

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 4 - 000 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000246

东南沿海西溪流域暴雨洪水的时空变化特征

林志东¹ 陈兴伟^{1 2 3} 林木生¹ 陈莹^{1 2 3}

(1. 福建师范大学地理科学学院,福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心,福州 350007;

3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007)

摘 要: 为了进一步揭示我国南方地区暴雨洪水的时空变化特征,以东南沿海晋江西溪流域为例,基于 1956 - 2011 年历年最大一次洪水及其相应暴雨实测资料,以及东南沿海台风资料,将暴雨洪水区分为台风和非台风暴雨洪水两类,分别统计分析反映暴雨时空变化特征的一系列指标;应用多元线性回归模型,建立洪水洪峰流量与暴雨特征要素的多元相关关系。结果表明,西溪流域的非台风暴雨洪水主要发生在前汛期,其中 81% 分布在 4 - 6 月;台风暴雨洪水主要发生在后汛期,70% 集中发生在 7 - 9 月份,其数量为非台风暴雨的两倍之多。暴雨类型的不同,其前期降水、次降雨量、降雨强度、暴雨中心位置、暴雨的空间分布和时程分配特点也相应变化,非台风暴雨通常降雨强度小,历时长,降雨时间上分布不均,暴雨前期流域下垫面含水量大;而台风暴雨降雨量较大,降雨强度明显较高,具有明显的降雨中心,空间分布较不均匀导致台风和非台风暴雨洪水时空变化特征差异明显。

关键词: 台风;暴雨洪水;时空变化;西溪流域

中图分类号: P333. 2

文献标志码: A

洪涝灾害是暴雨或降水而产生的大量积水和径流淹没低地造成的生命财产损失,其发生强度以及危害程度居于各种自然灾害之首^[1-2]。我国东南沿海城市地区经济发达,以山地丘陵地貌为主,多为独流入海的中小型河流,流域面积小,调蓄能力差,且山区洪水陡涨陡落,加上暴雨、台风影响显著,极易造成洪涝灾害和泥石流灾害^[3]。随着社会经济的发展 and 人口增多、财富积累,洪涝灾害造成的总损失呈上升趋势,暴雨洪水研究备受关注。

洪水受降水、流域前期土壤湿度、河网密度、下垫面植被覆盖以及土壤特性等影响。暴雨是洪水的直接水量来源,其在形成原因、季节变化、地区分布及其产生洪水的特性等方面都有所不同。沿海地区年内降水分布不均,主要集中在前汛期(4 - 6 月份)

和后汛期(7 - 9 月份),是持续性暴雨的多发期,也是洪涝灾害发生的主要时段^[4-5]。已有研究^[6-10]表明南方地区的前汛期降水受季风气候影响显著,以锋面降水为主,而后汛期主要是由热带天气系统如台风所造成,沿海地区前后汛期的降水强度及其时空分布特征存在明显差异。中国东南部沿海地区受非台风暴雨和台风暴雨的两种不同性质的降水天气影响,年内月份分布具有较大差异,且两者造成的洪涝灾害程度大小也不同^[11-12]。许多学者进行暴雨时空变化的洪水响应研究,成果表明暴雨时空变化特征对洪水的形成过程具有显著影响^[13-16]。但对包括福建在内的我国东南部沿海地区而言,台风暴雨洪水与非台风暴雨洪水的时空变化特征及其差异,尚未见深入的研究。

收稿日期(Received date): 2015 - 12 - 18; 改回日期(Accepted date): 2017 - 07 - 12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41301031); 福建省高校产学研合作科技重大项目(2015 Y4002) [National Nature Science Foundation of China (41301031); Science and Technology Plan Key Projects of Fujian Province (2015 Y4002)]

作者简介(Biography): 林志东(1990 -),男,福建漳州人,硕士研究生。研究方向:水文与水资源 [Lin Zhidong (1990 -), male, born in Zhangzhou, Fujian Province, M. Sc. Candidate, research on hydrology and water resource] E-mail: linzhidong56@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 陈兴伟(1963 -),男,博士,教授。研究方向:水文水资源与水环境 [Chen Xingwei (1963 -), male, PhD, professor, research on hydrology, water resource and water environment] E-mail: cxwchen215@163.com

西溪流域位于福建省东南部,兼受台风与非台风暴雨洪涝灾害的影响,是我国沿海地区洪涝灾害最严重的地区之一。以该流域为研究区,根据历年的暴雨洪水事件资料,统计分析台风暴雨洪水和非台风洪水的时空变化特征,对于揭示东南沿海区域暴雨洪水的变化规律具有重要的意义。

