

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220425006

文章编号: 1672-9331(2023)02-0070-12

引用格式: 曾杭, 杨琦, 李权, 等. 资水流域柘桃区间设计暴雨时空分布分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 70-81.

Citation: ZENG Hang, YANG Qi, LI Quan, et al. Spatial-temporal distribution analysis of design rainstorm in the Zhe-Tao region, Zishui Basin [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(2): 70-81.

资水流域柘桃区间设计暴雨时空分布分析

曾杭^{1,2}, 杨琦^{1,3}, 李权^{1,3}, 黄草^{1,2}, 曹阳^{1,3}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】通过研究资水流域暴雨中心柘桃区间设计暴雨的时空分布规律, 为柘桃区间流域梯级水库洪水预报和防洪调度优化提供科学依据。【方法】以柘桃区间 17 个雨量站近 30 a 不同历时的年最大暴雨为研究数据, 进行站点和面暴雨频率分析计算; 采用不同历时降雨强度-历时-频率曲线和设计暴雨空间分布变化特征, 分析雨量站网的设计暴雨时空分布规律。【结果】柘桃区间雨量站网设计暴雨的时空分布极不均匀, 短历时内设计暴雨强度增幅较大; 在空间分布上, 随着重现期的增长, 设计暴雨中心位置从资水流域中游扩大到下游; 随着设计暴雨历时的增长, 暴雨中心范围逐渐变小。【结论】柘桃区间雨量站点设计暴雨具有短历时内暴雨强度增速快、中游设计暴雨较大的特点, 研究结果可为资水柘溪以下流域重要城市的防洪安全提供理论依据。

关键词: 设计暴雨; 时空演变; 雨量站网; 降雨强度-历时-频率曲线; 资水流域柘桃区间

中图分类号: TV125

文献标志码: A

0 引言

在全球变暖的背景下, 随着人类活动的日益加剧, 大量水利工程的修建改变了河流原有的水文条件, 致使河流的洪水演进规律发生了变化^[1]。现有的洪水预报方法和防洪调度方案难以适应不断变化着的水文条件, 这给河段和流域防洪增加了很多的不确定性。而设计暴雨是无资料地区洪水预报过程中最重要的基础信息, 因此, 分析研究流域设计暴雨时空分布规律对防洪调度优化和提高洪水预报精度起着至关重要的作用^[2]。

目前, 对于设计暴雨的时空分布规律, 已有大量的学者进行了研究^[3]。杨平^[4]根据山西晋中东部“2016.7.19”暴雨资料, 绘制出各个站点降雨量在时间上的变化图, 以此对暴雨成因进行了分析。吴晓东等^[5]也通过暴雨过程线分析了东海县

“8.10”暴雨的特性。徐天奕^[6]采用水文水动力学模型模拟分析了现状条件下太湖流域设计暴雨的时空分布及控制时段的设计雨量对太湖洪水位的影响, 发现以 30、60、90 d 为控制时段的设计雨量与太湖最高洪水位的关系最为密切, 且设计暴雨的空间分布以及时程分配均会对太湖洪水位产生显著影响。黄津辉等^[7]基于 Huff 雨型法研究了天津市 1951—2004 年设计暴雨的雨型及其年代变化。寇利敏^[8]利用 ArcGIS 软件提取了沙河王快流域的水系, 将 18 个雨量监测站插入流域水系图, 导入暴雨量资料, 绘制了起讫时间相同、历时 32 h 的暴雨量等值线图, 对流域内暴雨的空间分布特性进行了直观的展示说明。沈红霞等^[9]基于 1982—2015 年最大 1 h 暴雨资料推算出了南京市主城区设计暴雨量及其时程分配, 研究结果表明: 皮尔逊 III 型曲线拟合最优, 由同频率法求得的暴雨时程分配更符合防洪排涝工程的要求。唐明等^[10]利用放大法对不同典型暴雨进行放大, 得到了南昌市

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-13; 接受日期: 2022-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809018); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50643); 湖南省教育厅科研项目(18C0198); 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJCX202042)

通信作者: 曾杭(1989—)(ORCID: 0009-0005-7374-2616), 女, 讲师, 主要从事水文统计和水文模型方面的研究。

E-mail: hzeng1989@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

不同设计暴雨的雨型,应用MIKE软件模拟探究了不同暴雨雨型对城市排涝过程的影响。

资水为湖南省湘、资、沅、澧四大水系之一,流域降水受亚热带季风气候影响,主要集中在4—6月,且年际差异大,时空分布不均,南少北多^[11]。柘桃区间,即柘溪水库以下至桃江(二)水文站之间的流域,位于资水流域最北端,多年平均降水量较大,是湖南省最大的暴雨中心之一。近年来,受气候变化和人类活动的影响,资水流域极端降水事件的出现频率增大^[12]。其中,柘桃区间因其独特的地理位置和复杂的气候条件,形成暴雨的概率较大,再加上有利的产汇流条件,极易形成洪涝灾害。由于柘桃区间已建成5级梯级电站,水文条件发生了变化,因此,分析现有条件下柘桃区间设计暴雨的时空分布规律,可为资水流域中下游洪水预报、水库调度优化及区域防洪提供科学依据。

本文以资水流域柘桃区间为研究区域,利用1986—2015年的实测暴雨资料,计算各雨量站点年最大1、3、6、12、24、72 h设计暴雨,分析各历时设计暴雨的时空分布特性。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域与数据

本文的研究区域——柘桃区间,位于资水流域干流的中下游,是资水流域的暴雨中心,也是资

水流域下游洪水的主要来源。柘桃区间(图1)位于 $28^{\circ}03'N\sim 28^{\circ}33'N$, $111^{\circ}11'E\sim 112^{\circ}06'E$,流域面积 $4\,760\text{ km}^2$,占资水流域总面积的16.9%,河段长度为143 km。柘桃区间位于亚热带季风湿润气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,具有季节交替明显、气候类型多变等特征。

柘桃区间是湖南省三大暴雨中心之一,区内雨水充沛,但时空分布不均匀,其原因有二:一方面受低压及锋面活动影响;另一方面该区间位于雪峰山与武陵山之间,地势起伏较大,有利于气流辐合上升,易于产生暴雨。本区间一次降雨历时一般在3 d左右,最长达6 d以上,形成大洪水的集中暴雨一般在24 h左右^[13]。柘桃区间的面积只占柘溪水库以上流域面积的20.0%左右,但区间的洪峰流量在一般情况下却占到柘溪水库坝址以上洪峰流量的50.0%~70.0%,因此研究柘桃区间暴雨时空分布对区间流域防洪有很重要的意义。

本文的研究数据为柘桃区间17个雨量站点观测的1986—2015年(共30 a)6个历时(1、3、6、12、24、72 h)的年最大降雨资料,其中洞市站的数据为1989—2015年共27 a的年最大降雨资料。由这17个雨量站点组成的雨量站网如图1所示(图中的数字高程模型数据来源于地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>)。

