

清流河流域场次暴雨洪水特征及其 对降水的响应关系

王国庆¹, 翟然^{2,3}, 万思成^{1,4}, 刘艳丽¹, 许意军⁵

- (1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;
2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 河海大学, 南京 210098; 5. 郑州市环境保护局 环境监察支队, 郑州 450007)

摘要: 暴雨洪水是主要的自然灾害, 分析暴雨洪水特性及其与气候要素的响应关系对流域防洪减灾和水资源可持续利用等方面具有重要意义。根据清流河流域 102 场暴雨洪水资料, 系统分析了场次暴雨洪水过程特征、径流组成以及洪水特征要素与降水指标之间的响应关系。结果表明: 场次降雨特征在一定程度上决定了洪水过程变化, 水利工程修建和下垫面变化等人类活动对暴雨洪水过程特征有一定影响; 场次暴雨洪水的产流系数总体具有递减趋势, 但地表径流占径流总量的比率有增大趋势; 场次径流量及洪峰流量与场次降水量之间具有较好的相关性, 雨强对清流河流域暴雨洪水特征影响相对较小, 蓄满产流是清流河流域主要的产流机制。

关键词: 场次暴雨洪水; 产流系数; 径流组成; 水文响应; 清流河流域

中图分类号: TV21; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0007-05

Characteristics of storm floods and its responses to precipitation indices for the Qingliu River catchment

WANG Guoqing¹, ZHAI Ran^{2,3}, WAN Sicheng^{1,4}, LIU Yanli¹, XU Yijun⁵

- (1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Zhengzhou Environmental Monitoring and Supervision Branch, Zhengzhou Environmental Protection Bureau, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Storm flood is one of the natural disasters occurred frequently. It is of great significance to flood mitigation and sustainable utilization of water resources to investigate characteristics of storm flood at catchment scale and its responses to change in climatic factors. According to recorded data of 102 storm floods in Qingliu River catchment, it analyzed the characteristics of storm floods, runoff components, and the response relation between the precipitation feature and index. Results show that flood process are dominated by rainfall pattern. The human activities such as construction of engineering and land use change, etc have certain influence on process characteristics of storm floods. Runoff coefficients of storm flood tend to decrease in general, while the proportion of surface runoff to total storm runoff presents an increasing trend. Total runoff and peak discharges of storm floods highly correlated to storm rainfall, while the rainfall intensity has less impact on the characteristics of storm flood. The saturation runoff is the dominant mechanism of Qingliu River catchment.

Key words: storm flood; runoff coefficient; runoff component; hydrological response; Qingliu River catchment

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330854, 41371063); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC19B03)

作者简介: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源和气候变化影响评价等方面的研究。

通讯作者: 翟然(1992-), 女, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水文遥感及地理信息系统研究。

1 研究背景

暴雨洪水是中国江河的主要自然灾害,直接威胁着区域社会经济的发展和人民生命财产安全^[1-2]。对流域产汇流特征的正确认识是开展流域水文模拟和洪水预警预报的重要基础工作^[3-4],而以基础的实测水文资料入手分析暴雨洪水特征对降水的响应关系则是认识变化环境下流域产汇流特性的有效手段^[5]。已有研究认为高强度暴雨和长历时持续性降水是特大洪水的主要动因^[6-8],而变化环境则复杂了流域产汇流机制,对流域水文带来严重影响^[9-11],如,穆兴民等^[12]、荆新爱等^[13]研究发现,黄土高原水土保持对流域暴雨洪水过程及径流量具有明显影响,水土保持使得流域产洪次数减少,径流模数和径流系数减小,洪峰流量降低。目前已有研究多集中在暴雨洪水过程本身及场次径流总量的变化,根据径流形成机理,洪水过程通常由地表径流和地下径流组成^[14],对场次洪水的径流组成及变化特征亟待加强。

长江中下游社会经济高速发展,在全球气候变暖背景下,洪水灾害威胁日趋严重,分析暴雨洪水特性及其与气候要素的响应关系,对流域防洪减灾和水资源可持续利用等方面具有重要意义。本文以长江下游的典型支流清流河流域为研究对象,重点分析了场次暴雨洪水特征,结合暴雨洪水的退水模拟结果^[14],进行了径流组成分割,研究了洪水特征与降水要素之间的响应关系。

