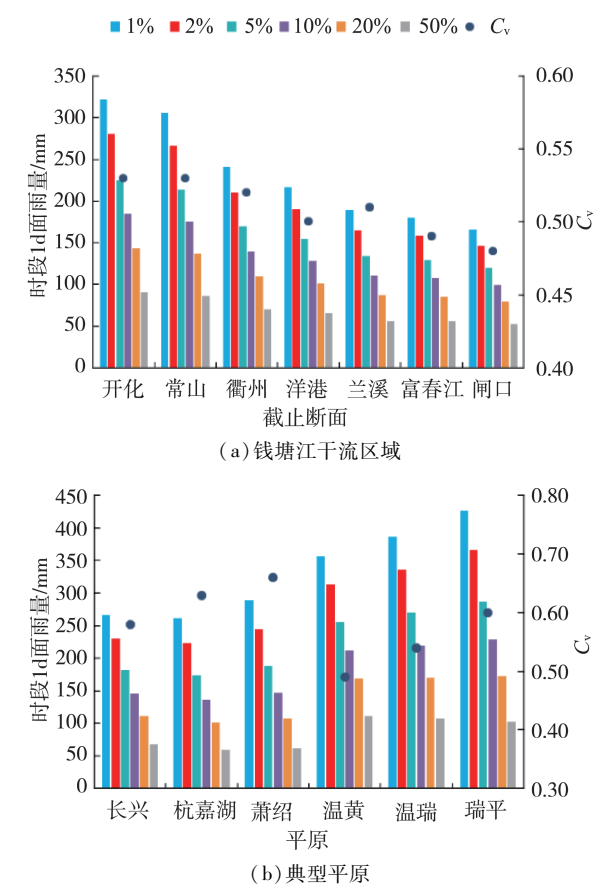


图1 钱塘江干流区域和典型平原时段为1d不同频率的面雨量及 C_v 分布

Fig.1 Distributions of areal rainfall and C_v of 1-d duration and different frequencies in areas of the Qiantang River main stream and typical plains

理条件影响,面雨量及其参数高值区分布在新安江水库和湖南镇水库大坝以上区域,低值区在金华以上区域。其中,高值区新安江水库地处浙江北支的白际山脉和千里岗山脉之间,湖南镇水库地处浙江中支的仙霞岭山脉处,因此,高值区分布与其地势有密切关系。另一方面,对同一干流或支流,从上游至下游随着集水面积空间尺度逐渐增大,地势逐渐低平,面雨量离散程度逐渐坦化,因此,同一时段各频率各区域面雨量从上游至下游逐渐减小,与集水面积呈负相关关系;相应面雨量的 C_v 值总体与集水面积呈负相关关系,仅钱塘江干流兰溪以上区域 C_v 值(0.51)稍大于洋港以上区域 C_v 值(0.50)。洋港以上区域仅涵盖衢江大部,而兰溪以上区域除包含干流衢江区域外,还涵盖另一大支流金华江区域,因此,洋港—兰溪间大面积区间入流一定程度加大了兰溪以上区域面雨量的相对离散程度。由图1(b)可知,平原区域因受山脉和暴雨中心分布影响,降水量高值区分布在雁荡山以东、台风雨主控的瑞平平原;受台风雨、南部会稽山和龙门山山脉分布及濒临杭州湾等因素的影响, C_v 高值区分布在台风雨主控

的萧绍平原;从北部梅雨主控的长兴平原到梅雨台风雨兼容的杭嘉湖东部平原,再到东部、东南部台风雨主控的萧绍、温黄、温瑞、瑞平平原,面雨量呈逐渐上升趋势。因此平原区域面雨量和 C_v 空间分布主要与主控雨型分布有关。

根据面雨量参数空间分布及影响因子,采用 DFAD 法分析各流域区域 DFAD 关系,以钱塘江干流为例,分析自上游至下游 7 个断面以上区域时段为 1 d 不同频率的面雨量与集水面积的关系,结果如图 2 所示。从图 2 可看出,时段为 1 d 的面雨量和集水面积呈负相关关系,尤其是上游河段(开化—衢州)面雨量下降趋势较为明显,下游河段(洋港—闸口)面雨量下降趋势减缓,其他时段有类似的规律。

