

长江流域山区暴雨洪水的多因素驱动机制

王靖凯¹, 余甜雪¹, 李纪宇¹, 叶盛¹, 冉启华^{1,2}

(1. 浙江大学建筑工程学院水科学与工程研究所; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室)

摘要:基于长江流域 212 个水文站点的实测数据,分析了洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度及流域面积之间的非线性关系,并验证了洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的幂函数关系,进而量化分析了前期土壤相对饱和度与相对降雨强度的比值(SPR)和洪峰流量之间的关系,以及 SPR 和洪峰流量的线性拟合方程中的常量系数、自变量系数与流域平均坡度之间的关系。结果表明:随着流域面积的增大,降水量对暴雨洪水的影响减弱,而前期土壤饱和度的影响增强;随着 SPR 的增大,洪峰流量呈先增大后减小的规律;流域平均坡度与常量系数呈正相关关系,流域平均坡度与自变量系数呈负相关关系。

关键词:长江流域;暴雨洪水;洪峰流量;降水量;前期土壤饱和度

Multi-factor driving mechanisms of rainstorm-induced floods in mountainous areas of the Yangtze River Basin// Wang Jingkai¹, Yu Tianxue¹, Li Jiyu¹, Ye Sheng¹, Ran Qihua^{1,2} (1. Institute of Water Science and Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on observed data from 212 hydrological stations in the Yangtze River Basin, this paper analyzes the nonlinear relationships among peak discharge, precipitation, antecedent soil saturation, and drainage area. It verifies the powerlaw relationships between peak discharge and precipitation as well as antecedent soil saturation, and quantitatively analyzes the relationship between peak discharge and the ratio of relative antecedent soil saturation to relative rainfall intensity (SPR). Specifically, the relationships between the basin mean slope and the coefficients (both the constant and the independent variable coefficients) of the linear fitting equation relating SPR to peak discharge are investigated. The results show that with the increase of drainage area, the influence of precipitation on rainstorm-induced floods weakens, while that of antecedent soil saturation strengthens. With the increase of SPR, peak discharge first increases and then decreases. The basin mean slope is positively correlated with the constant coefficient but negatively correlated with the independent variable coefficient.

Key words: the Yangtze River Basin; rainstorm-induced floods; peak discharge; precipitation; antecedent soil saturation

洪水被联合国气候变化专门委员会认为是当今世界上造成巨大损失的自然灾害之一^[1],其中山洪因对降水响应迅速,易产生大量的地表径流和急速的地下径流,这使得山区集水区更容易受到洪水灾害的影响^[2]。近年来,受全球变暖和极端气候事件增多的影响,极端降水事件的频率和强度在部分地区显著增大^[3],山洪在世界范围内呈现出频发的趋势^[4],特别是长江流域,随着极端降水事件频率的上升,洪水高风险区不断扩大,致灾风险显著上升^[5]。

我国山区面积约占全国陆地面积的 2/3,全国山丘区人口占全国总人口的 56%,且我国几乎所有

山地(青藏高原内部山地除外)都发生过山洪灾害^[6],山洪灾害影响十分显著,全国山洪灾害伤亡人数占洪涝灾害伤亡人数的 70%左右^[7]。由于山洪灾害具有突发性,且致灾性很强,精准的山洪预测和风险评估是当前山洪灾害研究的重点方向,而这需要对洪水事件的产生机制和特点有更加深入的研究。虽然降水量一直被认为是导致洪涝灾害的重要因素,但仅凭降水量很难解释暴雨洪水的变化^[8],更加合理的解释是,暴雨洪水的变化是不同因素共同作用的结果。徐宗学等^[9]认为城市下垫面特征与产汇流机理深刻影响城市暴雨洪水。Pathiraja 等^[10]认为前期土壤饱和度是重要的主导因素。

基金项目:浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJWZ24E090002)