2 资料与方法

2.1 流域及资料概况

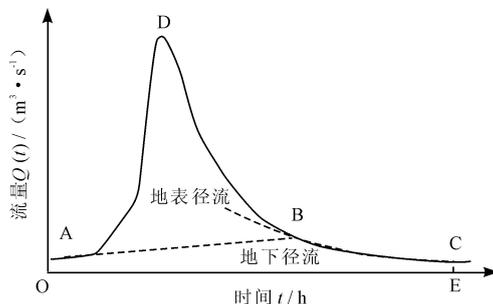
清流河发源于滁州市市区与定远县界的磨盘山东麓仙店子北仙居涧,是长江下游滁河左岸一级支流。流域地跨滁州市市区、明光市和来安县,地势北高南低,流域面积 1 318 km²。清流河流域地处亚热带湿润季风气候区,气候温暖湿润,多年平均气温为 15.2℃,多年平均年降水量 1 100 mm,多年平均年径流量 4.29 亿 m³。清流河水系呈树枝状,左岸有盈福河、百道河和二道河纳入,右岸有大沙河、小沙河汇进。清流河流域内建有沙河集、城西、燕子湾、练子山、独山等 5 座大中型水库,水库以防洪、灌溉、供水为主,兼顾发电和旅游等功能。

滁州站是清流河流域干流重要水文站,建于 1957 年,控制流域面积 1 060 km²。基于出版的水文年鉴,收集整理了滁州站 1960 年以来的 102 个场

次暴雨洪水过程资料及流域内 6 个雨量站相应的历次暴雨摘录资料。

2.2 径流组成分割方法

根据流速大小及汇流历时长短,场次暴雨洪水过程可以概括为地表径流和地下径流两种水源组成,其中,地表径流在降水发生后可以很快汇集到流域出口断面,而地下径流则由于土壤层的调蓄而缓慢流出,并延续至降水结束后较长的一段时间,进而形成暴雨洪水的一个具有指数型的退水过程。图 1 给出了在水文学中常用的斜线径流分割方法示意图^[15]。



(虚线为地下径流过程,实线为实测河川流量)

图 1 暴雨洪水过程水源分割示意图

图 1 中所示的场次径流量为曲线 OADBCEO 所包围的面积,地表径流量为曲线 ADBA 所包围的面积。在实际分割时,起涨点 A 可以根据实测流量过程确定,起退的时间点 B 及对应起退流量的确定则成为径流分割的关键,对退水过程的模拟是确定上述两个关键的重要途径,一般可以采用 Harris 模型或指数型模型对退水过程进行模拟^[14,16]。

3 结果与分析

3.1 场次暴雨洪水过程

降雨是清流河流域产流最直接的因素,图 2 给出了 4 个典型场次的降暴雨洪水过程,其中,两个场次的暴雨洪水过程摘自 20 世纪 60 和 70 年代,该时期人类活动较弱且稳定,基本代表了天然流域的产汇流情势;另外两个场次暴雨洪水过程摘自 21 世纪以来的年份,流域下垫面有所改变,流域内修建了一批大中型水利工程并投入了正常运用,代表了一种较强人类活动影响下的产汇流状态。由图 2 可以看出:

(1)降雨特征在一定程度上决定了洪水过程变化。如 19600621 号暴雨洪水的降水集中在连续的时段,场次降水量为 67 mm,其中,雨峰降水强度为 45 mm/6 h,场次降水的最大洪峰流量为 306 m³/s,

洪水峰现时间约滞后雨峰 10 h 左右。对 19750817 号暴雨洪水过程来水, 场次降水量为 253 mm, 但降水集中在两个不连续的阶段, 第一个阶段持续降水历时为 30 h, 降水量 165 mm, 其中最大时段降雨强度 99 mm/6 h, 第二阶段降水历时为 12 h, 其中最大时段降雨强度为 70 mm/6 h, 受降雨时程变化的影响, 滁州站洪水过程为双峰型过程, 第一个洪峰出现在降水之后的第 30 h, 峰值流量为 2 050 m³/s, 峰现时间滞后雨峰时间 8 h; 第二洪峰流量为 1 700 m³/s, 滞后第二雨峰约 6 h。

(2) 水利工程修建和下垫面变化等人类活动对暴雨洪水过程特征有一定影响, 主要表现为洪峰流量减小, 多峰过程不明显, 洪水过程总体变缓。如 20090723 号暴雨洪水过程, 场次降水量为 150 mm,