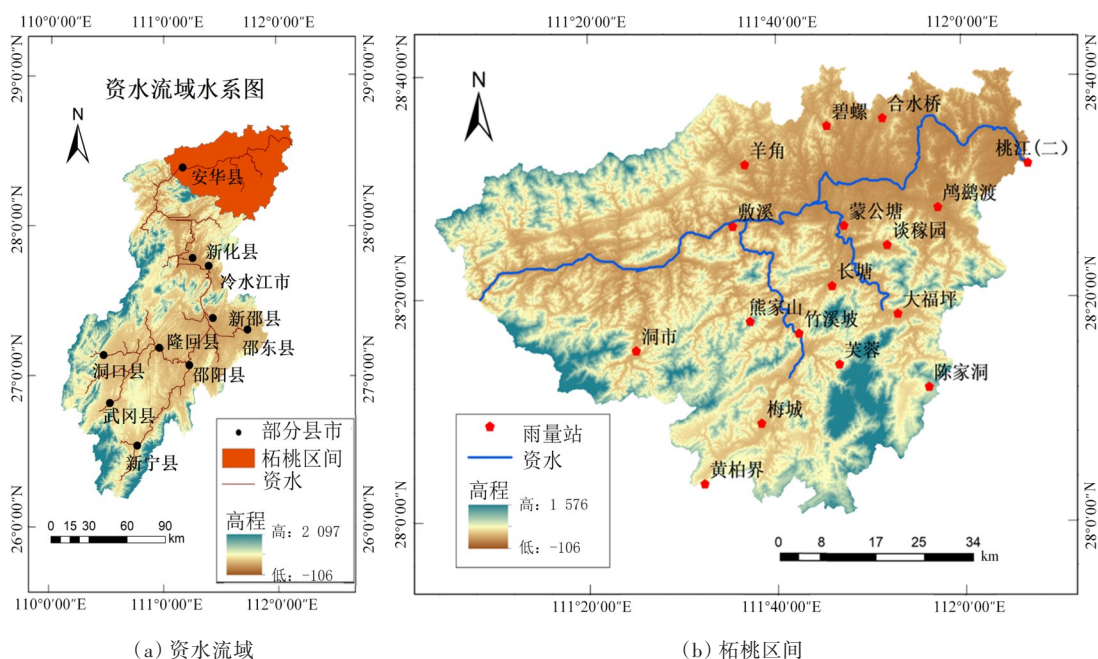


图1 资水流域柘桃区间的雨量站网

Fig. 1 The rainfall station network of Zhe-Tao region in Zishui Basin

1.2 研究方法

1.2.1 雨量站点降雨强度-历时-频率曲线的绘制

对柘桃区间 17 个雨量站点以年最大值法进行取样,得到各站点每年 6 个历时(1、3、6、12、24、72 h)的年最大降雨序列,假设年极值降雨序列服从皮尔逊Ⅲ型分布,采用线性矩法进行参数估计,得到各站点不同历时的设计暴雨值。

皮尔逊Ⅲ型分布是水文频率分析中常用的一种分布^[14]。我国《水利水电工程设计洪水计算规范》(SL 44—2006)规定:一般采用皮尔逊Ⅲ型分布进行频率计算。皮尔逊Ⅲ型分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的Gamma函数; α 、 β 、 a_0 分别为皮尔逊Ⅲ型分布的形状、尺度和位置参数, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 。

降雨强度-历时-频率(intensity-duration-frequency, IDF)曲线被广泛应用于水利工程规划设计及水资源管理中^[15]。雨量站点的IDF曲线是一种概率模型,也是降雨频率曲线的一种表示方式,表达了不同设计频率下降雨强度和历时之间的关系。使用者可根据不同历时的关系曲线判断降雨频率计算的准确性,也可在曲线上直观地摘录降雨信息,得到不同重现期下不同历时极端降雨事件发生概率的规律。

1.2.2 设计暴雨空间分布

降水量空间插值是指将离散测量点上的降水量数据,根据某个函数关系式内插或外推到整个地理区域,以预测一定区域内每个位置上的降水量。基于各雨量站点不同重现期下不同历时的设计暴雨值,本文采用反距离权重法(inverse distance weight, IDW)对柘桃区间雨量站网的设计暴雨进行空间插值,分析设计暴雨的空间分布变化规律。

IDW 是一种精确插值方法,综合了泰森多边形的邻近点方法和趋势分析的渐变方法,基于相近相似原理,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点被赋予的权重越大。

1.2.3 设计面暴雨的计算

基于 17 个雨量站点不同重现期下的设计暴雨值,采用泰森多边形法计算对应重现期下的设计面暴雨量。

采用同频率放大法放大典型暴雨过程,得到

不同重现期下柘桃区间设计面暴雨雨型。

2 结果

2.1 各雨量站点极端降雨频率计算

本文对 17 个雨量站 6 个历时(1、3、6、12、24、72 h)的年最大降雨序列进行水文频率计算,采用线性矩法进行参数估计。因站点较多,选择柘桃区间流域内设计暴雨较大的站点——羊角站,该站点基本能代表柘桃区间设计暴雨中心的特点。以年最大 3、12、72 h 为例,不同历时的降雨频率曲线如图 2 所示(图中 E_x 、 C_v 、 C_s 分别为数据序列的均值、变差系数、偏态系数)。

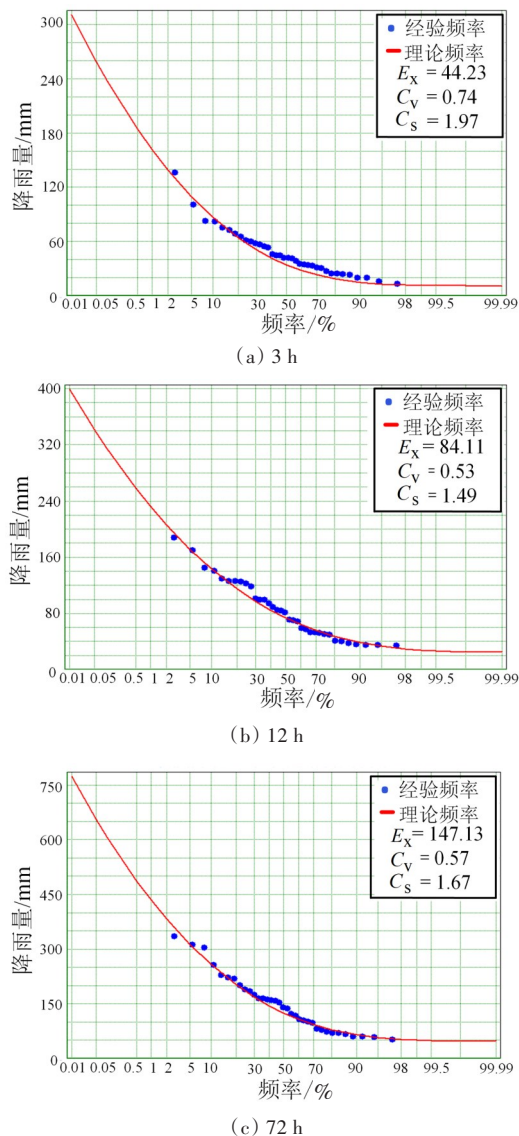


图2 羊角站不同历时降雨频率曲线

Fig. 2 Rainfall frequency curves under different durations at Yangjiao rainfall station