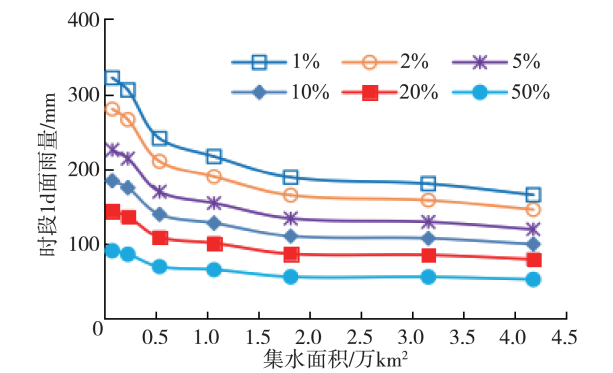


图 2 钱塘江干流不同断面以上区域时段为 1 d 不同频率的面雨量与集水面积的关系

Fig.2 Relationship between areal rainfall of 1-d duration with different frequencies and catchment area upstream of different cross-sections of the Qiantang River main stream

3.2 县区面雨量特征及其统计参数空间变化

3.2.1 面雨量计算

对 82 个县区不同时段面雨量作频率适线和统计参数空间协调分析,得出各县区不同时段和频率面雨量计算结果,见表 3(以杭州主城区为例)。

表 3 杭州主城区面雨量和统计参数计算结果
Table 3 Calculated results of areal rainfall and statistical parameters in inner city of Hangzhou

时段/d	各频率面雨量/mm						C_v	C_s/C_v
	1%	2%	5%	10%	20%	50%		
1	270.0	234.6	188.0	153.1	118.6	74.4	0.54	4.0
3	384.0	335.0	270.5	221.9	173.7	110.8	0.52	4.0
7	462.9	409.3	338.0	283.6	228.4	153.4	0.46	4.0
15	583.5	522.0	439.4	375.6	310.0	217.4	0.41	4.0

县区面雨量分析中,参数 C_v 、 C_s 取值主要遵循以下规律:随着时段从 1 d 增长至 15 d, C_v 逐渐减小或相同; C_s 一般取 C_v 的倍数,全省范围取 $3.0C_v$ 、 $3.5C_v$ 或 $4.0C_v$, 其中,取 $4.0C_v$ 的县区占县区总数的 70%。

将县区不同频率面雨量分析结果与暴雨图集中相关结果、规划中邻近流域区域和重要大中型水库面雨量设计值和前述流域区域面雨量计算值相比较可知,县区各时段和频率的面雨量空间分布与相应时段点雨量经点面关系转换后得到的面雨量空间分布趋势基本吻合,且与流域区域面雨量及其统计参数空间分布趋势相符。

3.2.2 面雨量特征及其统计参数空间变化分析

各县区不同时段面雨量统计参数按不同雨区的分析结果如表 4 所示,其变化情况与流域区域相同,梅雨台风雨兼容区和台风雨主控区各时段面雨量的 C_v 平均值比梅雨主控区大。

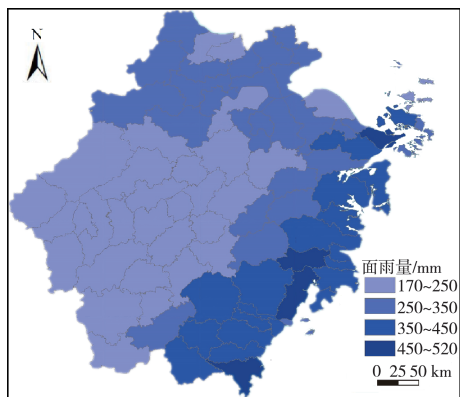
表 4 县区不同雨区面雨量统计参数变化范围
Table 4 Ranges of areal rainfall statistical parameters for different rainfall regions in different counties

