

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.013.

李宁, 张志兰, 符素华, 等. 西南小流域洪峰流量估算[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 142-148.

Li Ning, Zhang Zhilan, Fu Suhua, et al. Estimation of Peak Flows in Southwest Small Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 142-148.

## 西南小流域洪峰流量估算

李 宁<sup>1</sup>, 张志兰<sup>2</sup>, 符素华<sup>1</sup>, 于秀娟<sup>2</sup>, 黄 嵩<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 2. 重庆市水土保持监测总站, 重庆 401147)

**摘 要:** [目的] 准确预测小流域的洪峰流量, 为小流域水文应用和水保措施设计提供支撑。 [方法] 利用重庆万州刘家沟小流域 2013—2021 年共 215 次降雨事件数据, 采用皮尔逊相关分析的方法, 分析了重庆小流域次暴雨洪峰流量与降雨参数和径流参数的相关关系, 进而采用线性回归和非线性回归方法, 根据降雨径流资料估算了洪峰流量。 [结果] 研究建立了适用于西南小流域的洪峰流量公式, 使用 172 场降雨事件数据进行参数率定, 其模型有效系数为 0.85; 使用 43 场降雨事件对模型进行验证, 相应的模型有效系数为 0.82, 结果表明新公式在研究区是可以接受的。 [结论] 研究建立的洪峰流量公式, 能够较好地预测研究流域的洪峰流量, 新建公式将为重庆乃至中国西南小流域进行水土保持措施的决策、水土保持工程设施设计和土壤侵蚀评价等提供一定技术基础。

**关键词:** 洪峰流量; 小流域; 水土保持; 径流

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0142-07

## Estimation of Peak Flows in Southwest Small Watershed

Li Ning<sup>1</sup>, Zhang Zhilan<sup>2</sup>, Fu Suhua<sup>1</sup>, Yu Xiujuan<sup>2</sup>, Huang Song<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Chongqing Central Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to accurately predict the peak flow at small watershed scale, and to provide support for hydrological application and soil and water conservation assessment. [Methods] The data of 215 rainfall events from 2013 to 2021 were used to analyze effect factors of the peak flow in Liujiagou small watershed, Wanzhou County, Chongqing. The Pearson correlation analysis was performed between peak flow rate and effect factors, including runoff depth, runoff coefficient, rainfall depth, maximum 30-minute rainfall intensity ( $I_{30}$ ), and average rainfall intensity. A new peak flow rate equation was developed based on linear regression and nonlinear regression analysis to predict the peak flow rate for small watersheds in Chongqing. The first data set, including 172 storms, was used to develop a new formula for predicting peak flow rate. A second set of data, including 43 storm events, was used to test the new equation. [Results] The peak flow rate was significantly correlated with rainfall,  $I_{30}$ , runoff depth, and runoff coefficient at the 0.01 confidence level. The model efficiency was 0.85 and 0.82 when 172 and 43 rainfall events were used, respectively. [Conclusion] The new equation can provide good accuracy in the small watershed in Chongqing. The new equation will be helpful for the decision-making of soil and water conservation measures, the design of soil and water conservation engineering facilities and the evaluation of soil erosion in Chongqing and even the small watersheds in southwest China.

**Keywords:** peak flow rate; small watershed; soil conservation; runoff

收稿日期: 2023-03-25

修回日期: 2023-04-25

资助项目: 重庆市水利局“重庆市 2022 年市级监测区域水土流失动态监测项目”[CZ(CQS22C00819)2253]

第一作者: 李宁 (1999—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 202121051040@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 符素华 (1973—), 女, 四川岳池人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

洪峰流量可以表征径流搬运泥沙的能力<sup>[1]</sup>,是修正土壤流失方程 MUSLE<sup>[2]</sup>的重要参数。同时洪峰流量也是流域内建设堤坝、桥涵、水库等水利设施的重要参考因子。在全球变暖背景下,洪涝灾害、水土流失等问题日益加剧<sup>[3-9]</sup>,分析水土流失影响因子,评估水土流失、洪涝灾害,提供预警显得尤为重要,洪峰流量是广泛应用水土评估模型 SWAT 模型<sup>[10]</sup>的重要参数,是评估洪涝灾害不可缺少的重要参量,准确预测洪峰流量不仅是为科学决策提供可靠的数据支持,更是保护人民生命财产安全的需要。

计算洪峰流量的方法很多,如推理公式法、经验公式法、水文模型法等<sup>[11-14]</sup>。推理公式是基于暴雨形成洪水的基本原理推求设计洪水的方法,英、美国国家称之为合理化公式<sup>[14]</sup>,严格按照理论建立公式计算比较复杂,不适于实践应用推广。经验公式法<sup>[12]</sup>是通过数理统计得出的洪峰流量与其他相关变量的函数表达式,因其简单实用,多用于生产实践。目前针对中、大尺度流域建立的洪峰流量方程较多,但是适用于小流域的洪峰流量方程却很少,数据精度和可靠性是在小流域内建立洪峰流量模型的难点。一是建模型对数据精度要求高,二是小流域水文资料缺失、可靠性差<sup>[11,14]</sup>。小流域是我国进行水土流失综合治理、设计水土保持措施的基本单元,小流域土壤侵蚀特征及其影响因素也是当今全球研究热点之一<sup>[15-18]</sup>,因此建立小流域尺度上的洪峰流量经验公式具有重要实践应用价值和迫切的现实需要。