通过降雨频率计算,得到不同重现期下不同历时的羊角站设计暴雨值,结果见表1。分析表1可知,在相同重现期下,设计暴雨量随着历时的增长而增大;当历时相同时,设计暴雨量随着设计频率的增大而减小,满足频率计算规律,故表1所示的设计暴雨是合理的。

表1 羊角站设计暴雨值

重现期/a	不同历时的设计暴雨值/mm					
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	72 h
100	86.7	160.3	209.3	231.2	240.9	434.6
50	78.4	135.8	185.1	204.3	220.1	382.3
20	67.1	114.3	152.9	173.2	191.3	312.3
10	58.3	92.4	127.9	148.8	168.8	258.4

2.2 IDF 曲线

降雨强度-历时-频率曲线虽然是降雨频率曲线的一种表示方式,但不同历时的曲线在同一幅图上可以反映更多的降雨信息。选取年最大1、3、6、12、24 h共5个历时,重现期为10、20、50、100 a一遇,基于设计暴雨降雨强度、降雨历时、重现期的关系,绘制各雨量站点IDF曲线,如图3所示。因站点较多,选取柘桃区间上中下游代表站

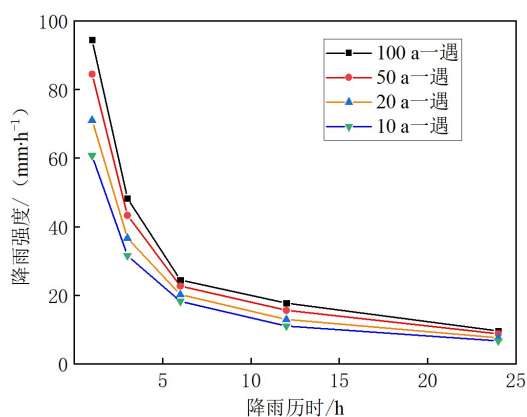
点——洞市站、敷溪站和桃江(二)站,及中游北部、中部、南部代表站点——羊角站、长塘站和陈家洞站,进行IDF曲线分析。

各站点IDF曲线没有出现交叉,表明降雨频率计算无误;上游和下游站点,即洞市站和桃江(二)站,除年最大1、3 h设计暴雨强度在不同重现期下相差较大外,对应的长历时设计暴雨强度相差不大;中游的南北站点,即羊角站和陈家洞站,年最大1、3、6 h设计暴雨强度在不同重现期下相差较大,说明柘桃区间的中游区域暴雨强度在短历时内增幅较大,该区域易在短时间内发生大暴雨,进而形成大洪水。

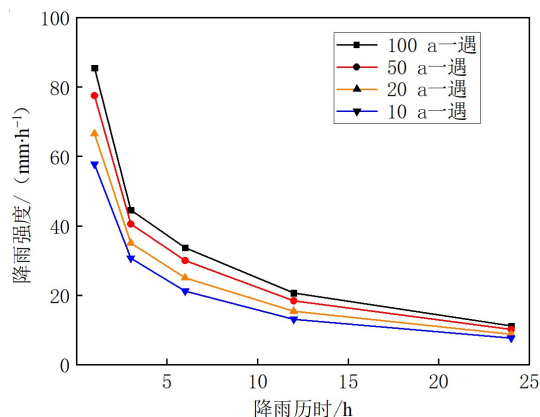
2.3 设计暴雨空间分布

通过反距离权重法对柘桃区间不同重现期下不同历时的设计暴雨进行空间插值。结果表明,在同一重现期下,柘桃区间设计暴雨的中心位置大体集中在区间流域北部;随着降雨历时的增加,设计暴雨中心范围逐渐缩小。以重现期10、50 a一遇的不同历时设计暴雨空间分布为例,分析如下:

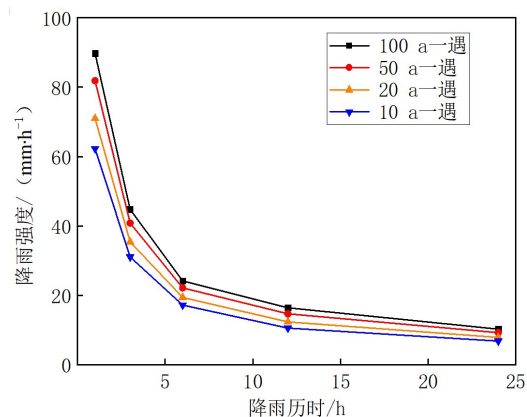
1) 当重现期为10 a一遇时,柘桃区间设计暴雨空间分布如图4所示。



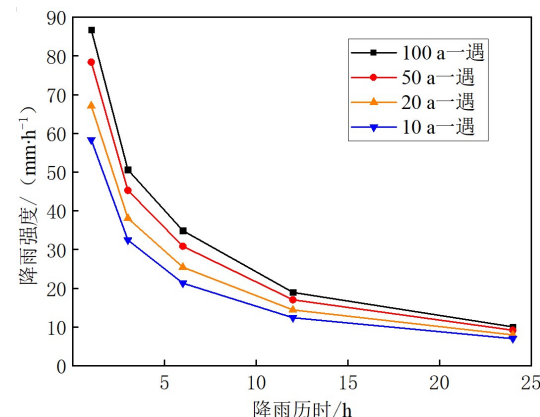
(a) 洞市站



(b) 敷溪站



(c) 桃江(二)站



(d) 羊角站

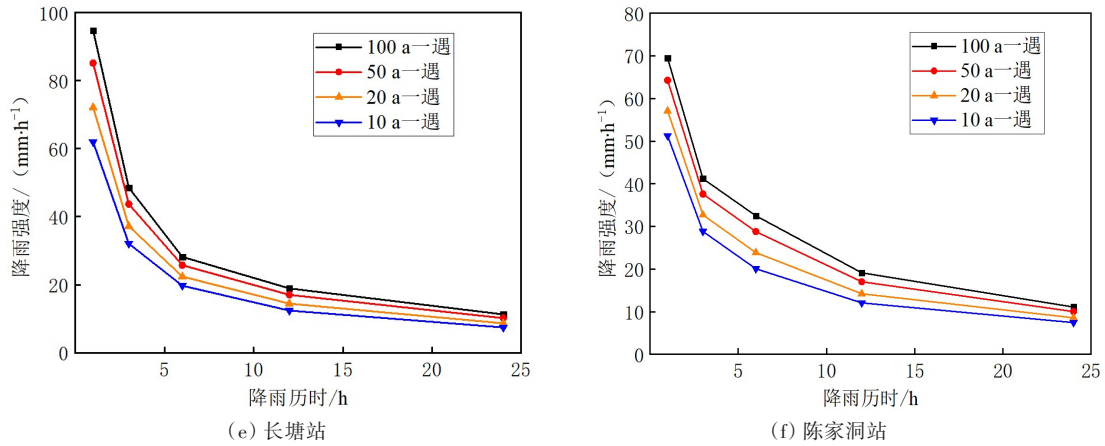
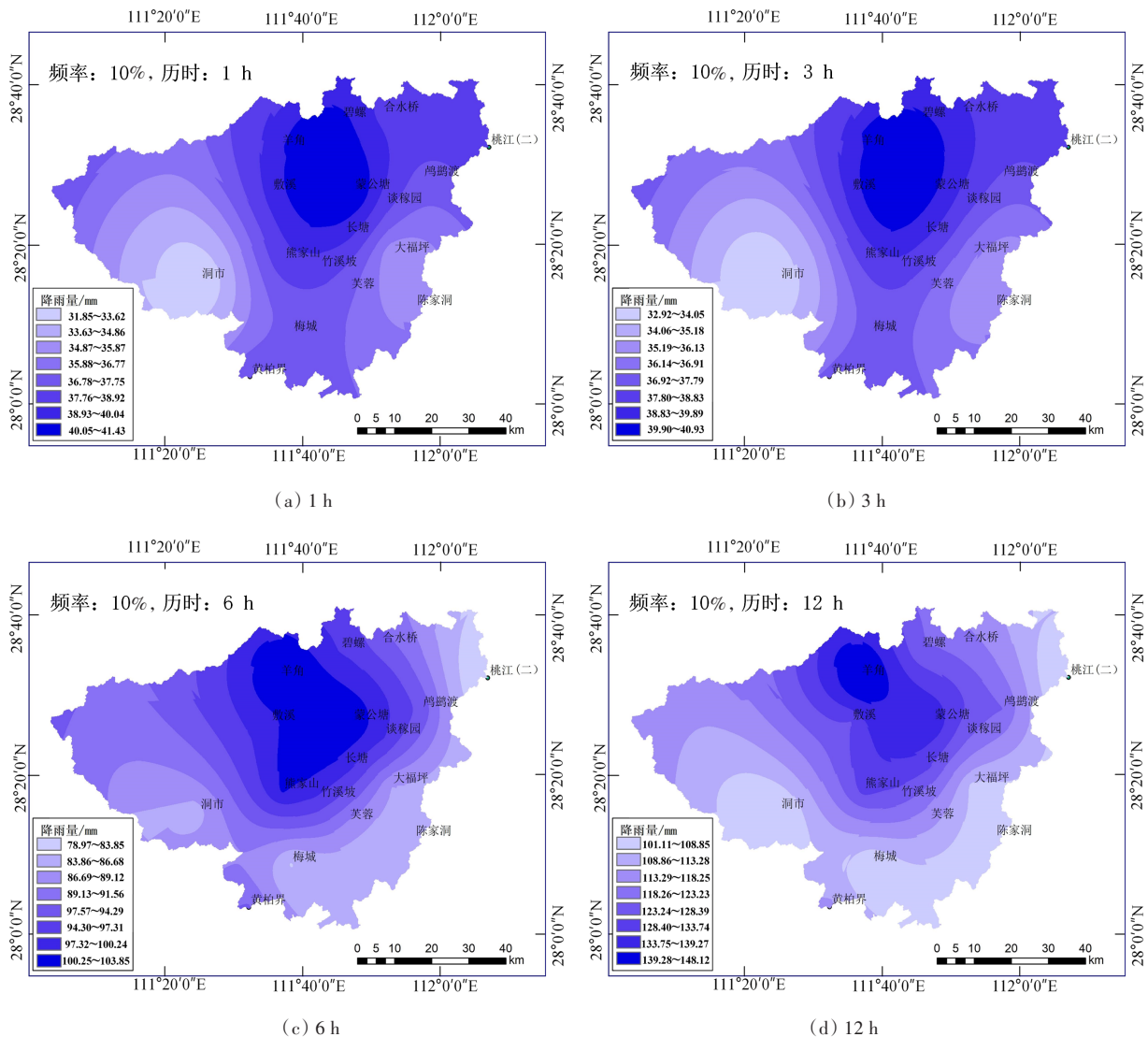


图3 各代表雨量站设计暴雨强度-历时-频率曲线

Fig.3 Intensity-duration-frequency curves of rainfall stations

分析图4可知,设计暴雨中心位置相对集中,主要位于柘桃区间中游北部,且随着降雨历时的增加,设计暴雨中心范围逐步缩小。其中,当降雨历时为6 h时,设计暴雨中心范围扩大到区间中游

中部地区,且中心位置主要在蒙公塘雨量站附近,设计暴雨值空间离散程度较小。设计暴雨相对较小的范围主要集中在柘桃区间上游和中游南部地区。



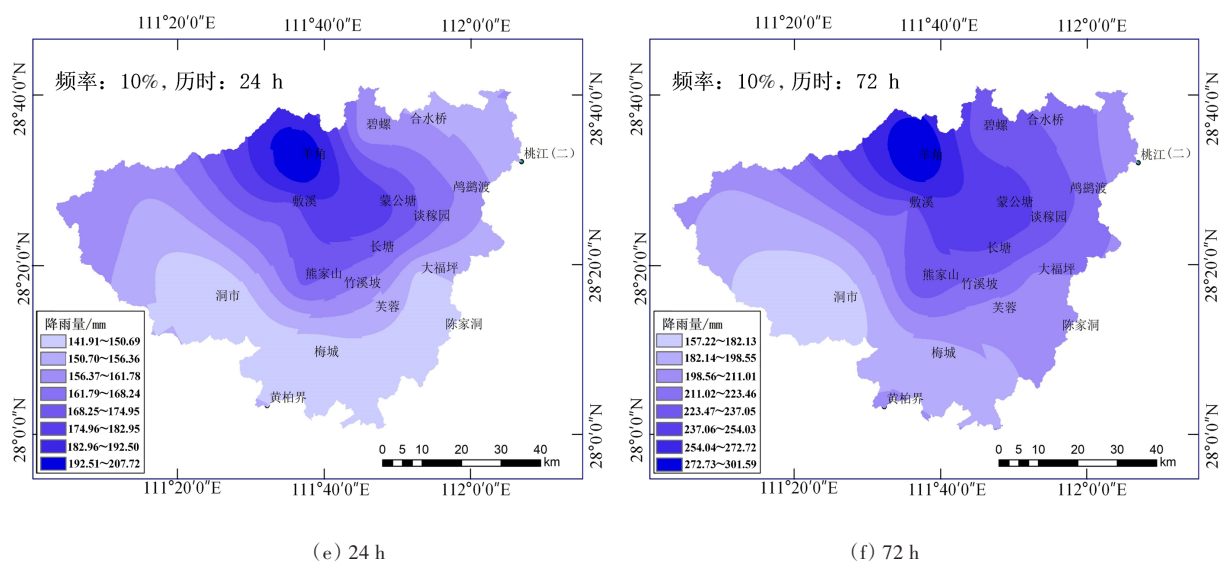


图4 10 a一遇不同历时设计暴雨空间分布图

Fig. 4 Design rainstorm spatial distribution under 10-year return period

2) 当重现期为50 a一遇时,柘桃区间设计暴雨的空间分布如图5所示。分析图5可知,设计暴雨中心位置仍集中在柘桃区间中下游。随着降雨历时的增加,设计暴雨中心范围逐步缩小。其中,当降雨历时为3 h时,设计暴雨中心位置由中下游逐渐转移并集中于下游的鸬鹚渡、蒙公塘、羊角和熊家山等4个雨量站周围。设计暴雨值相对较小的区域为柘桃区间南部地区。