雨区	时段/d	C_v		C_s/C_v
		范围	平均	
梅雨 主控区	1	0.36 ~ 0.60	0.47	3.5 或 4.0
	3	0.33 ~ 0.52	0.43	
	7	0.31 ~ 0.50	0.40	
	15	0.26 ~ 0.44	0.37	
台风雨 主控区	1	0.49 ~ 0.73	0.60	3.0、3.5 或 4.0
	3	0.42 ~ 0.61	0.51	
	7	0.39 ~ 0.57	0.48	
	15	0.35 ~ 0.51	0.44	
梅雨台风雨 兼容区	1	0.45 ~ 0.73	0.56	3.0、3.5 或 4.0
	3	0.36 ~ 0.63	0.50	
	7	0.32 ~ 0.56	0.45	
	15	0.28 ~ 0.49	0.40	

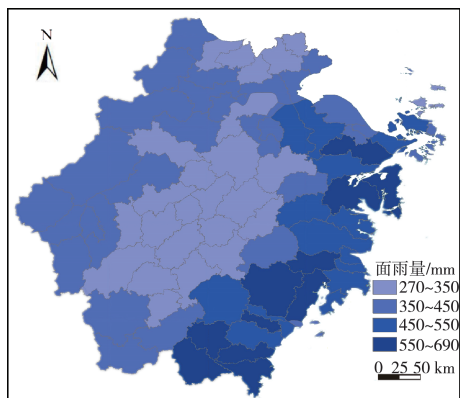
注:仅对全省 82 个县区中 71 个属于单独雨区的区域进行统计,涵盖 2 个雨区的 11 个县区不计入。

利用 DFAD 法对全省各县区面雨量特征进行分析。各县区相互独立、面积无套合关系。为更好地反映县区面雨量空间分布,采用 ArcGIS 技术制作县区不同时段和频率的面雨量等值面图,利用 DFAD 关系对面雨量空间变化进行分析,以时段分别为 1 d 和 3 d、频率为 1% 的面雨量为例,结果如图 3 所示(嵊泗及一些小海岛未显示)。

从图 3 可看出全省各县区面雨量共分 4 个等级。时段为 1 d、频率为 1% 的面雨量在 450 mm 以上(一级)和 350 ~ 450 mm(二级)的区域主要分布在台风雨主控的沿海县区,从南至北涉及温州、台州和宁波部分县区,主要位于雁荡山、括苍山、天台山、四明山附近, C_v 值分别为 0.57 ~ 0.72 和 0.49 ~ 0.73, 相对较高;面雨量为 250 ~ 350 mm(三级)的区域在 3 种雨区均有分布,主要集中在面雨量一、二级分布区域西侧和浙江北部,位于洞宫山、会稽山、龙门山、天目山附近,从南到北涉及丽水、台州、金华、绍兴、宁波、杭州、湖州、嘉兴、舟山的部分县区;面雨量为 170 ~ 250 mm(四级)的区域主要集中在浙江西部和



(a)时段 1 d



(b)时段 3 d

图 3 各县区频率为 1% 的面雨量等值面

Fig. 3 Isosurfaces of areal rainfall with rainfall frequency of 1% for different counties

中部,属梅雨主控和梅雨台风雨兼容区,涉及丽水、衢州、金华、绍兴、杭州、宁波、湖州、舟山的部分县区, C_v 值为 0.36~0.57,相对较低。因此,时段为 1 d、频率为 1% 的面雨量与 C_v 的空间分布呈现高值区集中在台风雨主控区,且从东部沿海台风雨主控区到梅雨台风雨兼容区、北部梅雨主控区再到西部内陆梅雨主控区逐渐递减的规律。时段为 3 d、频率为 1% 的面雨量与 C_v 空间分布呈现出台风雨主控区最高,北部、西部和南部梅雨主控区次之,中部梅雨台风雨兼容区最小的分布规律。因台风雨主控区最邻近东海、位于几大山脉所处的暴雨区,降水年内分配呈双峰型且降水变率大,因此,不同时段和频率的面雨量和 C_v 的空间分布均呈现台风雨主控区最高,其余降雨主控区次之的空间分布规律。由此可知,各县区不同时段和频率的面雨量及 C_v 的空间分布主要受主控雨型时空分布、下垫面山脉地形分布、距离东海远近等因素的综合影响。