1 研究区概况

西溪位于福建省东南部,为晋江水系的正源,源于安溪县龙鼎山下的感德乡达新村,流程全长 145 km,流域面积 3101 km²,下游入海口处即为福建省三大中心城市之一的泉州市。本文选取安溪水文站(25°03'N,118°11'E)以上的流域为研究区(图 1),集水面积为 2466 km²,属亚热带海洋性季风气候,年平均气温为 19.5℃~21.0℃,降水季节变化明显,主要集中在夏半年的前、后汛期,且呈现出明显的双峰型,主峰出现在 6 月,次峰出现在 8 月^[5];地貌上以中山、低山为主,地势高峻,河流深切,自西向东构成明显的阶状下降地形,形成了许多低缓丘陵和狭小的平原,整个地势向海倾斜^[17]。西溪属于山区性河流,河水暴涨暴落,汛期常有暴雨发生,导致山洪、滑坡、泥石流等灾害问题突出。

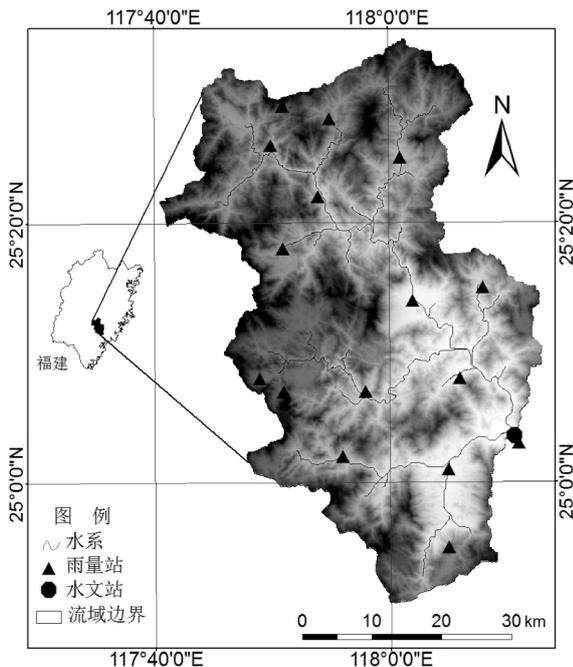


图 1 研究区位置及水文站点、雨量站点分布
Fig. 1 Location of study area and distribution of discharge and rainfall stations

2 研究方法

2.1 数据来源及暴雨类型的划分

暴雨洪水数据来源于《浙闽台河流水文资料》^[18],台风数据来自福建水利信息网资料统计。由于研究的重点是暴雨的洪水效应,以及资料所限,只选用 1956-2011 年西溪流域历年最大一次的洪水及其相应的暴雨洪水进行分析。其中,洪水流量根据安溪水文站观测的逐时径流数据,降水数据来源西溪流域内各个雨量站数据(由于建站时间不同,1956-1964 年为 6~11 个雨量站,1965-2011 年为 13~16 个雨量站)。

如前所述,福建的暴雨主要集中于春夏两季,其形成分为冷暖空气交绥的非台风暴雨和热带天气系统所致的台风暴雨^[5]。为区分两类不同的暴雨洪水,可根据西溪流域的降水日期和相应的台风资料,将降水期间有台风影响的所有暴雨划分为台风暴雨,其它的暴雨划分为非台风暴雨。

2.2 暴雨洪水要素选取

参考以往研究^[19-21],统计反映一系列暴雨特征要素的指标,包括 1 h 最大雨强 R_p 、次降雨量 P_m 、降雨历时 RL 、暴雨时间变差系数 C_t 、暴雨相对中心距离 R_d 、暴雨空间变差系数 C_{vp} 、起涨流量 Q_b 。其中,起涨流量指洪水过程性起涨时刻的流量,可以表征降水前期下垫面的含水情况,起涨流量越大,流域降水前期越湿润,土壤下渗等损失雨量越小^[22]。暴雨特征要素中, P_m 的计算采用泰森多边形法,其它指标计算公式如下:

(1) 参考魏林宏等^[19]的研究,暴雨空间变差系数(C_{vp}):

$$C_{vp} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i (P_i - P_m)^2}}{P_m} \quad (1)$$

式中 a_i 为泰森多边形面积权重因子; P_i 为第 i 个雨量站的累积降雨量; P_m 为次降雨量; n 为雨量站的个数; C_{vp} 代表降雨的空间离散程度,其值越大,离散程度越大,反之越小。