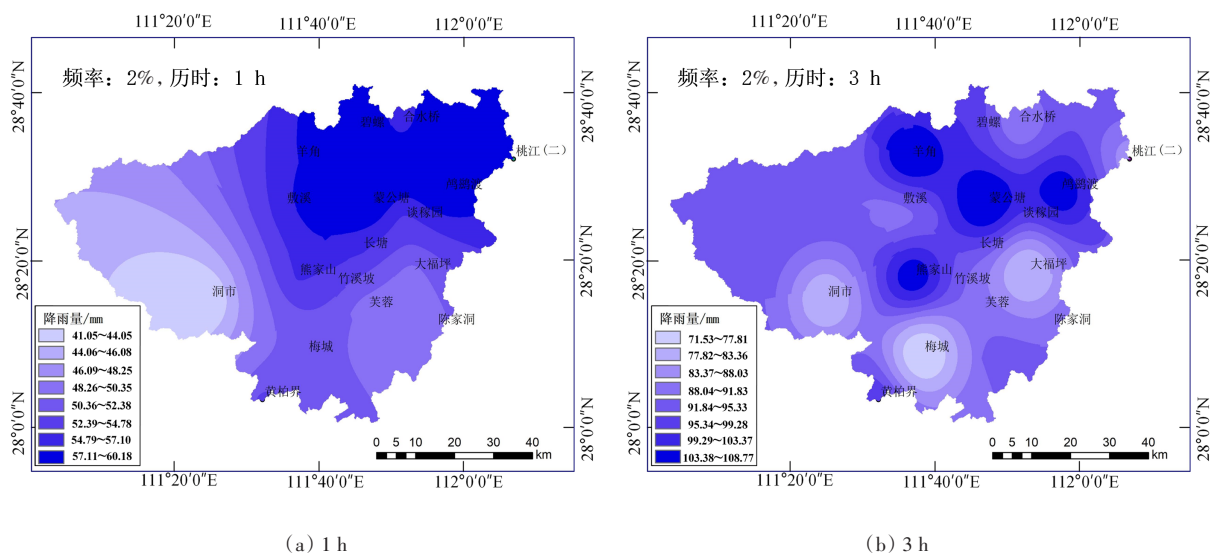
综上所述,随着重现期的增加,设计暴雨中心位置由柘桃区间中游逐渐向下游转移,说明中下游区域极易发生极端暴雨事件,这为区域中下游的防洪提供了重要依据。

2.4 设计面暴雨

2.4.1 设计面暴雨频率计算

采用泰森多边形法对柘桃区间17个雨量站(图6)不同重现期下的设计点暴雨,进行面积加权平均计算(表2),得到不同重现期下不同历时的设计面暴雨值。分析表2可知,除洞市站外,柘桃区间其余雨量站空间分布比较均匀。

基于面积权重得到的不同历时柘桃区间暴雨频率曲线和设计面暴雨值分别见图7和表3。从图7和表3可以看出,设计面暴雨值随着重现期的增长而增大,也随着暴雨历时的增长而增大。