4 结论

a. 面雨量及其统计参数计算结果与相关规划设计值、暴雨图集相关结果一致性较好,流域区域和

县区面雨量计算结果空间分布趋势相符,验证了结果的合理性。

b. 在流域区域中,梅雨台风雨兼容区和台风雨主控区各时段面雨量的 C_v 平均值大于梅雨主控区。对于山区流域区域,在同一干流或支流上,相同时段和频率各区域的面雨量及其 C_v 值与集水面积呈负相关关系;对于平原区域,面雨量从北部梅雨主控区、梅雨台风雨兼容区到东部、东南部台风雨主控区呈逐渐上升的趋势,而 C_v 高值区分布在台风雨主控的萧绍平原。山区流域区域面雨量及其 C_v 高值区分布与地势有密切关系,平原区域面雨量及其 C_v 空间分布主要与主控雨型分布有关。

c. 各县区各时段面雨量的 C_v 平均值随雨区的空间变化与流域区域相同,县区不同时段和频率的面雨量及其 C_v 空间分布均为台风雨主控区最高,梅雨主控区和梅雨台风雨兼容区次之,其空间分布主要受主控雨型时空分布、下垫面山脉地形分布、与东海距离远近等因素综合影响。

d. 通过建立各流域区域和县区 DFAD 关系,防汛时可由已知流域区域面雨量快速预报其他流域区域面雨量或重现期,预报一定时段类似重现期暴雨在县区尺度上的可能分布情况。

参考文献:

- [1] 王增凯,马超,王晓鹏,等. 不同量级降水推算面雨量的算法浅析[J]. 地下水,2019,41(4):166-167. (WANG Zengkai, MA Chao, WANG Xiaopeng, et al. Analysis on the algorithm of calculating area rainfall with different magnitude precipitation[J]. Ground Water, 2019, 41(4): 166-167. (in Chinese))
- [2] 王汉东,黄璆瑶,朱思蓉,等. 三峡区间面雨量空间插值方法对比分析[J]. 水利信息化,2021(1):26-29. (WANG Handong, HUANG Liyao, ZHU Sirong, et al. Intercomparison of area rainfall spatial interpolation in Sanxia Region[J]. Water Resources Informatization, 2021(1): 26-29. (in Chinese))
- [3] 陈晨,汪涛,徐贵泉. 基于泰森多边形算法的闵行区面雨量分析[J]. 上海水务,2019,35(2):21-23. (CHEN Chen, WANG Tao, XU Guiquan. Analysis of area rainfall in Minhang District based on Thiessen polygon algorithm[J]. Shanghai Water, 2019, 35(2): 21-23. (in Chinese))
- [4] 段玮,樊凤,杨家康. 流域降水的面雨量计算与评估:以澜沧江上游流域强降雨个例分析为例[J]. 环境科学前沿,2014,3(4):136-141. (DUAN Wei, FAN Feng, YANG Jiakang. Calculation and evaluation of area precipitation for river basin: a case of intense rainfall over upstream of Lancang River Basin[J]. Frontier of Environmental Science, 2014, 3(4): 136-141. (in Chinese))