1851年,Chow<sup>[19]</sup>的文章中基于径流系数、降雨强度和流域面积提出了第一个预测洪峰流量的方程式;1868年 O'Connell<sup>[20]</sup>建立了洪峰流量与流域面积的指数方程;1977年,Williams 等<sup>[2]</sup>以径流为自变量,建立了洪峰流量与径流之间的公式;1984年,蔡冠雄等<sup>[21]</sup>以福建省为实例,选择流域平均时段雨深、时段长、流域面积 3 个因素建立了洪峰流量经验公式;2008年,Fu 等<sup>[22]</sup>基于中国黄土高原山西、陕西和甘肃 24 个流域 399 次降雨事件数据检验并改进了 CREAMS 模型在黄土高原上的洪峰流量方程,该方程的自变量有流域面积( $A$ ),径流深和降雨量( $P$ ),但是没有考虑雨强因子;2017年,Liu 等<sup>[23]</sup>基于陕西省 5 个径流小区和 5 个小流域的数据验证了洪峰流量方程在小流域尺度的适用性,采用量纲分析法和回归分析方法建立了两个新方程,方程中考虑的影响因素包括径流深( $R$ )、降雨量( $P$ )、最大 30 min 雨强和坡度( $S$ )。2022年 Shi 等<sup>[24]</sup>应用黄土高原 45 个流域 1 720 次降雨事件数据,引入降雨强度和土壤水分因子,基于 CREAMS 模型改进了洪峰流量公式。

目前,中国估算小流域洪峰流量的研究区域主要集中在北方,如北京市、陕西省、山西省、甘肃省等<sup>[25]</sup>研究较多,而用于中国南方地区计算洪峰流量的经验公式较少。因此本研究以重庆万州刘家沟小流域为例,综合考虑水文气象特征,研究降雨量、径流深对洪峰流量的影响,初步验证 Fu 等<sup>[22]</sup>所建洪峰流量方程在西南地区的适用性,并基于此建立适用于重庆小流域的洪峰流量方程,为重庆地区乃至中国西南地区相似流域计算洪峰流量、制定水土保持措施、设计防洪工程项目、评价土壤与水资源、预防和评估洪涝灾害风险等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据

本研究收集了重庆万州刘家沟小流域 2013—2021 年 9 a 共 215 次降雨径流数据。研究小流域控制站位于三峡库区腹心的重庆市万州区天城镇万河村,出口处地理坐标为东经 108°21′45″,北纬 30°53′45″。流域面积 1.64 km<sup>2</sup>,流域形状系数 0.43,主河道长 3.10 km,平均坡降 20%,坡度为 15°~25°的陡坡和坡度为 25°~35°的急陡坡占比 95%以上,最大设计流量 18.9 m<sup>3</sup>/s。刘家沟流域属典型的亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 201.5 mm,年内降雨分配不均,降雨事件集中在 5—9 月,年际变化较大;多年平均气温 17.8℃,极端最高、最低气温分别为 42.1, 3.7℃;多年平均相对湿度 82%;多年平均日照时数 1 295.3 h;无霜期 349 d。流域内土壤以黄壤和棕紫色砂壤土为主,平均土层厚度 20 cm,流域平均输沙模数 99.78 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀模数 2 826 t/(km<sup>2</sup>·a),流域综合治理度 42%。流域内耕地占比约 50%,园地和林地各占 20%左右,还有少量牧草地及其他用地。天然植被以松、杉、柏等为主,主要分布在流域上游,林草覆盖率达到 70%。人工植被以经果林为主,主要有油桐、桑树、柑桔、梨、板栗、杜仲等(图 1)。

### 1.2 研究方法

2008年,Fu 等<sup>[22]</sup>基于中国黄土高原 24 个流域 399 次降雨事件检验并改进了 CREAMS 模型,以流域面积、径流深和降雨量为自变量,采用非线性回归的方法,建立了适用于中国黄土高原的洪峰流量方程。本文将使用研究区降雨径流数据探索公式(1)在研究区预测洪峰流量的可行性。

$$Q_p = 6.69A^{0.59}R^{1.15A^{0.06}}P^{-0.72} \quad (1)$$

式中: $Q_p$ 为洪峰流量(m<sup>3</sup>/s); $A$ 为流域面积(km<sup>2</sup>); $R$ 为径流深(mm); $P$ 为降雨量(mm)。