降水主要集中在 3 个时段, 其中, 最大时段降雨强度约 69 mm/6 h; 就场次降水量和最大时段降水强度而言, 均大于洪号为 19600621 的降水特征值, 但 20090723 洪水的洪峰流量只有 202 m³/s, 洪水峰现时间滞后最大雨峰时间约 10 h, 尽管降水过程呈现为多阶段性, 但洪水过程只有一个洪峰, 洪水过程在峰值之后有近 40 h 维持在 100 m³/s。对于洪号为 20100524 暴雨洪水来说, 场次降水量为 59 mm, 其中, 最大时段降水强度为 44 mm/6 h, 对应的洪峰流量为 96 m³/s, 但洪水峰现时间滞后最大时段雨峰约 58 h, 远远大于正常的流域汇流时间且洪水过程表现为缓增速降的特点。上述两个典型暴雨洪水过程充分体现了流域水库对洪水过程的调蓄作用。

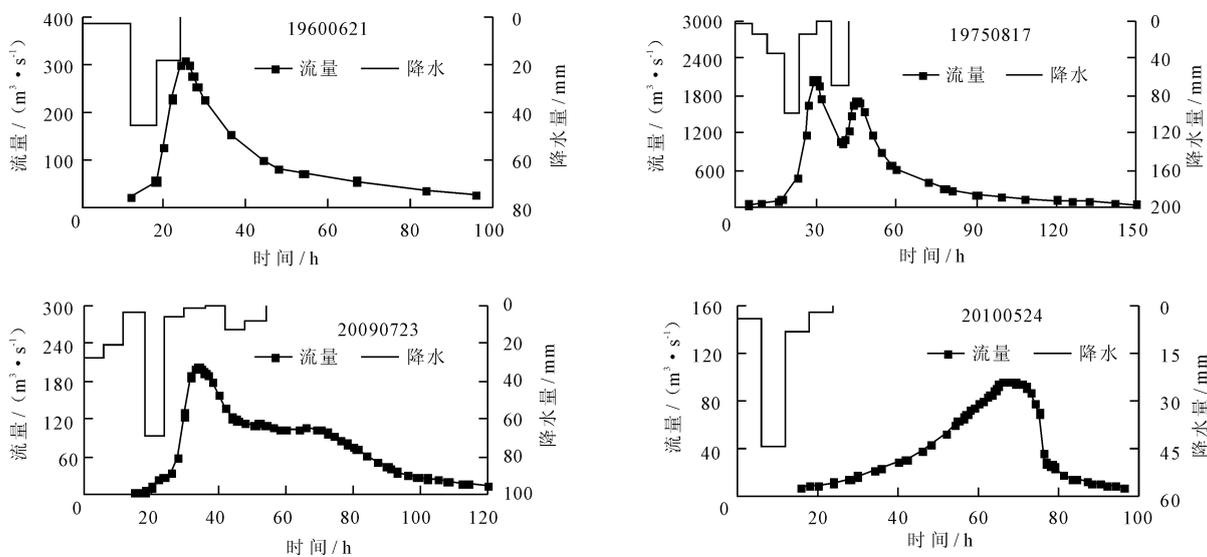
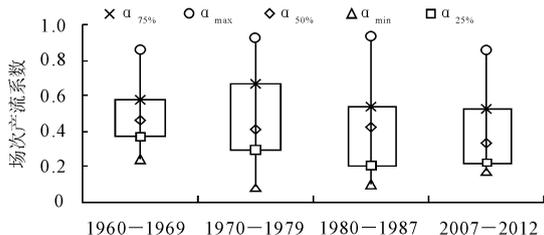


图 2 清流河滁州站典型暴雨洪水过程对比

3.2 场次暴雨洪水产流系数及径流组成的变化

场次暴雨的产流系数大小反映了区域产流能力的强弱, 一般情况下与暴雨强度、场次降水量以及前期降水量有密切关系。图 3 给出了不同年代产流系数的四分位特征, 由图 3 可以看出:



注: $\alpha_{75\%}$ 、 $\alpha_{50\%}$ 和 $\alpha_{25\%}$ 分别表示频率为 75%、50% 和 25% 的产流系数, α_{max} 和 α_{min} 分别表示最大和最小场次产流系数)

图 3 清流河流域各年代暴雨洪水产流系数的变化

(1) 每一个年代的场次暴雨的产流系数变化幅度均较大, 如 20 世纪 70 年代, 共收集了 28 个场次的暴雨洪水资料, 场次暴雨的产流系数介于 0.08 ~ 0.93 之间, 其中, 产流系数低于 0.30 和高于 0.66 的暴雨洪水场次数占 25%, 该年代场次暴雨洪水产流系数平均值为 0.48, 略高于该年代产流系数的中位数 0.41 (对应频率为 50%)。