- Chinese))
- [5] 王皓,罗静,叶金印,等. CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料估算淮河流域面雨量对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):189-194 (WANG Hao, LUO Jing, YE Jinyin, et al. Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-Gauge merged data and observed rain gauge data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(3):189-194. (in Chinese))
 - [6] 姚越,赵华荣,刘圣锋. 贵州省 1960—2017 年降水时空变化特征[J]. 人民长江,2020,51(4):105-111. (YAO Yue, ZHAO Huarong, LIU Shengfeng. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in Guizhou Province from 1960 to 2017[J]. Yangtze River,2020,51(4):105-111. (in Chinese))
 - [7] 张洁祥,张雨凤,李琼芳,等. 1971—2010 年上海市降水变化特征分析[J]. 水资源保护,2014,30(4):47-52. (ZHANG Jiexiang, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Analysis of precipitation variation characteristics in Shanghai City over period from 1971 to 2010[J]. Water Resources Protection,2014,30(4):47-52. (in Chinese))
 - [8] 雷婧,田刚,李超. 湖北省 2008—2017 年强降水特征分析[J]. 成都信息工程大学学报,2020,35(3):341-346. (LEI Jing, TIAN Gang, LI Chao. Analysis of severe rainfall characteristics in Hubei Province from 2008 to 2017[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,2020,35(3):341-346. (in Chinese))
 - [9] 杨春,张勇,张亚萍,等. 近 25a 重庆地区小时降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害,2020,39(1):71-80. (YANG Chun, ZHANG Yong, ZHANG Yaping, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years[J]. Torrential Rain and Disasters,2020,39(1):71-80. (in Chinese))
 - [10] 张文朝,李超朋,郑梅,等. 近 50 年山东省降水特征分析[J]. 可持续发展,2020,10(3):473-479. (ZHANG Wenzhao, LI Chaopeng, ZHENG Mei, et al. Characteristics of precipitation in Shandong Province in 50 years[J]. Sustainable Development, 2020, 10(3):473-479. (in Chinese))
 - [11] 王豪杰,左其亭,郝林钢,等. “一带一路”西亚地区降水时空特征及空间均衡分析[J]. 水资源保护,2018,34(4):35-41. (WANG Haojie, ZUO Qiting, HAO Lingang, et al. Anglysis of spatial-temporal characteristics and spatial equilibrium of precipitation in West Asia area of “Belt and Road”[J]. Water Resources Protection,2018,34(4):35-41. (in Chinese))
 - [12] 董满宇,田相佑,胡木兰,等. 1960—2017 年太湖流域不同等级降水时空特征[J]. 热带地理,2020,40(6):1063-1074. (DONG Manyu, TIAN Xiangyou, HU Mulan, et al. Spatio-temporal variation in precipitation for different grades in the Taihu Lake Basin during 1960-2017 [J]. Tropical Geography, 2020, 40(6):1063-1074. (in Chinese))
 - [13] 宁学鹏. 1968—2017 年石羊河流域降水演变特征及趋势分析[J]. 水利规划与设计,2021(1):24-26. (NING Xuepeng. Characteristics and trends of precipitation evolution in Shiyang River Basin during 1968-2017 [J]. Water Resources Planning and Design,2021(1):24-26. (in Chinese))
 - [14] 徐东坡,李金明,周祖昊,等. 1956—2018 年中国降水特征的时空分布规律研究[J]. 水利水电技术,2020,51(10):20-27. (XU Dongpo, LI Jinming, ZHOU Zuhao, et al. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(10):20-27. (in Chinese))
 - [15] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):53-60. (in Chinese))
 - [16] 李鸿雁,杨巍,李峰平. 嫩江流域降水特征时空分布分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2021,50(3):427-437. (LI Hongyan, YANG Wei, LI Fengping. The spatio-temporal distribution of precipitation characteristics in Nenjiang River Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021,50(3):427-437. (in Chinese))
 - [17] 王珂,王娜,雍斌. 青藏高原羌塘内流区降水时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(3):25-32. (WANG Ke, WANG Na, YONG Bin. Analysis of spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Water Resources Protection, 2019,35(3):25-32. (in Chinese))
 - [18] 高冰,任依清. 鄱阳湖流域 1961—2010 年极端降水变化分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):31-35. (GAO Bing, REN Yiqing. Changes of extreme precipitation events in Poyang Lake Basin from 1961 to 2010 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(1):31-35. (in Chinese))
 - [19] 荣艳淑,王文,王鹏,等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):1-8. (RONG Yanshu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(1):1-8. (in Chinese))