作者简介:王靖凯(1999—),男,硕士,主要从事水资源与水环境工程研究。E-mail:22212098@zju.edu.cn

Wasko 等^[11]发现降水量对洪水的影响存在一个临界点,超过该临界点,降水量将主导洪水响应;低于该临界点,洪峰流量将随着土壤湿度的降低而减小。除了研究降水量和前期土壤饱和度的共同作用,研究者也开始关注降水量和前期土壤饱和度对暴雨洪水的相对贡献。不同地区这两个因素对于暴雨洪水的相对重要性不同^[8],可能是因为不同地区空间尺度不同^[12-13],在大型集水区(大于或等于 1000 km²),洪峰流量更多地受前期土壤饱和度的影响,而在较小的集水区(小于 1000 km²),洪峰流量更有可能受降水量影响^[14]。在长江中下游流域中,降水量和前期土壤饱和度在不同的尺度下对于暴雨洪水的相对重要性有较大差别^[15]。Yu 等^[16]利用综合水文模型(integrated hydrology model, InHM)模拟了长江寿溪河流域(长江支流岷江上游的主要支流)在不同降水量和土壤湿度条件下的洪水响应,评估了特定环境中流域面积、降水量、土壤饱和度对于暴雨洪水的重要性,并指出流域暴雨洪水响应过程的影响因素存在非线性变化特征及尺度效应,但缺乏相应的实证数据对此规律进行验证。

本文在 Yu 等^[16]的研究基础上扩大研究范围,将研究区域设定为整个长江流域,利用长江流域内具有多年实测降水量、土壤湿度和径流资料的 212 个子流域水文站点的监测数据,探究流域面积、降水量、前期土壤饱和度等因素对暴雨洪水的影响,并利用数值拟合方法分析各子流域暴雨洪水的主导因素的空间分布特征。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

长江是我国最长的河流,全长约为 6300 km,发源于我国西部青藏高原地区。长江流域面积达 180 万 km²,覆盖我国约 19% 的国土面积。长江流域整体地势西高东低,横跨三级阶梯,地势地貌条件复杂。长江流域地处亚热带湿润季风气候区,60% 的降雨集中在 6—8 月^[17],年降水量达 1200 mm,但降雨在流域内部分布不均匀,近年来极端降雨事件的频率和强度有所增大,且流域内山地面积约占整个流域面积的 70%^[18]。降雨强度高、降雨时空分布不均以及与复杂地形的叠加作用,导致山洪灾害频发。加之长江流域经济发达,人口与产业密集,山洪的灾害性更为突出。2017 年长江流域洪涝灾害造成直接经济损失超过 900 亿元^[19],洪涝灾害规模大,损失严重。近百年来世界上 10 次最为严重的洪水中,7 次发生在中国,其中 5 次发生在长江流域,严重制约长江流域经济社会可持续发展。因此迫切需要对

长江流域暴雨洪水成因机理及不同影响因素的驱动作用进行探究。

1.2 数据来源

流域高程数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的 30 m 精度数字高程模型。径流数据来自《中华人民共和国水文年鉴》中长江流域内的 212 个水文站点(图 1),选取 2008—2016 年共 9 年的日径流量数据。降雨和土壤含水量数据来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)发布的中国陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)近实时产品数据集,该数据集在中国境内具有较高的时空分辨率和准确性^[20]。

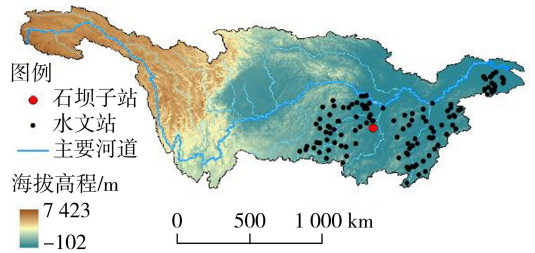


图 1 长江流域主要水文站点地理位置

2 研究方法

2.1 洪水事件选取

洪水事件包括洪峰、洪量、洪水过程线等^[21]。根据径流数据选择合适的洪水事件,充分考虑洪水事件的开始、结束和持续时间,有助于理解洪水过程的时间演变。当前洪水事件的常用选取方法包括通过设定流量阈值筛选洪水数据的超越峰值法(peaks over threshold, POT)^[22]和只识别每年最大洪水事件的年最大洪水事件法(annual maximum series, AMS)^[23]。POT 虽然能识别年内多个洪水事件,但阈值设定较为主观,影响结果的准确性。AMS 虽然标准客观,容易操作,但数据利用率低。为深入解析径流机制并提升数据利用率,本文综合两种方法,从 212 个水文站点 2008—2016 年的径流数据中挑选特征性较强的径流事件,以径流量开始上升视为一场次径流的开始,该径流过程终止于下一场次径流的开始,以此界定一个完整的单场次径流过程。每个站点每年选取 3 场次洪峰流量最大的径流过程,共计 5724 场次径流过程。