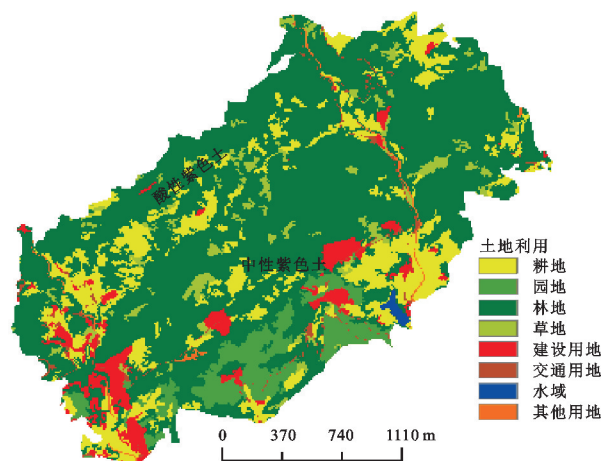


图 1 刘家沟小流域土地利用类型

Fig. 1 Land use types of Liujiagou small watershed

本研究以重庆万州刘家沟小流域为例,基于 2013—2021 年 215 次降雨事件,在 SPSS 24.0 软件中对洪峰流量、降雨量、平均雨强、最大 30 min 雨强、径流深、径流系数进行皮尔逊相关分析,以此了解研究流域的径流与洪峰流量特点。其中,为了消除流域面积对洪峰流量的影响,本研究采用洪峰流量模数的概念,洪峰流量模数定义为洪峰流量与流域面积的比值。

本研究基于流域 215 次降雨事件,校准验证 Fu 等<sup>[22]</sup>建立的洪峰流量方程。首先将所有数据根据洪峰流量从大到小排列,按规律抽出 1/5 的数据作为第二组验证数据,包括 43 组数据,其余 4/5 包括 172 组数据为第一组用于模型参数率定。之后使用软件 SPSS 24.0 采用非线性回归的方法建立洪峰流量方程。本文将对两个模型在研究区对洪峰流量预测的准确性。本文使用 Nash 等<sup>[26]</sup>提出的模型有效系数来评估预测数据和实测数据之间的拟合优度。定义为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (2)$$

式中: $E_f$ 为模型有效系数; $Q_{\text{obs}}$ 为实测数据; $Q_{\text{cal}}$ 为预测值; $\bar{Q}_{\text{obs}}$ 为实测数据的平均值。 $E_f$ 取值范围为 $-1 \sim 1$ ;当 $E_f$ 为 1 时,表示拟合值与测量值一致,拟合效果非常好;当 $E_f$ 为 0 时,表示平均测量值和预测值是等效的。当 $E_f$ 为负值时,表明拟合效果非常差。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流特点及影响因素

次降雨的径流深变化范围是 0.10~161.74 mm (图 2),径流持续时间较长,均大于 990 min,最大达到了 17 678 min。径流深集中分布在 0.10~10.00 mm,累计频率为 60.47%;有少部分降雨事件径流深达到 120 mm 以上,一方面由于降雨量较大,另一方面是因为前期有降雨使土壤前期含水量较大。研究

区降雨时间比较集中,土壤含水量从饱和降到不饱和需要时间较长,这就导致连续降雨时,时间靠后的降雨事件产流量大,径流深较大。径流系数范围是 0.003~0.91 (图 2)。径流系数小于 0.5 的累计频率高达 83%,其中在 0.0~0.1 分布最集中,累计频率为 25%。径流系数普遍较小,说明研究区的降雨以入渗为主,少部分形成地上径流。图 2 中可以看出径流系数存在比较大的情况,有 3 次降雨径流系数大于 0.8,分别是 2013 年 11 月 23 日径流系数为 0.91,2017 年 10 月 2 日径流系数为 0.82,2017 年 10 月 16 日径流系数为 0.81。这几天降雨之前曾有过降雨事件,使得这几天土壤前期含水量较大,土壤接近饱和状态,导致雨水入渗量少,大部分降雨用于产流,因此这几场降雨径流系数较大。在 0.01 置信度水平下,径流深与最大 30 min 雨强( $I_{30}$ )和降雨量呈显著正相关,与平均雨强显著不相关(表 1)。因此在研究区内,对径流深影响较大的因素是降雨量和  $I_{30}$ ,降雨量和  $I_{30}$  越大,径流深越大,产流越多。径流深与降雨量相关系数更大,说明径流深受降雨量影响更大。径流系数与平均雨强和  $I_{30}$  的相关系数,均未通过显著性检验,说明平均雨强和  $I_{30}$  对径流系数没有明显影响。径流系数与降雨量的相关系数为 0.364,二者呈显著正相关,这说明径流系数会随着降雨量增多而变大。在 Fu 等<sup>[22]</sup>研究的黄土高原丘陵沟壑区,径流系数与所有降雨特征值均呈显著正相关( $p=0.01$ ),其中降雨强度与径流系数的相关性更好,最大 30 min 雨强与径流系数相关系数最大,降雨量与径流系数的相关系数最小<sup>[27]</sup>。这与本研究区结果相反,本研究区的降雨量与径流系数相关系数最大,降雨强度对径流系数的影响反而更小。