(2) 从年代际变化趋势来看, 场次暴雨洪水的产流系数总体具有递减趋势, 20 世纪各年代的平均场次暴雨洪水产流系数超过 0.40, 其中 60 年代的最高, 为 0.49 (0.24 ~ 0.87); 21 世纪以来的平均场次暴雨洪水产流系数为 0.34, 尽管场次产流系数变异性很大, 但大多数产流系数普遍偏小, 超过 50% 的产流系数低于 0.26。产流系数的变小与水库对径流拦蓄调节和流域下垫面变化有密切的关系。

翟然等^[14]对清流河流域 102 个场次的暴雨洪水的退水过程进行了模拟,确定了每个场次洪水的起退流量及起退时间,基于场次洪水退水过程模拟,将场次洪水过程分割为地表径流和地下径流,表 1 统计了不同年代场次暴雨洪水的径流组成特征。

表 1 清流河流域不同年代场次洪水径流分割统计

年代	暴雨洪水 场次数目	地表径流占径流总量的比率/%		
		平均	最大	最小
1960-1969	23	53.6	70.6	40.4
1970-1979	28	58.3	74.0	41.1
1980-1987	32	69.1	88.2	42.6
2007-2012	19	65.4	91.8	45.4

由表 1 可以看出:

(1) 地表径流是洪水径流的主要成分,不同年代地表径流均占径流总量的 50% 以上,对于个别暴雨洪水场次,地表径流与径流总量之比可超过 70%,甚至达到 90% 以上。

(2) 就年代际变化而言,地表径流占径流总量的比率有增大趋势,如 20 世纪 60、70 年代,平均地表径流占径流总量的比率在 60% 以下,而在 80 年代以来,平均地表径流与径流总量的比率在 65% 以上。

地表径流成分增加与流域内大中型水利工程修建有密切关系,水库工程的修建,拦蓄了水库坝址以上的来水量,水库调蓄后的下泄水量以地表径流形式出现,因此,从下游滁州站的水文过程来看,地下径流仅来源于流域内水库工程未控区,从而导致场

次洪水的地下径流成分减小。

3.3 不同阶段降雨特征与产流要素之间的关系

场次径流深和洪峰流量是场次暴雨洪水两个最重要的水文要素,降水是产流最重要的驱动因子。对以超渗产流机制为主的地区而言,产流量的大小与降水强度密切相关,雨强越大,产流量及洪峰流域越大;而对以蓄满产流机制为主的区域来说,产流量的大小则主要由降水量的多寡决定。随着流域内人类活动的增强,水利工程修建、下垫面变化,以及社会经济发展引起用水量的增加也会对河川径流量产生一定的影响。图 4 和图 5 分别给出了清流河流域不同年代场次洪峰流量和场次径流量与降水量及时段最大雨强之间的关系。由图可以看出:

(1) 场次径流量及洪峰流量与场次降水量之间具有较好的相关性,不同阶段的相关系数分别介于 0.76 ~ 0.81 和 0.78 ~ 0.83 之间。相比而言,场次径流量、洪峰流量与时段最大降水强度之间的点群散乱,相关性较弱,不同阶段的相关系数分别介于 0.05 ~ 0.29 和 0.09 ~ 0.34 之间,由此说明降水量是清流河流域产流的主要因素,流域产流机制以蓄满产流为主^[15]。

(2) 对比不同年代场次径流量、洪峰流量与场次降水量之间的关系点群不难发现,在场次降水量低于 100mm 时,不同年代的点群较为集中;在降水量超过 100mm 时,21 世纪以来的点群普遍较低,对应同样的降水条件,21 世纪以来的流域产流量及洪峰流量相对较小。