2.2 相对重要性评价方法

本文采用平均过序法(Lindeman-Merenda-Gold, LMG)来衡量多元回归中自变量的相对重要性。LMG 能清晰界定多元回归中自变量相对重要性的内涵,同时兼顾自变量的单独影响与交互影响,被认为是表征因素相对重要性的优良方法^[24]。

LMG 评价步骤如下:①建立包含若干个自变量的统计模型,并设定这些自变量进入模型的顺序;②在所有可能的进入顺序下,计算每个自变量进入该统计模型的半偏相关系数平方,用于排除其他自变量的干扰,精准衡量单个自变量的独特作用;③对所有自变量的半偏相关系数平方求均值,以衡量该自变量在控制其他自变量影响后对因变量所贡献的独立解释量。LMG 具体计算过程见文献[24]。

2.3 相对重要性评价指标

前期土壤饱和度和降水量是长江中下游流域暴雨洪水主要影响因素,虽然最大的洪峰流量总是在高前期土壤饱和度和极端降雨的条件下形成,但不同的先决条件下,两者对洪峰流量的影响存在差异。选择径流过程开始前 1 d 的土壤饱和度作为前期土壤饱和度指标,洪峰发生前 7 d 的累计降水量作为降水量指标。为了进一步量化极端洪水发生过程中前期土壤饱和度和降水量的相对重要性,采用前期土壤相对饱和度与相对降雨强度的比值(SPR)作为相对重要性评价指标^[25]:

$$R = S/P \quad (1)$$

式中: R 为 SPR; S 为前期土壤相对饱和度,是前期土壤饱和度与全年最大土壤饱和度的比值; P 为相对降雨强度,即洪峰发生前 7 d 的累计降水量与全年任意连续 7 d 累计降水量最大值的比值。

SPR 可反映前期土壤饱和度和降水量在洪水生成中的相对重要性。当洪水事件发生时,若 SPR 约为 1,则前期土壤饱和度和降水量对洪水事件发生的贡献相当;若 SPR 大于 1,说明该洪水事件发生主要受前期土壤饱和度的影响;若 SPR 小于 1,说明降水量是洪水事件发生的主导因素。

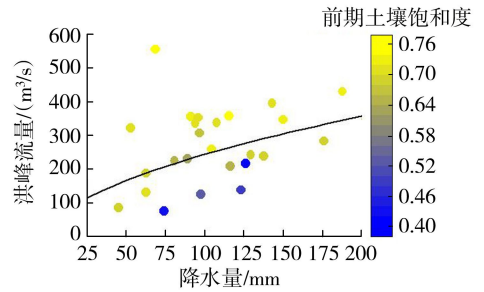
3 结果与分析

3.1 不同因素对暴雨洪水非线性变化的影响

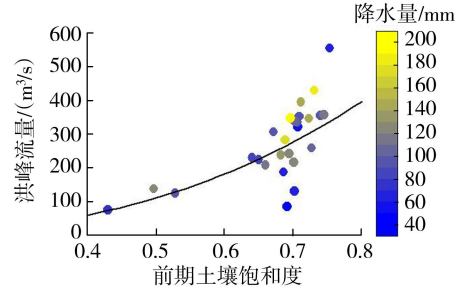
3.1.1 降水量和前期土壤饱和度

为了研究暴雨洪水响应过程与降水量、前期土壤饱和度的关系,将长江流域 212 个水文站点的实测各场次洪水洪峰流量分别与降水量和前期土壤饱和度进行拟合。选择石坝子站(流域面积 551 km²,图 1 中红色点)为代表站点,图 2 为该站点洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的关系。可见洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度均呈幂函数关系。随着降水量和前期土壤饱和度的增大,洪峰流量不断增大,且其变化过程存在非线性特征,即流域暴雨洪峰流量变化的斜率随降水量的增大而降低(图 2(a)),随前期土壤饱和度的增大而增大(图 2(b))。降水量和前期土壤饱和度共同影响暴雨洪水响应过程:由

图 2(a)中蓝色点可知,前期土壤饱和度较低时洪峰流量始终较小;由图 2(a)中左侧黄色点可看出,在前期土壤饱和度较高的情况下,即使降水量较低也可能产生较大的洪峰流量。