(2) 参考 McIntyre 等^[21]的研究,暴雨相对中心距离(R_d):

$$R_d = \frac{\sum_{i=1}^n a_i P_i d_i}{\sum_{i=1}^n a_i P_i} \quad (2)$$

式中 a_i 、 P_i 意义同公式(1); d_i 表示第 i 个雨量站到流域出口的直线距离; Rd 越大表示暴雨相对中心位置与流域出口的距离越远,反之越近。

(3) 暴雨时间变差系数(C_t):

$$C_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

式中: K_i 表示次暴雨过程中第 i 时刻降雨量与该次暴雨雨强的比值; C_t 接近于 0 表示暴雨在时间上均匀分布; C_t 越大,表示暴雨在时间上分布越不均匀。

2.3 多元线性回归模型

多元线性回归是指描述 1 个因变量与 2 个以上的自变量之间线性关系的一种方法,其表达式为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

式中 b_0 常数, b_1, b_2, \dots, b_k 称为偏回归系数,意义是当其他变量 $x_j (j \neq i)$ 都固定时,自变量 x_i 每变化一个单位而使因变量 y 平均改变的数值。

3 结果分析

3.1 台风与非台风暴雨洪水分布特征

根据上述暴雨洪水类型的划分方法,1956 - 2011 年的 56 场次暴雨洪水可划分为 40 场台风登陆影响期间的台风暴雨洪水和 16 场非台风暴雨洪水。台风暴雨洪水的降水日期及其相应的台风数据如表 1 所示。

由表 1 和表 2 可知,81% 的非台风暴雨洪水分布在 4 - 6 月,最迟出现在 7 月 15 日。而台风暴雨洪水早在 5 月,迟至 10 月中旬,70% 出现在 7 - 9 月。也即西溪流域暴雨洪水具有明显季节分布差异,前汛期为非台风暴雨洪水发生的高峰期,而台风暴雨洪水则受登陆或影响的台风控制,集中在后汛期的 7 - 9 月份。

表 1 台风暴雨洪水日期统计

Tab. 1 Statistics of typhoon storm-floods

场次名称	降水日期	台风编号	影响日期	场次名称	降水日期	台风编号	影响日期
19560919	9.18 - 9.20	195626	9.14 - 9.19	19840830	8.30 - 9.01	198411	8.28 - 8.31
19570930	9.29 - 10.01	195720	9.22 - 9.26	19850625	6.24 - 6.26	198504	6.21 - 6.25
19580718	7.16 - 7.18	195810	7.13 - 7.17	19860712	7.11 - 7.13	198607	7.9 - 7.11
19600610	6.07 - 6.10	196001	6.03 - 6.11	19870722	7.21 - 7.22	198705	7.19 - 7.21
19610913	9.12 - 9.14	196123	9.13 - 9.15	19880923	9.21 - 9.25	198818	9.21 - 9.24
19620529	5.29 - 5.30	196202	5.27 - 5.30	19900820	8.20 - 8.23	199012	8.16 - 8.22
19630701	7.01 - 7.03	196304	6.27 - 7.01	19940805	8.04 - 8.06	199413	8.01 - 8.05
19650620	6.19 - 6.21	196506	6.16 - 6.20	19950801	7.30 - 8.01	199504	7.27 - 7.31
19660817	8.17 - 8.19	196611	8.12 - 8.17	19960802	8.01 - 8.02	199608	7.29 - 8.01
19670712	7.11 - 7.12	196704	7.09 - 7.12	19970803	8.02 - 8.03	199710	7.28 - 8.02
19700909	9.07 - 9.10	197010	9.04 - 9.08	19981027	10.24 - 10.28	199810	10.23 - 10.27
19710618	6.17 - 6.20	197114	6.16 - 6.22	19991009	10.08 - 10.10	199914	10.05 - 10.10
19731009	10.8 - 10.12	197315	10.6 - 10.11	20020806	8.03 - 8.07	200212	8.03 - 8.06
19741017	10.17 - 10.19	197422	10.15 - 10.18	20030821	8.20 - 8.22	200310	8.19 - 8.20
19750923	9.23 - 9.25	197511	9.20 - 9.24	20040826	8.25 - 8.24	200418	8.22 - 8.26
19760825	8.23 - 8.25	197616	8.21 - 8.23	20050814	8.13 - 8.14	200510	8.12 - 8.14
19770801	8.01 - 8.02	197705	7.28 - 8.01	20060716	7.14 - 7.16	200604	7.11 - 7.15
19780616	6.16 - 6.17	197802	6.16 - 6.20	20070815	8.14 - 8.15	200709	8.13 - 8.19
19800524	5.23 - 5.25	198004	5.21 - 5.24	20081006	10.05 - 10.07	200817	10.02 - 10.04
19810923	9.21 - 9.23	198116	9.18 - 9.21	20090714	7.14 - 7.15	200906	7.16 - 7.19