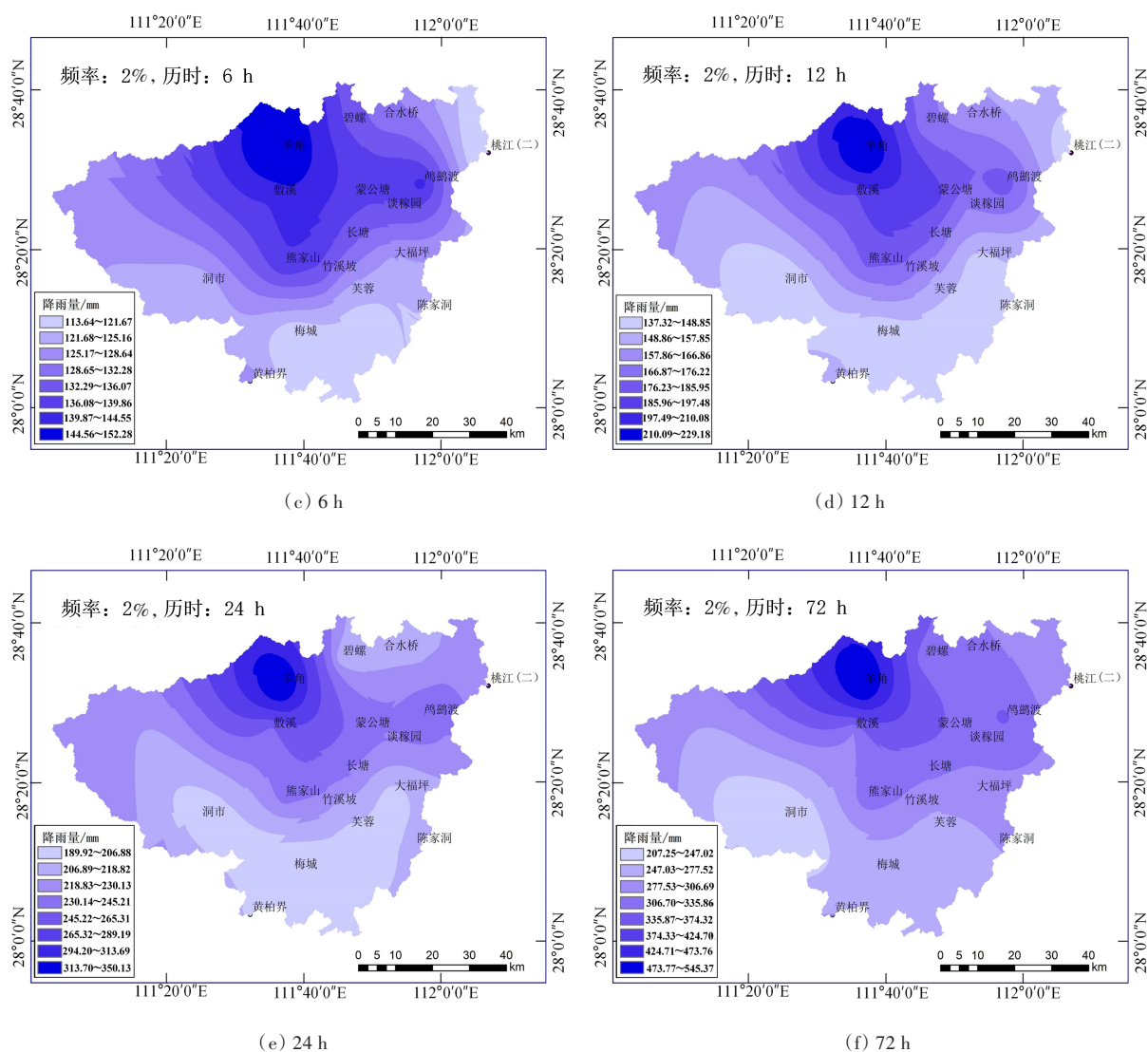


图5 50 a一遇不同历时设计暴雨空间分布图

Fig. 5 Design rainstorm spatial distribution under 50-year return period

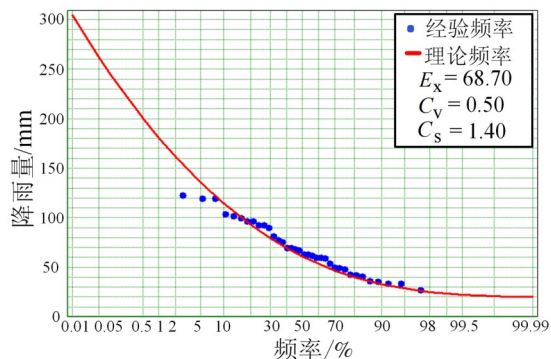


图6 柘桃区间雨量站泰森多边形示意图

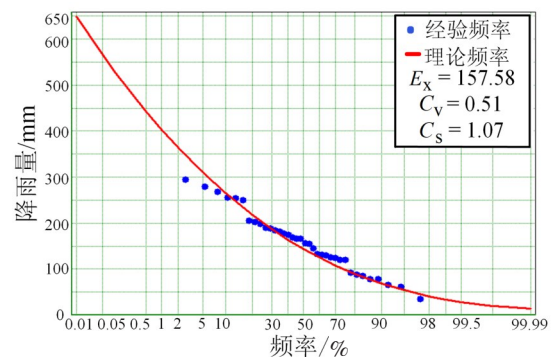
Fig. 6 Thiessen polygon map of rainfall stations in the Zhe-Tao region

表2 各雨量站面积权重

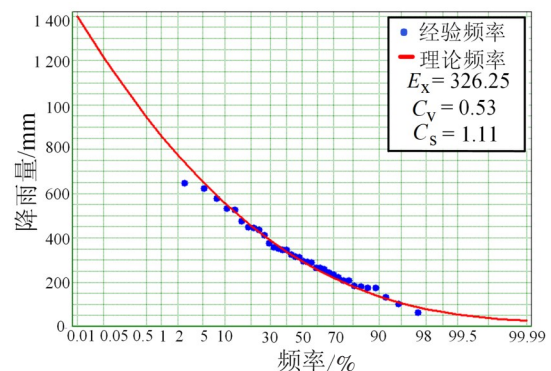
站点	面积占比	站点	面积占比
洞市	24.8	大福坪	4.1
敷溪	9.5	谈稼园	2.8
芙蓉	5.5	长塘	3.1
黄柏界	2.0	蒙公塘	3.9
梅城	7.8	碧螺	3.9
竹溪坡	2.5	合水桥	4.5
熊家山	5.4	鸬鹚渡	6.5
羊角	7.0	桃江(二)	3.4
陈家洞	3.3		



(a) 3 h



(b) 12 h



(c) 72 h

图7 不同历时设计面暴雨频率曲线

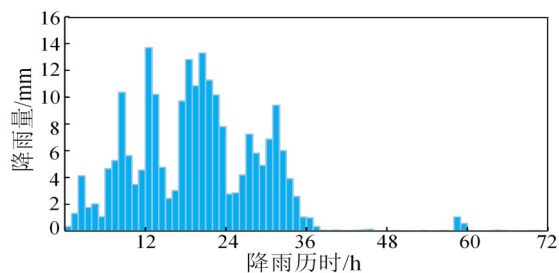
Fig. 7 Design areal rainfall frequency curves under different duration

表3 不同重现期下设计面雨量

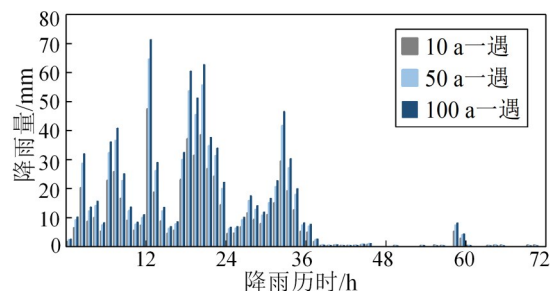
重现期/a	不同历时的设计面雨量/mm					
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	72 h
100	71	181	285	404	569	861
50	64	162	257	364	513	774
20	55	135	219	339	436	654
10	47	115	189	265	374	558

2.4.2 设计面暴雨雨型

在1986—2015年的水文资料中,选取1998年6月13日01:00—6月16日01:00的72 h暴雨为典型暴雨过程,如图8(a)所示。该场降雨接近多年平均情况,雨量大且比较集中,其降雨量达到多年来最大场次暴雨量,暴雨中心部分的强度也较大,雨峰主峰段降雨量集中且持续时间较长,这对工程安全极为不利。基于所选择的典型暴雨过程,采取同频率放大法推求设计雨量的时程分配,柘桃区间不同重现期下的设计暴雨雨型过程如图8(b)所示。该72 h设计暴雨降雨量大且非常集中,暴雨中心部分强度较大,峰高量大,主峰段暴雨较集中。



(a) 典型年暴雨



(b) 不同重现期下设计暴雨

图8 暴雨时程分布

Fig. 8 Rainstorm temporal pattern

3 讨论

3.1 设计点暴雨IDF曲线分析

雨量站点暴雨频率分析可为缺少洪水资料的流域的设计洪水计算提供理论依据。降雨强度—

历时-频率曲线作为降雨频率曲线的补充,根据它便能便捷地判断出不同历时降雨频率计算的准确性和快速摘录降雨信息,它被广泛地应用于水利工程设计尤其是城市暴雨的分析和防洪中。事实上,水文工作者已开发出多种降雨强度-历时-频率模型^[16],将IDF曲线用数学模型公式进行拟合,发现它服从不同的概率分布函数和密度函数。20世纪60年代开始,众多水文学者通过对我国暴雨洪水极值资料进行验证,一致认为皮尔逊Ⅲ型曲线能较好地拟合我国大多数河流的水文数据系列^[17];在物理成因分析合理和数理统计计算准确的基础上,也可采用其他分布线型进行暴雨频率计算。

本研究采用我国普遍适用的皮尔逊Ⅲ型分布进行各站点暴雨频率的分析计算,并绘制降雨IDF曲线来直观地表示降雨强度、历时和频率三者之间的关系。从这些曲线可以明显看出,对于柘桃区间中下游站点,如敷溪站、羊角站、陈家洞站、蒙公塘站、碧螺站和桃江(二)站,随着降雨历时的增长(从1 h增长至12 h),不同重现期下的设计暴雨强度相差较大,表明在短历时内设计暴雨强度快速增加,形成了强度大的暴雨中心,进而快速形成大洪水,威胁柘桃区间流域防洪安全;其他大部分站点从历时12 h开始,设计暴雨强度增幅相对减小,但1、3、6 h的暴雨强度增幅仍较大,说明整个柘桃区间在极短历时内暴雨强度大,随着历时的增长,大部分地区暴雨强度开始减弱。综上所述,柘桃区间设计暴雨具有显著的历时短、强度大等特点。