### 2.2 洪峰流量特点及影响因素

研究区 2013—2021 年洪峰流量范围是 0.001~11.010  $\text{m}^3/\text{s}$ ,洪峰模数范围是 0.000 6~6.71  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。流域内洪水以单峰和双峰为主,少数以多峰形式呈现。较高的洪峰流量多发生在 6—9 月份。洪峰流量集中在 0.00~0.500  $\text{m}^3/\text{s}$ ,分布占比 67%。洪峰模数主要集中在 0.00~0.50  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,占比 74% (图 3)。在 0.01 置信度水平下,降雨参数中降雨量和  $I_{30}$  与洪峰流量呈显著正相关,其中降雨量与洪峰流量的相关性更强,相关系数为 0.684,而平均雨强与洪峰流量的相关系数在统计上不显著。径流参数中径流深和径流系数与洪峰流量的相关系数均表现显著正相关(表 2)。随着最大 30 min 雨强、降雨量、径流深、径流系数几个因素变化,洪峰流量也会同方向变化,其中降雨量和径流深对洪峰流量的影响更大。Liu



等<sup>[23]</sup>研究表明,黄土高原丘陵沟壑区的洪峰流量比本研究区要大得多,黄土高原的洪峰流量与径流深、降雨量和最大 30 min 降雨强度显著正相关,最大 30 min 雨强与洪峰流量的相关系数最大。本研究区与 Fu 等<sup>[22]</sup>研究的黄土高原相比,洪峰流量和径流深、降雨量的关系有相似性,均呈显著正相关;同时也有

区别,在本研究区,降雨量与洪峰流量的相关性更强,而在黄土高原,最大 30 min 雨强与洪峰流量的相关性更强。这些相似点是本文将 Fu 等<sup>[22]</sup>所建立的洪峰流量模型应用于重庆地区的前提,不同点则可能引起两地区洪峰流量模型出现差异,为基于该模型建立新洪峰流量模型提供依据。

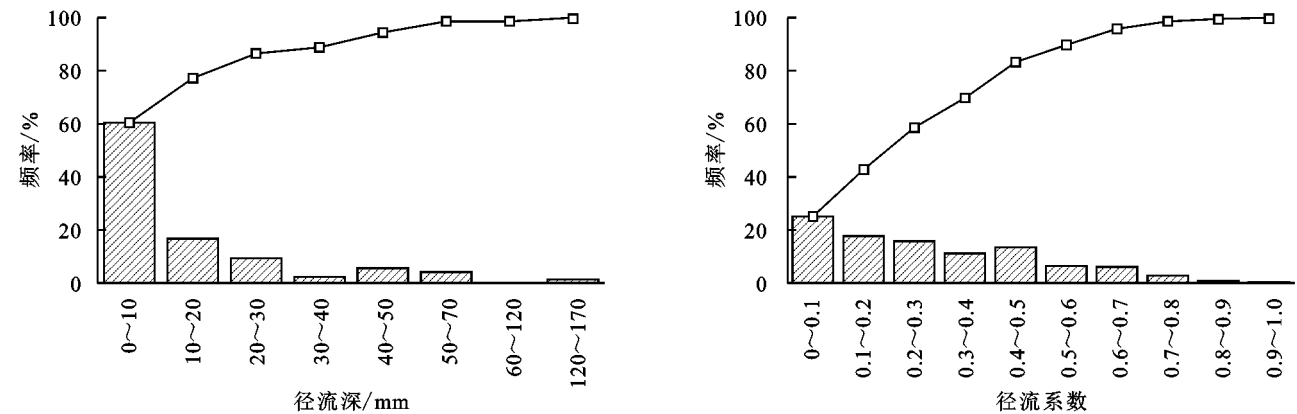


图 2 径流深、径流系数频率

Fig. 2 Runoff depth and runoff coefficient frequency

表 1 径流深、径流系数影响因素分析

Table 1 Effect factor analysis of runoff depth and runoff coefficient

相关要素	雨量	平均雨强	$I_{30}$
径流深	0.858 **	0.048	0.271 **
径流系数	0.364 **	-0.068	0.039

注:\*\*代表在 0.01 级别(双尾),相关性显著,下表同。

2.3 模型校准与验证

图 4 是根据 Fu 等<sup>[22]</sup>公式(1)预测的洪峰流量与实际洪峰流量做出的对比图,点全部分布在 1:1 比例线的上方,说明方程远远高估了洪峰流量,模型有效系数为-196.45,方程预测效果不好,因此,公式(1)不适用于重庆小流域洪峰流量的计算。但是,预测的洪峰流量与实际洪峰流量线性关系较为明显,这些结果表明,公式(1)中的变量是影响洪峰流量的重