表2 非台风暴雨洪水日期统计
Tab.2 Statistics of non - typhoon storm - floods

场次名称	降水日期	场次名称	降水日期	场次名称	降水日期	场次名称	降水日期
19590611	6.10 - 6.11	19720605	6.04 - 6.06	19890525	5.22 - 5.25	20000618	6.17 - 6.20
19640616	6.15 - 6.17	19790611	6.10 - 6.14	19910625	6.24 - 6.26	20010706	7.05 - 7.07
19680612	6.16 - 6.13	19820507	5.06 - 5.08	19920708	7.05 - 7.09	20100615	6.14 - 6.16
19690622	6.22 - 6.23	19830410	4.08 - 4.10	19930609	6.08 - 6.11	20110715	7.15 - 7.17

3.2 暴雨洪水时空变化特征及其差异性分析

暴雨洪水时空变化特征要素的年际变化如图2所示。由于1965年以前雨量站个数较少,其后雨量站稳定在13个及以上。因此,将暴雨洪水时空变化特征要素平均值的统计时间设为1965-2011年。

3.2.1 降雨量与降雨强度

从降雨的量上,次降雨量 P_m 与1小时降雨强度 R_p ,共同反映暴雨量的特征,其统计结果如图2(a-b)所示。可以看出,从1970-1980年,台风暴雨的 P_m 值明显低于非台风暴雨;1981-1995年,台风暴雨的 P_m 值明显高于非台风暴雨;1996-2011年,两种暴雨的 P_m 值大小相近;两种暴雨的 R_p 值处于上下波动变化,台风暴雨的 R_p 值绝大多数高于非台风暴雨;台风暴雨 P_m 、 R_p 平均值分别为143.46 mm、11.96 mm/h,而非台风暴雨的 P_m 、 R_p 平均值分别为134.37 mm、9.52 mm/h。总体上,台风暴雨的降雨量较大,降雨强度明显较高。

3.2.2 暴雨时间变化特征

从时间要素看,降雨历时 RL 表示一场暴雨所经历的时间,暴雨时间变差系数 C_t 的大小反映了暴雨的时程分配特点。由图2(c-d)可知,台风暴雨的降雨历时长短变化十分明显,短则13 h,长则101 h,平均值为50 h;非台风暴雨 RL 多数在30 h以上,平均值为57 h;两种暴雨的 RL 在整个期间呈现不同变化特点,台风暴雨 RL 值处于波动变化较为明显,相隔年份的 RL 值也存在较大差异,而非台风暴雨 RL 值波动相对较小,其平均值呈上升趋势。主要原因是台风暴雨降雨历时的长短很大程度受台风影响,台风滞留或徘徊时间越久,降雨历时越长。而非台风暴雨分布在前汛期,具有前汛期梅雨季节的降水特征,通常降雨强度小,历时长,降雨时间上分布不均。

3.2.3 暴雨空间变化特征

降水空间不均匀性对径流量影响的实质是降水空间不均匀性与下垫面空间不均匀性的空间匹配对

径流量的影响^[23]。暴雨相对中心距离 R_d 表示暴雨中心与流域出口的相对距离,也包含暴雨中心与流域产流系数较大的区域的相对位置。暴雨空间变差系数 C_{vp} 代表了暴雨在整个流域空间的分布变化和产流空间的分布对产汇流的影响。由图1(e-f)可知,台风暴雨的 C_{vp} 值在整个期间变化波动十分明显,且绝大多数值高于非台风暴雨;台风暴雨的 R_d 、 C_{vp} 的平均值分别为29.46 km、0.35,而非台风暴雨的 R_d 、 C_{vp} 的平均值分别为30.50 km、0.25,反映出两种暴雨相对中心距离相差很小,但台风暴雨的降水空间离散程度明显高于非台风暴雨。主要原因是戴云山脉横贯福建中部地区,台风环流受山脉阻挡而被抬升,从而加大雨势,此类地形机制导致戴云山东南侧的南安、安溪成为西溪流域的暴雨中心^[5],从而导致台风暴雨空间分布不均。

3.2.4 降水前期

台风与非台风暴雨洪水的起涨流量 Q_b 值对比结果如图2(g)所示。可以看出,台风暴雨的 Q_b 值多数处于低值区,总体呈现较小的变化,平均值为59.35 m³/s;非台风暴雨的 Q_b 值相对较高,平均值为78.69 m³/s。说明两种暴雨洪水发生时,流域下垫面的含水情况存在明显差异,前汛期流域下垫面的含水量总体高于后汛期。