(a) 洪峰流量与降水量的幂函数关系

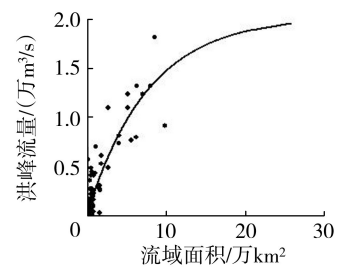


(b) 洪峰流量与前期土壤饱和度的幂函数关系

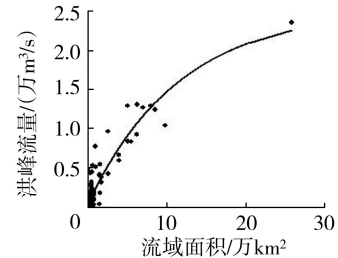
图 2 石坝子站洪峰流量与降水量、前期土壤饱和度的关系

3.1.2 流域尺度因素

为进一步探究暴雨洪水的尺度效应,选取长江流域 212 个水文站点 2008—2016 年每年最大场次洪水作为研究样本,分析其洪峰流量与流域尺度因素(流域面积)的关系,并选取典型年份进行尺度效应分析,见图 3。可知洪峰流量随流域面积的增大而增大,且与流域面积存在明显的指数函数关系,大流域内洪峰流量的变化幅度远小于小流域。



(a) 2008年洪峰流量与流域面积的关系



(b) 2015年洪峰流量与流域面积的关系

图 3 长江流域不同年份洪峰流量的尺度效应

此外,洪峰流量的非线性变化表明洪峰流量的变化幅度与流域面积的变化幅度存在差异,以 2008 年

为例,当流域面积从 2.7 万 km² 增至 8.5 万 km²(约为 3 倍)时,洪峰流量增至 3.73 倍;而当流域面积由 8.5 万 km² 增至 25.8 万 km²(约为 3 倍)时,洪峰流量仅增大至 1.13 倍,远小于流域面积的变化幅度。即在长江流域范围内,大流域产流比率通常较小,这与 Yu 等^[16]的结论一致,但洪峰流量与流域面积的关系从 Yu 等^[16]中的线性关系转变为非线性的指数函数关系,这可能是流域面积扩大所致。

3.2 影响因素相对重要性

随着 SPR 的增大,长江上游小流域场次洪水洪峰流量呈先增大后减小的趋势^[16]。本文根据长江中下游流域实测数据,拟验证暴雨洪水产流过程的非线性变化,并量化分析降水量、前期土壤饱和度的相对重要性及其尺度效应。每个站点选取年最大 3 场次暴雨洪水过程,计算每场次暴雨洪水过程的 SPR。对 SPR 进行分组,并绘制单位面积洪峰流量与 SPR 的箱线图(图 4)。由图 4 可见:极小或极大的 SPR 都会导致洪峰流量的降低;从整体来看随着 SPR 的增大,单位面积洪峰流量呈先增大后减小的趋势;洪峰流量的最大值出现在 SPR 在 0.3~0.7 之间。而 Yu 等^[16]发现,长江寿溪河流域暴雨洪水的洪峰流量出现了随 SPR 增大先增大后减小的变化过程,当地洪峰流量的最大值出现在 SPR 约为 1 时。由此可见,实测洪峰流量最大值对应的 SPR 取值范围(即实测洪峰流量随 SPR 变化的转折点)与模拟结果不同,这种差异可能源于:①长江中下游各流域的前期土壤饱和度实测值大部分在 0.6~0.7 之间,极少出现极端情况,而模拟中设计了前期土壤饱和度 0.4 和 0.9 的工况,以分析极度干旱和极度湿润的情况;②流域间存在一定的下垫面条件差异;③实际场次洪水过程降雨历时长,而模拟中降水量数据取累计 7 d 降水量,长历时降雨会使流域产流更大程度依赖于降雨的作用^[26]。