要参数,但该等式的系数或形式不适合预测重庆地区的洪峰流量。

首先保证方程(1)中自变量径流深( $R$ )和降雨量( $P$ )的指数形式不变,对洪峰流量  $Q_p$  与  $Q' = A^{0.59} R^{1.15} A^{0.06} P^{-0.72}$  直接进行线性回归分析,结果得到  $Q' = A^{0.59} R^{1.15} A^{0.06} P^{-0.72}$  的系数为-2.27,通过显著性检验,说明因变量洪峰流量  $Q_p$  与  $Q'$  之间存在线性关系。因此得到计算洪峰流量  $Q_p$  的新方程:

$$Q_p = -2.27A^{0.59} R^{1.15} A^{0.06} P^{-0.72} + 0.997$$
$$E_f = 0.06$$

(3)

虽然变异数显示因变量洪峰流量  $Q_p$  与  $Q'$  之间存在显著的回归关系,但是模型的判定系数  $R^2$  为 0.061,说明能够被方程解释的数据部分占比较小,计算模型有效系数只有 0.06,该模型解释效果不好,需要继续优化。

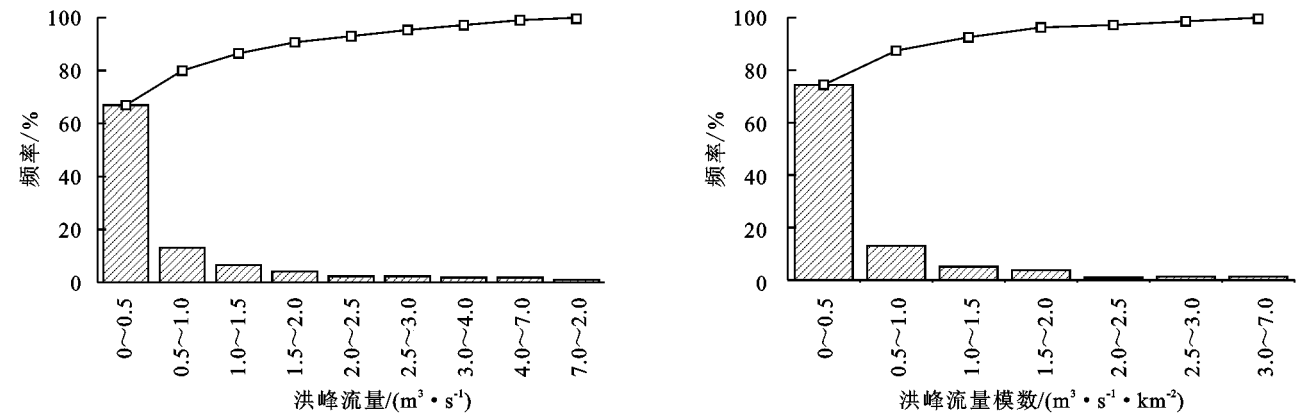


图 3 洪峰流量、洪峰流量模数频率

Fig. 3 Peak flow rates and peak flow modulus frequency

表 2 洪峰流量影响因素分析

Table 2 Effect factor analysis of peak flow rates

相关要素	雨量	平均雨强	$I_{30}$	径流深	径流系数
洪峰流量	0.684 **	0.108	0.437 **	0.783 **	0.509 **

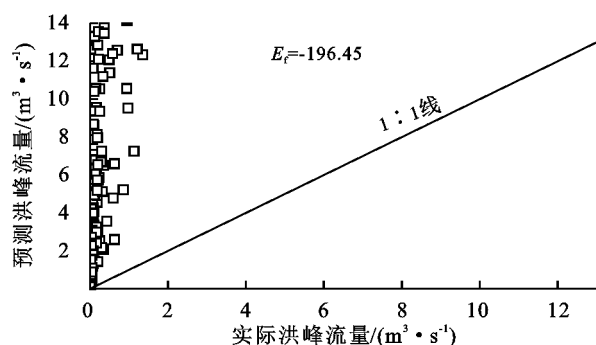


图 4 公式(1)预测洪峰流量与实际洪峰流量

Fig. 4 Measured versus predicted peak flow rates using equation (1)

直接进行线性回归效果不理想,因此保持公式(1)的形式不变,使用非线性回归法重新拟合更优的指数参数。公式左右两边同时取底数为 10 的对数,根据公式(4)进行回归分析,得到方程(5),整理得到公式(6)。回归结果表示, $A^{0.06} \cdot \lg R$  系数  $a_1$  为 0.977,  $\lg P$  的系数  $a_2$  为 0.3,系数均通过显著性检验。

$$\lg Q_p = 0.59 \lg A + a_1 A^{0.06} \lg R + a_2 \lg P + \epsilon \quad (4)$$

$$\lg Q_p = 0.59 \lg A + 0.977 A^{0.06} \lg R + 0.3 \lg P - 2.101 \quad (5)$$

$$Q_p = 0.0079 A^{0.59} R^{0.977 A^{0.06}} P^{0.300} E_t = 0.68 \quad (6)$$

变异数分析表明自变量与因变量之间存在显著的回归关系,模型判定系数  $R^2 = 0.823$ ,调整后  $R^2 = 0.821$ ,可知该模型解释效果较好。使用第一组数据模拟出的预测洪峰流量,与实际洪峰流量计算出的模型有效系数为 0.51,使用第二组数据验证模型,计算模型有效系数为 0.68,公式(6)模型有效系数相较于公式(3)有了明显提高。