3.2.5 台风与非台风暴雨洪水差异性

由图2(h)可以看出,多数台风暴雨洪水的 Q_p 值明显高于非台风暴雨洪水,而1970-1980年间台风暴雨洪水的 Q_p 平均值低于非台风暴雨洪水,主要由于期间非台风暴雨的降雨量平均值明显高于台风暴雨,且两种暴雨降雨强度平均值大小相近,从而导致1970-1980年的非台风暴雨洪水的 Q_p 值较高;两种暴雨洪水的洪峰流量大小有明显差别,台风暴雨洪水的 Q_p 值多数分布在2500 m³/s以上,平均值为2394 m³/s,而非台风暴雨洪水的 Q_p 平均值为2032 m³/s。这种洪水响应差异明显的原因,一方面是暴雨洪水发生季节性差异,导致流域下垫面的湿

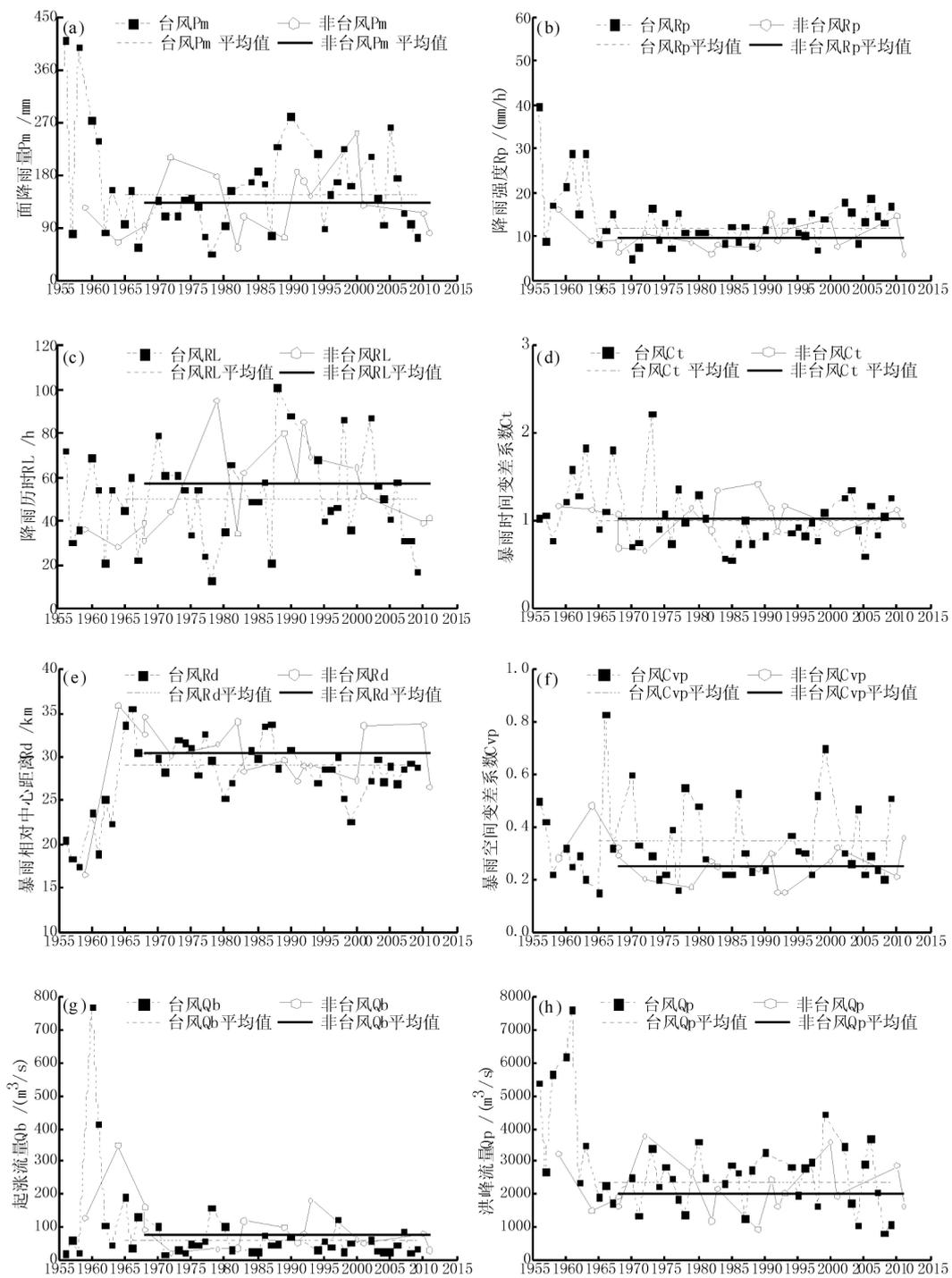


图2 暴雨洪水特征统计

Fig. 2 Characteristics of the storm-flood events

润程度不一样,从而对洪水造成不同程度的影响。西溪流域前汛期是年内中降水最为集中的梅雨季节,属冷暖空气交绥导致的非台风暴雨,流域暴雨前期的土壤通常较为湿润,含水量高,土壤下渗损失雨量小,流域前期降水情况对洪水影响较小;而后汛期