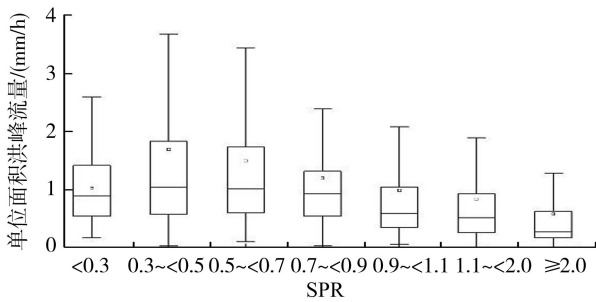
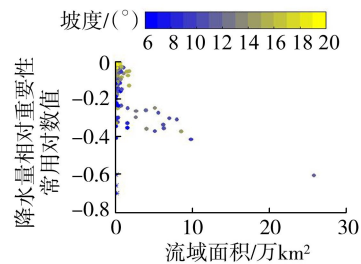


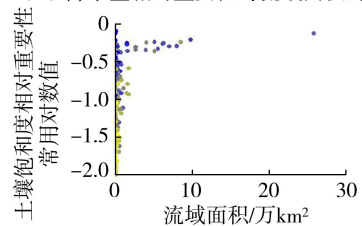
图 4 长江流域暴雨洪水洪峰流量与 SPR 的箱线图

在 Yu 等^[16]研究基础上,综合每个站点 27 场次暴雨洪水过程中洪峰流量、降水量和前期土壤含水量数据,基于 LMG 计算长江流域内 212 个水文站点控制流域中降水量和前期土壤饱和度对于各场次暴

雨洪水响应的相对重要性。为了更清晰地展现其动态变化规律,对每个站点降水量和前期土壤饱和度的相对重要性取常用对数值,其与流域面积的关系如图 5 所示,并用流域平均坡度进行着色。可知随着流域面积的增大,降水量的相对重要性降低,而前期土壤饱和度的相对重要性增大。从图 5(a) 看出有 3 个蓝色点的降水量相对重要性很小,这是由于其对应站点位于水库或湖泊旁,而水库和湖泊具有很强的径流调蓄作用,导致这些站点虽然流域面积小,但暴雨洪水的主导因素仍然是前期土壤饱和度。此外,流域平均坡度也在很大程度上影响着降水量和前期土壤饱和度的相对重要性。从图 5(b) 可知,坡度大的流域其前期土壤饱和度的相对重要性较小。因此在日常防汛工作中,要格外注意坡度较大的山区长时间连续降雨后的径流过程。在此情况下,流域内的土壤极度湿润,前期土壤饱和度会成为暴雨洪水形成的主要原因,即使是较小的降水量也会产生大量级的洪水。



(a) 降水量相对重要性与流域面积的关系



(b) 前期土壤饱和度相对重要性与流域面积的关系

图 5 长江流域降水量和前期土壤饱和度相对重要性与流域面积的关系

对 27 场次径流过程对应的洪峰流量、降水量和前期土壤饱和度数据取平均值,得到多年平均洪峰流量、降水量和前期土壤饱和度数据,采用 LMG 指标衡量各流域降水量和前期土壤饱和度的相对重要性,将相对重要性常用对数值大于 0.5 的影响因素作为该流域暴雨洪水的主导因素。图 6 为长江流域 212 个水文站点所控制的流域内场次暴雨洪水主导因素的空间分布。图 6 中粉色点代表该站点控制流域暴雨洪水的主导因素为降水量,蓝色点表示该流域暴雨洪水的主导因素为前期土壤饱和度。可以发现长江中下游流域大部分地区暴雨洪水的主导因素为降水量。前期土壤饱和度占据主导地位的流域多

处于流域干流水文站所控制的范围内,尤其是位于洞庭湖水系的湘江流域。

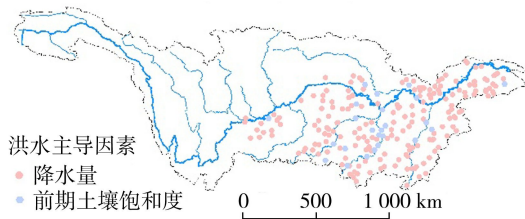
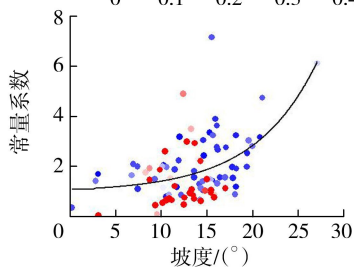
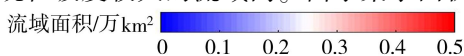