3.2 设计暴雨时空分布演变规律分析

强降雨是流域洪水形成的重要原因之一,极值降雨的时空分布对洪水的形成也起着至关重要的作用。张小娜等^[18]通过试验分析得出,在相同的降雨量、历时和下垫面条件下,三角形雨型比矩形雨型产生的流量大约12.5%。杨星等^[19]采用基于雨型分析的风险率模型对深圳雨量站1969—2002年逐时降雨资料进行分析研究,最后得出结论:降雨时空分布对洪水演进影响显著。杨煜等^[20]发现暴雨的类型和历时长短会对防洪建筑物边坡的稳定性产生不同影响,所以在防洪建筑物设计时需要考虑暴雨时空分布的影响。近些年来,受人类活动和气候变化的影响,中国大陆地区极端降雨事件的发生频率和强度均有所增加,并表现出明

显的区域性。如TAO等^[21]基于Mann-Kendall趋势检验、Pettitt变异点检验和相关分析法,对1961—2013年中国地面降水网格数据集进行显著性检验,发现中国西北部,尤其是新疆、西藏和青海地区的极端降水量显著增加,但在中国西南部相当大的地区和中国北方小部分地区极端降水量存在减少趋势。

本文研究了资水流域柘桃区间不同重现期下设计暴雨的时空分布规律。从空间上来看,设计暴雨在柘桃区间分布得极不均匀,在10 a一遇和20 a一遇较短重现期的情况下,暴雨中心一直处于柘桃区间中游北部区域,降雨强度较大;在50 a一遇和100 a一遇较长重现期的情况下,暴雨中心的范围由柘桃区间中游北部扩大到资水流域下游重要城市附近。从时间上来看,在同一重现期下,随着降雨历时从1 h增至72 h,暴雨强度较大的中心范围逐步缩小,大部分地区降雨增幅变得缓和。柘桃区间中游北部区域的设计暴雨强度大,持续时间长,易形成大洪水,威胁流域防洪安全。

3.3 设计面暴雨分析

降雨雨型在流域和城市防洪中对掌握降雨过程的时空变化规律至关重要,能直接影响洪水的形成过程^[22-23]。因此,总结某流域典型降雨过程的变化规律,可为该流域暴雨设计提供依据。本研究基于柘桃区间设计点暴雨时空分布的分析结果,对设计面暴雨进行频率计算和雨型分析。根据峰高量大的典型年暴雨的时程分布,可得到不同重现期下设计暴雨的时程分布,并可从中看出,在短历时雨型中雨峰时段的历时接近36 h,雨峰位置在前24 h内,典型年暴雨历时短、降雨强度大的特点与雨量站网设计点暴雨的IDF曲线所反映的特点相吻合。

从整体上来说,资水流域柘桃区间流域点、面设计暴雨在短历时内易快速形成高强度降雨,且持续时间较长,极易形成大洪水。因此,柘桃区间的暴雨分布对资水流域下游尾间地区的防洪十分重要。

4 结论

本文以资水暴雨中心柘桃区间为研究区域,根据该区间分布均匀的17个雨量站近30 a的暴雨资料,推求了柘桃区间的设计点、面暴雨,全面分

析了设计暴雨的时间和空间变化规律,为区间梯级水库洪水预报、水库防洪调度优化及流域防洪安全提供科学依据。主要研究结论如下:

1) 由柘桃区间17个雨量站的暴雨强度-历时-频率(IDF)曲线分析得出:随着降雨历时的增长,设计暴雨增幅减小;降雨历时越短,设计暴雨在不同重现期下相差越大。柘桃区间设计暴雨在短历时内增长较快,这说明该区间易发生大暴雨,并快速形成大洪水。

2) 通过分析不同重现期下各历时设计暴雨的空间分布得出:柘桃区间设计暴雨的空间分布极不均匀,中游北部区域一直处于暴雨中心地带,且随着降雨历时的增长,暴雨中心范围逐渐缩小;随着重现期的增长,暴雨中心范围扩大到区间下游重点城市区域。该结论将为该地区的城市防洪提供重要参考。

3) 由柘桃区间典型暴雨和设计暴雨时程分布可知:该地区雨量集中且暴雨中心部分强度较大,在较短时间内易形成大暴雨,且持续时间接近36 h,该雨型极易快速形成大洪水,这对流域防洪不利。

[参考文献]

- [1] 庞进,解金瑞,邱梦晨.水利工程对水文生态环境的影响分析[J].科技资讯,2018,16(16):90-91.DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.16.090.
PANG Jin, XIE Jinrui, QIU Mengchen. Analysis of the influence of water conservancy projects on hydrological and ecological environment [J]. Science & Technology Information, 2018, 16 (16) : 90-91. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2018.16.090.
- [2] MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63 (11) : 2292-2304. DOI: 10.1007/s11431-019-1523-2.
- [3] 胡国华,李滔,盛丰,等.基于降水量距平百分率的湘江流域干旱时空特征研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):74-82,91.DOI:CNKI:SUN:HNQG.0.2020-01-012.
HU Guohua, LI Tao, SHENG Feng, et al. Characteristics and adaptation of drought in Xiangjiang River based on the percentage of precipitation anomalies [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17 (1) : 74-82, 91. DOI: CNKI:SUN:HNQG.0.2020-01-012.
- [4] 杨平.山西晋中东部“2016.7.19”暴雨特性分析[J].中国防汛抗旱,2017,27(5):109-112.DOI: 10.16867/10.16867/j.cnki.cfdm.20170920.001.
YANG Ping. Analysis of rainstorm characteristics on July 19, 2016 in eastern Shanxi [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27 (5) : 109-112. DOI: 10.16867/10.16867/j.cnki.cfdm.20170920.001.
- [5] 吴晓东,任晨曦,王德维,等.东海县“8.10”暴雨特性分析[J].水利科技与经济,2021,27(2):31-34.DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2021.02.007.
WU Xiaodong, REN Chenxi, WANG Dewei, et al. Characteristic analysis of "8.10" rainstorm in Donghai County [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2021, 27 (2) : 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2021.02.007.
- [6] 徐天奕.太湖流域设计暴雨时空分布对太湖洪水位影响分析[J].湖泊科学,2022,34(4):1308-1318. DOI: 10.18307/2022.0422.
XU Tianyi. Influence of spatio-temporal distribution of design storm on Lake Taihu flood level [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (4) : 1308-1318. DOI: 10.18307/2022.0422.
- [7] 黄津辉,王超,范泽华.天津市设计暴雨雨型的演变[J].水资源保护,2020,36(1):38-43.DOI:CNKI:SUN:SZYB.0.2020-01-006.
HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1) : 38-43. DOI: CNKI: SUN: SZYB.0.2020-01-006.
- [8] 寇利敏.沙河王快流域“7·19”暴雨特性分析[J].水科学与工程,2017(1):8-10.DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2017.01.003.
KOU Limin. The characteristics analysis of the characteristics of rainstorm in Wangkuai Basin on July 19, 2016 [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2017 (1) : 8-10. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2017.01.003.
- [9] 沈红霞,杜付然,江海涛,等.南京主城区设计暴雨计算研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):74-78.DOI:CNKI:SUN:XBSZ.0.2017-06-013.
SHEN Hongxia, DU Furan, JIANG Haitao, et al. Study on design rainstorm in Nanjing main urban area [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28 (6) : 74-78. DOI: CNKI: SUN: XBSZ.0.2017-06-013.
- [10] 唐明,许文斌,尧俊辉,等.基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J].中国给水排水,2021,37(5):97-105.DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.015.
TANG Ming, XU Wenbin, YAO Junhui, et al. Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (5) : 97-105. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602.2021.05.015.