是降雨量时空分布最悬殊的台风暴雨洪水季节,起涨流量值都比较低,土壤较为干燥,造成一部分雨量的损失,流域前期降水对洪水具有重要影响。另一方面是前汛期非台风暴雨和后汛期台风暴雨的降雨强度及其时空变化特征不同,引起洪水响应特征差

异。时间上,非台风暴雨由于降雨强度较小,降雨历时的长短对洪水的形成有重要影响,而台风洪水更多是受到暴雨的时间上的集中程度的影响。空间上,台风暴雨具有明显的降雨中心,暴雨的空间变化对洪水的影响更多的体现在暴雨中心的位置变化,非台风暴雨覆盖范围大,降水相对平均。

3.3 暴雨与洪水的多元线性回归分析

上述分析表明,台风与非台风暴雨的洪水响应特征差别明显。因此,根据台风与非台风暴雨洪水不同的时空变化规律,分别建立台风与非台风洪水的洪峰流量与暴雨特征要素的多元逐步回归模型,以进一步探讨西溪流域暴雨与洪水的相互关系。逐步多元回归模型,是运用回归分析原理采用双检测原则,逐步引入和剔除自变量建立最优回归方程的优选方法,方程中包含所有对因变量影响显著的自变量而不包含对影响不显著的自变量。其结果如表 3 所示,复相关系数分别为 0.902 和 0.959,说明简单的线性回归模型在一定程度上能够反映西溪流域洪峰流量与暴雨时空特征要素的相互关系。

分析表 3 结果可以得出,从暴雨的量上,次降雨量 P_m 对两种暴雨洪水的洪峰流量都有显著影响;时间上,两类暴雨洪水的洪峰大小都与暴雨时间分布集中程度的相关,非台风洪水还受到降雨历时的影响,也说明暴雨时间要素变化对非台风洪水的具有显著影响。空间上, R_d 指标综合反映了暴雨中心相对位置及其下垫面产汇流特征在流域的空间变化对台风暴雨洪水洪峰有显著影响,而非台风暴雨空间离散程度较低, C_{vp} 综合反映了暴雨本身空间的分布变化和下垫面产流的不均性对洪水的形成过程。从前期降水上, Q_b 对台风洪水的洪峰流量有重要影响,而非台风洪水洪峰流量与 Q_b 关系不显著。两个回归方程的结果对比分析,验证了洪水对不同暴雨类型的响应特征差异。

表 3 洪峰流量与暴雨特征要素的多元线性回归方程式

Tab.3 The multiple linear regression of flood peak and storm indices

暴雨洪水	逐步回归方程式	R
台风暴雨洪水	$Q_p = 10.13P_m + 1007.25C_t - 88.09R_d + 3.67Q_b + 2285.28$	0.902
非台风暴雨洪水	$Q_p = 16.60P_m - 40.92R_d + 1527.56C_t - 3351.20C_{vp} + 1501.45$	0.959
全部暴雨洪水	$Q_p = 9.50P_m + 67.53R_p + 3.18Q_b + 45.36$	0.851

如果不予区分暴雨洪水类型,将全部暴雨洪水的多元回归,结果表明洪峰流量 Q_p 与 P_m 、 R_p 、 Q_b 有关,可在一定程度上说明洪水的物理形成机理,然而忽视了暴雨在时间和空间的分布特点对洪水产生的影响,且复相关系数低于区分暴雨洪水类型。从而也进一步说明区分前后汛期暴雨洪水类型,探讨西溪流域暴雨时空变化特征及其相关性具有合理性和必要性。

4 结论

(1) 西溪流域暴雨洪水受季风气候和台风的共同影响,年内分布极不均匀,非台风暴雨洪水年内集中在 4-6 月份,而台风暴雨洪水频繁发生在 7-9 月份,且 1956-2011 年间的 70% 以上年最大洪水是由台风暴雨引起的。

(2) 台风与非台风暴雨的时空分布特征存在明显差异,其前期降水、次降雨量、降雨强度、暴雨中心位置、暴雨的空间分布和时程分配各有特点。非台风暴雨通常降雨强度小,历时长,降雨时间上分布不均,暴雨前期流域下垫面含水量大;而台风暴雨降雨量较大,降雨强度明显较高,具有明显的降雨中心,空间分布更不均匀,从而对洪水的形成过程有不同影响,多元线性回归的结果也验证了洪水对不同暴雨类型响应特征的差异。