在洪峰流量与其他因子的相关性分析中(表 2),洪峰流量与  $I_{30}$  显著相关, $I_{30}$  对洪峰流量影响较大,因此在模型中添加自变量  $I_{30}$ 。以洪峰流量为因变量,降雨量、径流深、 $I_{30}$  作为自变量进行非线性回归,得到新方程:

$$Q = 0.006 A^{0.59} R^{1.584} P^{-0.959} I_{30}^{1.167}$$

$$E_t = 0.85 \quad (7)$$

模型判定系数  $R^2$  为 0.847,可知该模型解释效果较好。使用第一组数据模拟出洪峰流量,计算模型有效系数较高,为 0.85。图 5 是根据结果做出的预测洪峰流量与实际洪峰流量散点图,点均匀紧凑地分布在 1:1 比例线的两侧,说明预测洪峰流量与实际洪峰流量值十分接近,方程预测洪峰流量效果较好。

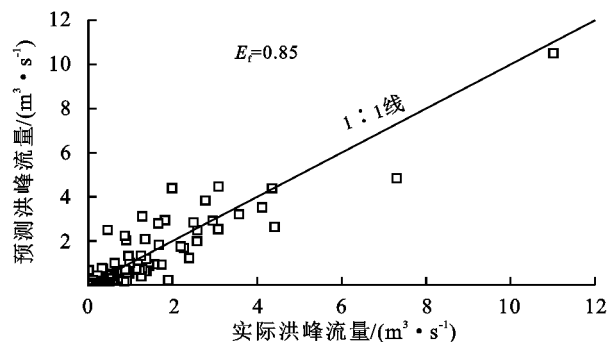


图 5 公式(7)校准数据中预测洪峰流量与实际洪峰流量对比

Fig. 5 Measured versus formula (7) predicted-peak flow rates for the developmental data set

使用第二组数据验证模型,计算模型有效系数为 0.82。图 6 是根据结果作出的预测洪峰流量与实际洪峰流量散点图,点均匀紧凑地分布在 1:1 比例线的两侧,说明预测洪峰流量与实际洪峰流量值十分接近,再次验证公式(7)预测洪峰流量效果较好。

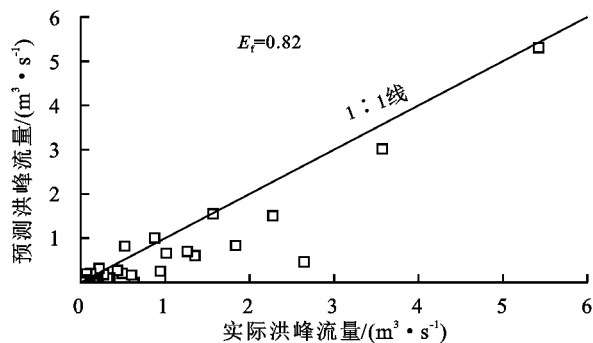


图 6 公式(7)验证数据中预测洪峰流量与实际洪峰流量对比

Fig. 6 Measured versus formula (7) predicted-peak flow rates for the independent test data set

## 2.4 模型对比

基于 Fu 等<sup>[22]</sup>公式(1)调整参数后的公式(6)相较于公式(7)自变量里没有最大 30 min 雨强因子。其中图 7 和图 8 是根据公式(6)预测的洪峰流量与实际洪峰流量做出的对比图,可以明显看出,公式(6)高估了较小的洪峰流量,低估了较高的洪峰流量;公式(6)的模型有效系数分别为 0.51, 0.68。然而,从图 5 和图 6 可以看出式(7)预测的洪峰流量均与实际洪峰流量相近,模型有效系数分别为 0.85, 0.82, 高于公式(6)的模型有效系数,公式(7)预测洪峰流量更为准确。

公式(7)与 Fu 等<sup>[22]</sup>所建公式(1)相比有两点明显的改变,一是方程系数,公式(1)方程系数为 6.69,公式(7)方程系数为 0.006;二是公式(7)比公式(1)多考虑了最大 30 分钟雨强因子,本文研究区内洪峰流量与  $I_{30}$  显著相关,在模型中加入  $I_{30}$  使模型有效系数明显提高,这说明  $I_{30}$  对于重地区的洪峰流量预测影响较大。本文研究区重庆位于中国湿润地区, Fu