图6 长江流域暴雨洪水主导因素空间分布

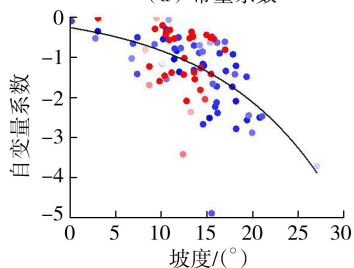
3.3 主导因素回归系数与流域平均坡度的关系

从各场次暴雨洪水过程的 SPR 与单位面积洪峰流量的关系可以发现,二者存在明显的负相关关系。对 212 个水文站点 27 场次暴雨洪水过程的所有 SPR 与相应洪峰流量进行线性拟合,分别统计 SPR 与洪峰流量的拟合方程中的常量系数及自变量系数,分析其与流域平均坡度的关系。

图 7 为常量系数和自变量系数随流域平均坡度的变化,可见拟合方程中的常量系数与坡度存在正相关关系,而自变量系数则随着坡度的增大而减小。这表明,在 SPR 和洪峰流量的关系中,随着坡度的增大,洪峰流量随 SPR 增大而下降的幅度不断增大,且这两个系数与坡度均存在显著的非线性关系,常量系数和自变量系数的变化幅度均随着坡度的增大而增大。一方面,坡度较大的流域内 SPR 普遍较小,这可能是由于陡峭的地形导致土壤的保水能力较弱,土壤含水量一般较低,从而导致 SPR 相对较小。另一方面,由于长江中下游流域较为平缓,水文站点控制流域的平均坡度大部分小于 20° ,洪峰流量随流域平均坡度的增大而增大,即大洪峰流量往往出现在坡度较大的流域内。由于集水面积大的流



(a) 常量系数



(b) 自变量系数

图7 常量系数和自变量系数随流域平均坡度的变化

域多位于河道中下游,其单位面积的洪峰流量变化平缓,其平均坡度一般也较小,因此大流域面积内洪峰流量随 SPR 的变化较为平缓。

回归分析时采用的是单位面积的洪峰流量,消除了流域面积对洪峰流量的影响。回归分析结果表明洪峰流量随 SPR 的变化很大程度上依赖于流域平均坡度的变化。而对于河流干流区域而言,其河道上已修建许多大型水库,故具有较强的洪水调蓄能力,从而降低了流域内发生暴雨洪水的风险。但在山区源头流域,流域平均坡度较大,各场次暴雨洪水响应过程洪峰流量变化幅度较大,且监控设备有限,发生暴雨洪水的风险较大,因此更需关注河流上游区域的暴雨洪水过程。

4 结论

a. 长江流域实测数据较好地验证了洪峰流量随降水量、前期土壤饱和度以及流域面积变化的非线性规律。洪峰流量与降水量呈幂函数关系,洪峰流量的变化幅度随前期土壤饱和度的升高而增大。洪峰流量的尺度效应表现为随着流域面积的增大,流域产流比率降低,且洪峰流量与流域面积的关系从线性关系逐渐转变为指数函数关系。

b. 长江流域实测数据较好地验证了各场次暴雨洪水过程中降水量和前期土壤饱和度相对重要性的非线性变化规律。随着 SPR 的增大,洪峰流量呈先增大后减小的规律,洪峰流量最大值出现在 SPR 处于 0.3~0.7 的范围内。与模拟结果一致的是,随着流域面积的增大,降水量对于暴雨洪水的相对重要性降低,而前期土壤饱和度的相对重要性升高,但长江中下游流域大部分区域暴雨洪水仍以降水量为主导因素。

c. 将各场次暴雨洪水过程的 SPR 与相应的洪峰流量进行线性拟合,结果表明拟合方程中的常量系数及自变量系数与流域平均坡度存在显著的非线性变化关系。常量系数与流域平均坡度呈正相关关系,而自变量系数则与流域平均坡度呈负相关关系,且常量系数和自变量系数的变化幅度均随流域平均坡度的增大而增大。

参考文献:

[1] IPCC. Summary for policymakers [C] // Barros C B V, Stocker T F, Qin D, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2012:25-64.