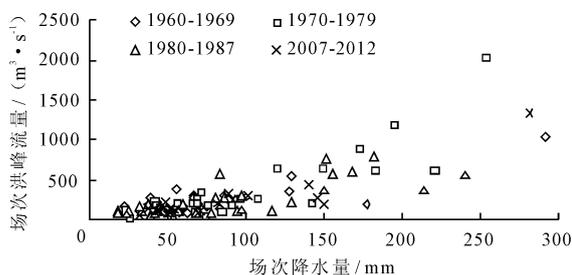


图 4 清流河流域场次洪峰流域与场次降水量、时段最大降水强度之间的关系

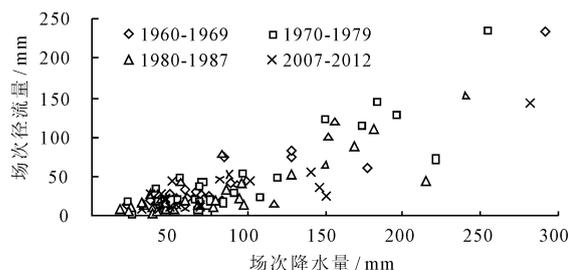
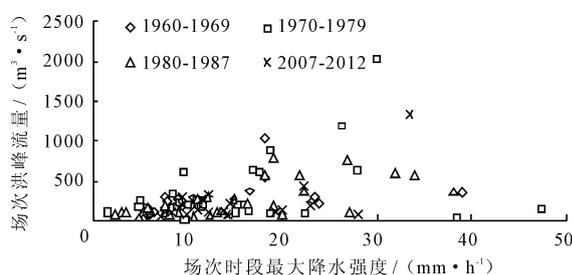
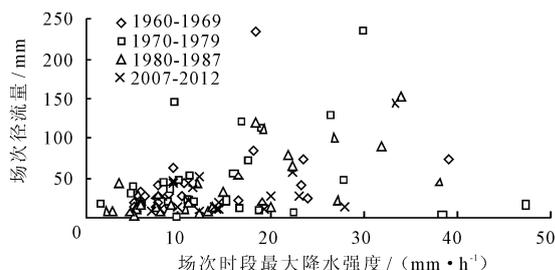


图 5 清流河流域场次径流与场次降水量、时段最大降水强度之间的关系



分析认为21世纪以来出现以上情况与流域内水利工程修建及运行有密切关系。清流河流域水库以防洪、供水为主,通过拦蓄流域内的暴雨洪水达到保证下游安全,同时为非汛期提供充足水源。水库的运行调度消减了场次暴雨洪水的洪峰流量,拦蓄径流使得下游实测的场次径流量减小。

4 结 语

(1)清流河流域气候湿润,场次降雨特征在一定程度上决定了洪水过程变化,同时,水利工程修建和下垫面变化等人类活动对暴雨洪水过程特征也有一定影响,主要表现为使得洪峰流量减小,多峰过程不明显,洪水过程总体变缓。

(2)清流河流域场次暴雨洪水的产流系数为0.44,对任何一个年代而言,产流系数变化幅度均较大;从年代际变化趋势来看,场次暴雨洪水的产流系数总体具有递减趋势。地表径流是清流河流域暴雨洪水的主要成分,平均占场次径流总量的61.8%,由于水利工程的调蓄作用,地表径流占场次径流总量的比率有增大的趋势。

(3)场次径流量及洪峰流量与场次降水量之间具有较好的相关性,雨强对清流河流域暴雨洪水特征影响相对较小,蓄满产流是清流河流域主要的产流机制。人类活动对较大降雨条件下的水文过程影响更为明显。分析人类活动作用下的水文效应是未来研究的重要方向。

参考文献:

[1] 丁一汇,张建云.暴雨洪涝[M].北京:气象出版社,2012.

- [2] 史辅成,易元俊,高治定.黄河流域暴雨与洪水[M].郑州:黄河水利出版社,1997.
- [3] 张建云.城市化与城市水文学面临的问题[J].水利水运工程学报,2012(1):1-4.
- [4] 王国庆,王云璋.产汇流及产沙输沙数学模型研究综述[J].西北水資源与水工程学报,1998,9(3):27-31.
- [5] 解河海,冯杰.大孔隙坡面产汇流及侵蚀试验[J].东北水利水电,2010,28(11):45-47.
- [6] 许珂艳,王秀兰,赵书华,等.小理河流域产汇流特性变化[J].水資源与水工程学报,2004,15(3):24-27.
- [7] 高攀宇,李身渝,曾适,等.嘉陵江流域暴雨洪水特征及预报[J].人民长江,2011,42(11):56-59.
- [8] 王国庆,张建云,李岩,等.窟野河流域径流演变及其驱动因素分析[J].水資源与水工程学报,2014,25(2):7-11+16.
- [9] 何进知,李舒宝,张永江,等.森林植被对流域产汇流机制的影响效应分析[J].水文,2000,20(2):11-13.
- [10] 李建柱,冯平.紫荆关流域下垫面变化对洪水的影响[J].地理研究,2011,30(5):921-930.
- [11] 万荣荣,杨桂山.流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J].湖泊科学,2004,16(3):258-264.
- [12] 穆兴民,王文龙,徐学选.黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J].水利学报,1999,30(2):71-75.
- [13] 荆新爱,王国庆,路发金,等.水土保持对清涧河流域洪水径流的影响[J].水利水电技术,2005,36(3):66-68.
- [14] 翟然,王国庆,万思成,等.清流河流域场次洪水的退水特征及过程模拟[J].水資源与水工程学报,2015,26(3):1-4.
- [15] 林三益.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [16] 张端虎.基于非线性回归的流域洪水退水曲线拟合方法研究[J].广东水利水电,2012(7):25-27.