等<sup>[22]</sup>的研究区黄土高原位于半干旱、半湿润地区。对比两地区的洪峰流量,黄土高原普遍比重庆的洪峰流量大,因此本文新建方程系数较小合乎常理;黄土高原沟壑纵横, $F_u$ 等<sup>[22]</sup>所研究的区域 80% 以上坡度大于  $10^\circ$ ,土壤以黄土为主,本文研究区 96% 以上坡度大于  $15^\circ$ ,以壤土为主,地形起伏均较大;在降雨特征方面,黄土高原多为短期强降雨<sup>[27-28]</sup>,而重庆地区的降雨持续时间长,雨强普遍较小;在产流特征方面,黄土高原通常为超渗产流,重庆地区多为蓄满产流,降雨量对于洪峰流量影响较大,而且重庆地区到了雨季,阴雨连绵不绝,长时间的降雨会使流域达到最大蓄水量,那么之后降雨便会几乎全部形成径流,洪峰流量也随之增大,降雨量和降雨时间对洪峰流量的形成都起到了重要作用,在方程中加入最大 30 min 雨强显著提高了模型有效系数。

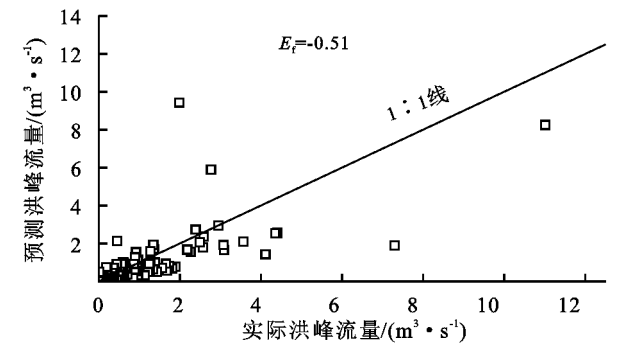


图 7 公式(6)校准数据中预测洪峰流量与实际洪峰流量对比图

Fig. 7 Measured versus Formula (6) predicted-peak flow rates for the developmental data set

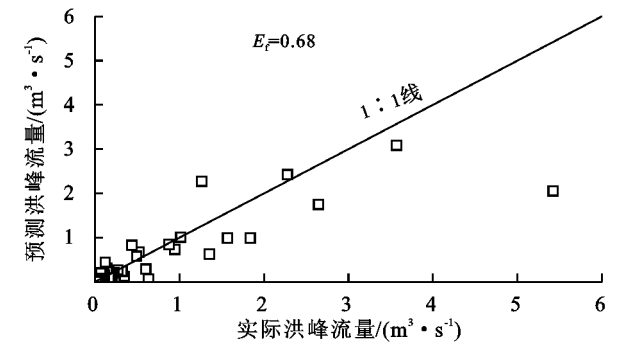


图 8 公式(6)验证数据中预测洪峰流量与实际洪峰流量对比图

Fig. 8 Measured versus formula (6) predicted-peak flow rates for the independent test data set

3 结论

本文分析了重庆万州刘家沟小流域的径流与洪峰流量特点,并与黄土高原地区做了对比。在本研究范围内,径流深和降雨量、最大 30 min 雨强均呈显著正相关,

降雨量对径流深和径流系数的影响最大。然而在黄土高原丘陵沟壑区,其降雨径流特征表现不同,最大 30 min 雨强与径流系数相关性更好,降雨量与径流系数的相关系数反而最小<sup>[27]</sup>。关于洪峰流量,本研究区的洪峰流量与降雨参数中降雨量和最大 30 min 雨强以及径流参数中径流深和径流系数有较好的相关关系,其中降雨量与洪峰流量的相关性更强。而在黄土高原区,却是最大 30 min 雨强与洪峰流量相关性更强。

本文使用重庆万州刘家沟小流域 215 次降雨事件的数据对  $F_u$  等<sup>[22]</sup>建立的洪峰流量方程进行校准,两者研究区地形特征相似,均为陡坡条件,但是降雨特征有较大差异,于是在新方程中引入最大 30 min 雨强作为新的自变量,建立了洪峰流量公式(7)。公式(7)自变量包括流域面积、降雨量、径流深和最大 30 min 雨强,该模型具有较高的模型有效系数,参数率定和模型验证的模型有效系数分别为 0.85,0.82,能够较好地预测研究流域的洪峰流量。本文建立的公式是对现有的洪峰流量公式的补充,将有助于预测湿润地区相似流域条件下的洪峰流量,为水资源保护、水土保持研究、预防和评估洪涝灾害风险等提供帮助和参考。

参考文献 (References):

[1] 侯建才,李占斌,李勉,等.流域次降雨侵蚀产沙的 BP 神经网络模拟[J].水土保持通报,2007,27(3):79-83.  
Hou J C, Li Z B, Li M, et al. Back propagation neural network simulation on sediment yield of watershed under single rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27(3):79-83.

[2] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology[J]. Transactions of the ASAE, 1977,20(6):1100-1104.

[3] 秦大河, Thomas S, 259 名作者和 TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.  
Qin D H, Thomas S, 259 Authors and TSU(Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014,10(1):1-6.

[4] Blöschl G, Hall J, Parajka J, et al. Changing climate shifts timing of European floods[J]. Science, 2017,357(6351):588-590.