[2] Geitner C, Mergili M, Lammel J, et al. Modelling peak runoff in small Alpine catchments based on area properties

- and system status [C]//Veuilliet E, Johann S, Weck-Hannemann H. Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments. Berlin: Springer, 2009; 103-134.
- [3] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 128-136. (Xie Zhigao, Jia Wenhao, Wang Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))
- [4] Wang Xiekang, Gourbesville P, Liu Changjun. Flash floods: forecasting, monitoring and mitigation strategies [J]. Water, 2023, 15(9): 1700.
- [5] 高玉琴, 王慧, 刘钺, 等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 6-12. (Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [6] 马建华, 胡维忠. 我国山洪灾害防治形势及防治对策[J]. 人民长江, 2005, 36(6): 3-5. (Ma Jianhua, Hu Weizhong. Situation of flash flood disaster prevention and control in China and its countermeasures [J]. Yangtze River, 2005, 36(6): 3-5. (in Chinese))
- [7] 水利部: 当前我国已经全面进入汛期 局部地区发生了洪涝灾 [EB/OL]. (2020-06-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1669206599644932788>.
- [8] Berghuijs W R, Woods R A, Hutton C J, et al. Dominant flood generating mechanisms across the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(9): 4382-4390.
- [9] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [10] Pathiraja S, Westra S, Sharma A. Why continuous simulation?: the role of antecedent moisture in design flood estimation[J]. Water Resources Research, 2012, 48(6): W06534.
- [11] Wasko C, Nathan R. Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 432-441.
- [12] Berghuijs W R, Allen S T, Harrigan S, et al. Growing spatial scales of synchronous river flooding in Europe[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(3): 1423-1428.
- [13] Blöschl G. Three hypotheses on changing river flood hazards[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(19): 5015-5033.
- [14] Wasko C, Sharma A. Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7945.
- [15] 王金, 冉启华, 刘琳, 等. 长江中下游流域极端洪水事件影响机制研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 119-124. (Wang Jin, Ran Qihua, Liu Lin, et al. Research on the dominant mechanism of extreme flow events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(6): 119-124. (in Chinese))
- [16] Yu Tianxue, Ran Qihua, Pan Hailong, et al. The impacts of rainfall and soil moisture to flood hazards in a humid mountainous catchment: a modeling investigation [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1285766.
- [17] Xu Ying, Xu Chonghai, Gao Xuejie, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st Century [J]. Quaternary International, 2009, 208(1/2): 44-52.
- [18] Lijuan C, Manyin Z, Weigang X. Yangtze River basin (China) [J]. Distribution, Description, and Conservation, 2018. doi: 10.1007/978-94-007-4001-3_99.
- [19] 新华社. 长江流域去年洪涝灾害造成直接经济损失超 900 亿元 [EB/OL]. (2018-01-14). https://www.xinhuanet.com/politics/2018-01/14/c_1122256897.htm.
- [20] Sun Shuai, Shi Chunxiang, Pan Yang, et al. Applicability assessment of the 1998—2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China [J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 879-892.
- [21] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 综合多特征量的洪水事件频率问题研究[J]. 人民长江, 2007, 38(4): 127-129. (Xiao Yi, Guo Shenglian, Liu Pan, et al. Research on flood frequency event with multiple variables [J]. Yangtze River, 2007, 38(4): 127-129. (in Chinese))
- [22] 郑炎辉, 何艳虎, 李深林, 等. 基于 POT 与 P-IOSM 的洪水风险信息挖掘[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 965-973. (Zheng Yanhui, He Yanhu, Li Shenlin, et al. The flood risk data mining based on POT and P-IOSM [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 965-973. (in Chinese))
- [23] Swetapadma S, Ojha C S P. Selection of a basin-scale model for flood frequency analysis in Mahanadi River Basin, India [J]. Natural Hazards, 2020, 102(1): 519-552.
- [24] Groemping U. Relative importance for linear regression in R; the package relaimpo [J]. Journal of Statistical Software, 2006, 17(1): 1-27.
- [25] Ran Qihua, Wang Jin, Chen Xiuxiu, et al. The relative importance of antecedent soil moisture and precipitation in flood generation in the middle and lower Yangtze River basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(19): 4919-4931.
- [26] Vreugdenhil M, Széles B, Salinas J L, et al. Non-linearity in event runoff generation in a small agricultural catchment [J]. Hydrological Processes, 2022, 36(8): e14667.

(收稿日期: 2024-09-10 编辑: 骆超)