- Bureau,1965.
- [10] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. Nature Climate Change, 2013,3(2):52-58.
- [11] LIU Y, YANG X, REN L, et al. A new physically based self-calibrating Palmer drought severity index and its performance evaluation [J]. Water Resources Management, 2015,29(13):4833-4847.
- [12] ALLEY W M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions [J]. Journal of Applied Meteorology, 1984,23(23):1100-1109.
- [13] GUTTMAN N B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 34(1):113-121.
- [14] ZHU Y, LIU Y, MA X, et al. Drought analysis in the Yellow River Basin based on a short-scalar Palmer drought severity index[J]. Water, 2018, 10(11):1526.
- [15] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2004,17(12):2335-2351.
- [16] VAN DER SCHRIER G, JONES P D, BRIFFA K R. The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116: D03106.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements: irrigation and drainage paper 56 [R]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] LIU Y, ZHU Y, REN L, et al. A multiscalar Palmer drought severity index [J]. Geophysical Research Letters, 2017,44(13):6850-6858.
- [19] MANN H B. Nonparametric test against trend [J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [20] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [21] WANG W, ZHU Y, XU R, et al. Drought severity change in China during 1961-2012 indicated by SPI and SPEI [J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2437-2451.
- [22] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2015 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 56-78.

(收稿日期:2021-01-08 编辑:熊水斌)

(上接第 123 页)

- [20] 任国玉,王涛,郭军,等.海河流域近现代降水量变化若干特征[J].水利水电科技进展,2015,35(5):103-111. (REN Guoyu, WANG Tao, GUO Jun, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River Basin in modern times[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(5):103-111. (in Chinese))
- [21] 浙江省水文勘测局.浙江省短历时暴雨[R].杭州:浙江省水文勘测局,2003.
- [22] 郭金燕.北京市24h,3d暴雨定点定面关系分析[J].北京水利,2001(4):22-24. (GUO Jinyan. Analysis of relations between fixed point and fixed area for 24h and 3d storm in Beijing[J]. Beijing Water Resources, 2001(4):22-24. (in Chinese))
- [23] 宋承新.山东省定点定面雨量关系浅析[J].水文,1997(2):26-29. (SONG Chengxin. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Shandong Province[J]. Journal of China Hydrology, 1997(2):26-29. (in Chinese))
- [24] 金新芽,邵学强,马志鑫,等.浙江省暴雨定点定面关系分析[J].浙江水利科技,2003(2):7-8. (JIN Xinya, SHAO Xueqiang, MA Zhixin, et al. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Zhejiang Province[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2003(2):7-8. (in Chinese))
- [25] 霍勇峰,吴大光.山西省暴雨定点定面关系分析[J].东北水利水电,2011,29(12):48-49. (HUO Yongfeng, WU Daguang. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Shanxi Province[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2011, 29(12):48-49. (in Chinese))
- [26] 杜长辉.宿州、淮北两市暴雨定点定面关系分析[J].安徽农学通报,2009,15(15):159-160. (DU Changhui. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Suzhou and Huaibei [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2009,15(15):159-160. (in Chinese))
- [27] 殷伟量,彭博,万昔超,等.黄山市24h,3d暴雨点面关系分析[J].江淮水利科技,2017(1):38-40. (YIN Weiliang, PENG Bo, WAN Xichao, et al. Analysis of relations between point and surface of 24h and 3d rainstorm in Huangshan City [J]. Jianghuai Water Resources Technology, 2017(1):38-40. (in Chinese))
- [28] 王云辉,曾国熙,张正康.浙江省水文特性分析[J].水文,2009,29(4):79-82. (WANG Yunhui, ZENG Guoxi, ZHANG Zhengkang. Analysis of Zhejiang hydrological characteristics [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(4):79-82. (in Chinese))

(收稿日期:2021-03-23 编辑:施业)