(3) 区分台风和非台风暴雨洪水的多元线性回归的结果,明显合理于不区分暴雨洪水的结果,进一步表明区分前后汛期不同暴雨洪水类型,对于深化东南沿海地区暴雨洪水研究具有重要意义。

参考文献 (References)

[1] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论) [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 11-21 [MA Zongjin. The momentous natural disaster and reduction action (General Remarks) [M]. Beijing: Science Press, 1994: 11-21]

[2] 赵庆良, 王军, 许世远, 等. 沿海城市社区暴雨洪水风险评价——以温州龙湾区为例 [J]. 地理研究, 2010, 29(4): 665-674 [ZHAO Qingliang, WANG Jun, XU Shiyuan, et al. Flood risk assessment of coastal community—a case study in Longwan district of Wenzhou City [J]. Geographical Research, 2010, 29(4): 665-674]

[3] 许有鹏, 葛小平, 张立峰, 等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟 [J]. 地理研究, 2005, 23(1): 38-45 [XU YOUpeng, GE Xiaoping, ZHANG Lifeng, et al. Research of flood-inundated simulation on floodplain in coastal medium and small basins of Southeast China [J]. Geographical Research, 2005, 23(1): 38-

- 45]
- [4] 伍红雨, 杜尧东, 秦鹏. 华南暴雨的气候特征及变化[J]. 气象, 2011, **37**(10): 1262 - 1269 [WU Hongyu, DU Yaodong, QIN Peng. Climate Characteristics and Variation of Rainstorm in South China [J], Meteorological Monthly, 2011, **37**(10): 1262 - 1269]
- [5] 鹿世瑾, 王岩. 福建气候[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 138 - 141 [LU Shijin, WANG Yan. The Climate of Fujian [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012. 138 - 141]
- [6] 邹燕. 福建省前汛期降水时空分布特征及其与东亚冬季风的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005: 32 - 33 [ZOU Yan. The Space-time distribution of rain during former former flood season and its relationship with the East Asian monsoon [D]. NanJing: NanJing University of Information Science & Technology, 2005: 32 - 33]
- [7] 孙燕, 朱伟军. 江苏省梅汛期暴雨特征及其对长江下游水位的影响[J]. 地理科学, 2013, **33**(2): 238 - 243 [SUN Yan, ZHU Weijun. Rainstorm characteristics during Meiyu period in Jiangsu and its effect on water levels of lower reaches of the Changjiang river [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(2): 238 - 243]
- [8] 任广成, 范飞龙, 沈爱华. 东南沿海前汛期与后汛期降水的比较分析[J]. 海洋预报, 2007, **24**(1): 16 - 24 [REN Guangcheng, Fan Feilong, Sen Aihua. Comparison researches on the rainfall of the former and latter flood season in the southeast coastal area of China [J]. Marine Forecasts, 2007, **24**(1): 16 - 24]
- [9] 江秀芳. 福建省前后汛期极端降水时空特征对比[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 17 - 23 [JIANG Xiufang. Characteristics of spatial and temporal variations of extreme precipitation during the pre-flood and post-flood seasons in Fujian [D]. NanJing: NanJing University of Information Science & Technology, 2013: 17 - 23]
- [10] 李江, 王安宇, 蒙伟光, 等. 广东省前汛期和后汛期降水的气候特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2002, **41**(3): 91 - 94 [LI Jiangnan, WANG Anyu, MENG Weiguang, et al. The climatological characteristics of precipitation of the presummer rainy reason and second rainy season in Guangdong province [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2002, **41**(3): 91 - 94]
- [11] 冯强, 王昂生, 李吉顺. 我国降水的时空变化与暴雨洪涝灾害[J]. 自然灾害学报, 1998, **7**(1): 89 - 95 [FENG Qiang, WANG Angsheng, LI Jishun. The variation of precipitation in time and space and heavy-rain flood disaster in China [J]. Journal of Natural Disasters, 1998, **7**(1): 89 - 95]
- [12] 陈香, 王静爱, 陈静. 福建暴雨洪灾时空变化与区域划分的初步研究[J]. 自然灾害学报, 2007, **16**(6): 1 - 7 [CHEN Xiang, Wang Jingai, Chen Jing. Primary study on spatial temporal change and regionalism of storm-flood in Fujian province [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, **16**(6): 1 - 7]
- [13] KAMRAN H S, DAVID C G, DONALD E M, et al. Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff [J]. Journal of Hydrology, 2003, **271**(4): 1 - 21
- [14] PECHLIVANIDIS I G, MCINTYRE N R, WHRATER H S, et al. Relation of spatial rainfall characteristics to runoff: Analysis of observed data [J]. Pro BHS National Hydrology Conference, University of Exeter, 2008, **9**: 86 - 94
- [15] 胡彩虹, 王纪军, 詹发竹, 等. 中小流域汛期降水时空分布集中程度与洪水关系研究[J]. 水文, 2009, **29**(4): 14 - 21 [HU Caihong, WANG Jijun, ZHAN Fazhu, et al. Study on relationship between flood and precipitation concentration degree in time and space in medium and small sized river basins [J]. Journal of China Hydrology. 2009, **29**(4): 14 - 21]
- [16] 刘洁, 陈晓宏, 许振成, 等. 降雨变化对东江流域径流的影响模拟分析[J]. 地理科学, 2015, **35**(4): 483 - 490 [LIU Jie, CHEN Xiaohong, XU Zhencheng, et al. The impact of variation in rainfall on runoff in the Dongjiang river basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, **35**(4): 483 - 490]
- [17] 赵昭炳, 陈佳源. 福建省地理[M]. 福州: 福建人民出版社, 1993: 72 - 77 [ZHAO Zhaobing, CHEN Jiayuan. Geography of Fujian Province [M]. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 1993: 72 - 77]
- [18] 中华人民共和国水文年鉴——浙闽台河流水文资料[Z]. 福建省水文总站刊印, 1980 - 2011 [P. R. China Hydrological Yearbook—Rive Hydrological Resource of ZheMinTai [Z]. Fuzhou, Fujian Province of Hydrological Station Press, 1980 - 2011]
- [19] 林木生, 陈兴伟, 陈莹. 晋江西溪流域洪水与暴雨时空分布特征的相关分析[J]. 资源科学, 2011, **33**(12): 2226 - 2231 [LIN Musheng, CHEN Xingwei, CHEN Ying. Regression analysis of flood response to the spatial and temporal variability of storm in the Jinjiangxixi watershed [J]. Resources Science, 2011, **33**(12): 2226 - 2231]
- [20] 魏林宏, 郝振纯, 李丽. 降雨空间尺度对径流模拟的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2006, **17**(6): 19 - 23 [WEI Linhong, HAO Zhenchun, LI Li. Study on effects of spatial scale of rainfall to runoff simulation [J]. Journal of Water Resource & Water Engineering, 2006, **17**(6): 19 - 23]
- [21] NEIL McIntyre, AISHA Al-Qurashi, HOWARD Wherter. Regression analysis of rainfall-runoff data from an arid catchment in Oman [J]. Hydrological Sciences Journal, 2007, **52**(6): 1103 - 1118
- [22] LIN M, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al. Improving calibration of two key parameters in hydrologic engineering center hydrologic modeling system, and analyzing the influence of initial loss on flood peak flows [J]. Water Science & Technology. 2013, **68**(12): 2718 - 2724
- [23] 张士锋, 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响[J]. 地理科学进展, 2001, **20**(4): 355 - 363 [ZHANG Shifeng, JIA Shaofeng. A research of the impacts of uneven precipitation on the natural runoff in the Yellow River [J]. Progress in Geography, 2001, **20**(4): 355 - 363]