- [11] 李彤,胡国华,顾庆福,等.近55年来降水及人类活动对资水流域径流的影响[J].水文,2018,38(6):54-58,88.DOI:CNKI:SUN:SWZZ.0.2018-06-011.
LI Tong, HU Guohua, GU Qingfu, et al. Impact of precipitation and human activities on runoff in Zishui River in recent 55 years [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(6): 54-58, 88. DOI: CNKI: SUN: SWZZ.0.2018-06-011.
- [12] 李兵,章新平,杨令,等.湖南省资水流域极端降水量时空变异特征及重现期极端降水量的推算[J].灌溉排水学报,2019,38(11):117-128.DOI:CNKI:SUN:GGPS.0.2019-11-017.
LI Bing, ZHANG Xinping, YANG Ling, et al. Spatial and temporal evolutionary characteristics of extreme precipitation and its estimation for certain return period in Hunan Zishui River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 117-128. DOI: CNKI: SUN: GGPS.0.2019-11-017.
- [13] 李艳,曾爱军.浅谈资水流域洪水预报的难点与对策[J].湖南水利水电,2018(1):38-40,57.DOI:CNKI:SUN:HNSL.0.2018-01-013.
LI Yan, ZENG Aijun. Discussion on difficulties and countermeasures of flood forecasting in Zishui Basin [J]. Hunan Hydro & Power, 2018(1): 38-40, 57. DOI: CNKI: SUN: HNSL.0.2018-01-013.
- [14] 黄振平,王春霞,马军建.P-Ⅲ型分布的适应性与水文设计值的误差分析[J].水文,2002,22(5):21-24.DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2002.05.006.
HUANG Zhenping, WANG Chunxia, MA Junjian. Adaptability of Pearson type Ⅲ distribution and analysis for the error of hydrologic design value [J]. Hydrology, 2002, 22(5): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2002.05.006.
- [15] 陆宝宏,汤有光,陆晓明,等.识别合适的降雨强度-历时-频率模型的方法[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):109-115.DOI:10.3321/j.issn:1000-1980.2001.04.022.
LU Baohong, TANG Youguang, LU Xiaoming, et al. Method for identifying appropriate rainfall intensity-duration-frequency models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(4): 109-115. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2001.04.022.
- [16] AL-AREEQ A, AL-ZHRANI M, CHOWDHURY S. Rainfall intensity-duration-frequency (IDF) curves: effects of uncertainty on flood protection and runoff quantification in southwestern Saudi Arabia [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(11): 1-15. DOI: 10.1007/S13369-021-06142-0.
- [17] 李松仕.几种频率分布线型对我国洪水资料适应性的研究[J].水文,1984(1):1-7.DOI:10.19797/j.cnki.1000-0852.1984.01.001.
LI Songshi. Study on the adaptability of several frequency distribution linetypes to flood data in China [J]. Journal of China Hydrology, 1984(1): 1-7. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.1984.01.001.
- [18] 张小娜,冯杰,刘方贵.城市雨水管网暴雨洪水计算模型研制及应用[J].水电能源科学,2008,26(5):40-42,103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2008.05.014.
ZHANG Xiaona, FENG Jie, LIU Fanggui. Development and application of rainstorm flood calculation model for urban rain water pipe network [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(5): 40-42, 103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2008.05.014.
- [19] 杨星,朱大栋,李朝方,等.按风险率模型分析的设计雨型[J].水利学报,2013,44(5):542-548. DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.000840.
YANG Xing, ZHU Dadong, LI Chaofang, et al. Establishment of design hyetographs based on risk probability models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 542-548. DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.000840.
- [20] 杨煜,何忠明,卞汉兵,等.不同降雨类型对粗粒土高路堤边坡稳定性影响分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(4):36-43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.006.
YANG Yu, HE Zhongming, BIAN Hanbing, et al. Stability analysis of coarse grained soil high embankment slope under different rainfall conditions [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(4): 36-43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.006.
- [21] TAO Y Y, WANG W, SONG S, et al. Spatial and temporal variations of precipitation extremes and seasonality over China from 1961—2013 [J]. Water, 2018, 10(6): 719. DOI: 10.3390/w10060719.
- [22] 李盛,秦苗,刘萌,等.岳阳市某海绵城市道路系统降雨径流分析与评价[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):9-16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.002.
LI Sheng, QIN Miao, LIU Meng, et al. Analysis and evaluation of rainfall runoff of a sponge city road system in Yueyang City [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 9-16. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.002.
- [23] 彭世良,余德清,张永忠,等.洞庭湖区生态修复现状及应对策略[J].国土资源导刊,2022,19(2):1-6.
PENG Shiliang, YU Deqing, ZHANG Yongzhong, et al. Current situation and countermeasures of ecological restoration in Dongting Lake area [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(2): 1-6.

Spatial-temporal distribution analysis of design rainstorm in the Zhe-Tao region, Zishui Basin

ZENG Hang^{1,2}, YANG Qi^{1,3}, LI Quan^{1,3}, HUANG Cao^{1,2}, CAO Yang^{1,3}

(1.School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3.Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The spatial-temporal distribution laws of design rainstorm between Zhexi Reservoir and Taojiang Hydrological Station (the Zhe-Tao region) in Zishui Basin were investigated with an aim to provide a scientific basis for flood forecasting and flood control operation optimization of cascade reservoirs in the Zhe-Tao region. [Methods] This study used the data of annual maximum rainstorm from 17 rainfall stations with different duration in the past 30 years to analyze and calculate the frequency of station and surface rainstorm. Spatial and temporal distribution laws of design rainstorm in the rainfall station network were analyzed according to the rainfall intensity-duration-frequency curve with different duration and the spatial pattern of the design rainstorm. [Findings] The spatial and temporal distribution of the design rainstorm in the rainfall station network in the Zhe-Tao region is extremely uneven, and the intensity of the design rainstorm increases greatly within a short duration. Spatially the center of the design rainstorm expands from the middle reaches to the lower reaches of the Zishui Basin along with the increase of the design rainstorm return period, and the extent of rainstorm center gradually shrank along with the increase of the design rainstorm duration. [Conclusions] The design rainstorm in the rainfall station network of the Zhe-Tao region of Zishui Basin is characterized by a rapid increase in a short duration and high intensity in the middle reaches. Results of this study provide a theoretical basis for the flood control and safety management of important cities in the downstream basin of Zishui Basin.

Key words: design rainstorm; spatial-temporal distribution; rainfall station network; rainfall intensity-duration-frequency curve; Zhe-Tao region in Zishui Basin

Manuscript received: 2022-04-25; **revised:** 2022-05-13; **accepted:** 2022-05-14

Foundation item: Project (51809018) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2019JJ50643) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (18C0198) supported by the Scientific Research Project of Hunan Province Education Department; Project (SJCX202042) supported by the "Practical Innovation and Entrepreneurial Ability Improvement Program" project of Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: ZENG Hang (1989—) (ORCID: 0009-0005-7374-2616), female, lecturer, research interest: hydrologic statistics and hydrological model. E-mail: hzeng1989@csust.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:黄志勇)