Spatial and temporal Variations of Storm-floods in Xixi Watershed of Southeast Coastal Region

LIN Zhidong¹, CHEN Xingwei^{1 2 3*}, LIN Musheng¹, CHEN Ying^{1 2 3}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China;

3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to further reveal the characteristics of the storm-floods in the area, we took the observed data of the annual maximum flood and its corresponding storm, as well as typhoon information, during 1956–2011 in Xixi watershed of Fujian Province and divided storm-floods into two types, those that occurred during typhoon and non-typhoon seasons. Then, the characteristics of spatial and temporal variations of storm-flood were analyzed respectively with indices describing the spatial and temporal heterogeneity in the southeast coastal areas. A multiple linear regression analysis was used to estimate the relationship between these storm indices and flood peak discharges. The results indicated that 81% of non-typhoon storm-floods occurred between April and June, and 70% of typhoon storm-floods occurred between July and September. The number of typhoon storm-floods was twice more than that of non-typhoon storm-floods. Different types of rainstorm occurred in different seasons, leading to varied responses of flood. There were obvious differences in the characteristics of spatial and temporal variations of typhoon and non-typhoon storm-floods. It also indicated the great significance of distinguishing typhoon and non-typhoon storm-floods in order to further reveal the spatial and temporal variations of storm-floods in the southeast coastal areas.

Key words: Typhoon; storm-flood; spatial and temporal variation; Xixi watershed