[5] Ho M C L, Nathan R, Wasko C, et al. Projecting changes in flood event runoff coefficients under climate change[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128689.

[6] da Silva L D M, Avanzi J C, Peixoto D S, et al. Ecological intensification of cropping systems enhances soil

- functions, mitigates soil erosion, and promotes crop resilience to dry spells in the Brazilian Cerrado [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(4):591-604.
- [7] Wang Y P, Wang S, Wang C, et al. Runoff sensitivity increases with land use/cover change contributing to runoff decline across the middle reaches of the Yellow River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126536.
- [8] 刘元昊, 韩剑桥, 焦菊英, 等. 极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应: 以山东临朐台风“利奇马”暴雨为例 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5):20-25.
- Liu Y H, Han J Q, Jiao J Y, et al. Response of small watershed flood peak to vegetation and terraces under extreme rainstorm: A case study of the rainstorm of typhoon “Lekima” in Linqu, Shandong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 20-25.
- [9] 沈瑞昌, 张光辉, 张永萱, 等. 黄土高原小流域次暴雨洪峰流量影响因素分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2):24-30.
- Shen R C, Zhang G H, Zhang Y X, et al. Factors affecting storm peak flow in small watersheds in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2):24-30.
- [10] Naseri F, Azari M, Dastorani M T. Spatial optimization of soil and water conservation practices using coupled SWAT model and evolutionary algorithm [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(4):566-577.
- [11] Li W J, Lin K R, Zhao T T G, et al. Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572:108-120.
- [12] 蔡剑波, 林宁, 谢振安, 等. 洪峰流量与雨水流量常用计算方法的对比选用 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(18): 25-28.
- Cai J B, Lin N, Xie Z A, et al. Comparative analysis of commonly used methods of flood peak flow and stormwater flow [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(18):25-28.
- [13] 余新晓, 张学霞, 李建牢, 等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(1):1-8.
- Yu X X, Zhang X X, Li J L, et al. Effects of vegetation cover and precipitation on the process of sediment produced by erosion in a small drainage basin of loess region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1):1-8.
- [14] 岳华, 刘发明, 颜真梅. 用暴雨资料推求中小河流洪峰流量的方法研究 [J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2012, 44(4):39-44.
- Yue H, Liu F M, Yan Z M. Approaches to estimate peak-discharges by rainfall in small to medium scale river basins [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, 44(4):39-44.
- [15] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 武陵山区女儿寨小流域次降雨径流与产沙特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 33-38.
- Zhou J, Zhang X D, He D, et al. Characteristics of runoff and sediment yield for rainfall events in Nv-rzhai small watershed of Wuling Mountain area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 33-38.
- [16] 钟莉娜, 王军, 赵文武. 多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *地理学报*, 2017, 72(3):432-443.
- Zhong L N, Wang J, Zhao W W. Comparative analysis of the effect of rainfall pattern and land use pattern on soil erosion in different-scale watersheds: A case study in hilly and gully area of the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(3):432-443.
- [17] 胡健, 胡金娇, 吕一河. 基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(16):6417-6429.
- Hu J, Hu J J, Lü Y H. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(16):6417-6429.
- [18] 张真真, 单延功, 郭红丽, 等. 降雨特征对低山丘陵区典型小流域水土流失的影响 [J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4):32-38.
- Zhang Z Z, Shan Y G, Guo H L, et al. Effects of rainfall characteristics on soil and water loss of small watershed in low mountains and hills area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4):32-38.
- [19] Chow V T. Handbook of applied hydrology [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1965, 10(1):82-83.
- [20] O'Connell P. On the relation of the freshwater floods of rivers to the areas and physical features of their basins and on a method of classifying rivers and streams with reference to the magnitude of their floods [J]. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1868, 27:204-217.



- [19] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440-451.
- [20] 张瑶瑶, 崔霞, 宋清洁, 等. 基于不同下垫面的农业干旱遥感监测方法与发展前景[J]. *草业科学*, 2017, 34(12): 2416-2427.  
Zhang Y Y, Cui X, Song Q J, et al. The agricultural drought remote sensing monitoring methods and prospects based on different underlying surface conditions [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(12): 2416-2427.
- [21] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1205-1216.  
Yang X, Wu J J, Yan F, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [22] 陈明星, 张玉虎. 基于4种植被指数TVDI模型的三江平原土壤湿度反演[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 93-100, 107.  
Chen M X, Zhang Y H. Retrieval of soil moisture in Sanjiang plain based on TVDI model with four vegetation indices[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 93-100, 107.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T32136—2015 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Grade of Agricultural Drought GB/T32136—2015* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [24] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [25] 齐述华, 李贵才, 王长耀, 等. 利用MODIS数据产品进行全国干旱监测的研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 56-61.  
Qi S H, Li G C, Wang C Y, et al. Study on monitoring drought in China with MODIS product [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 56-61.
- [26] 张顺谦, 卿清涛, 侯美享, 等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 141-146.  
Zhang S Q, Qing Q T, Hou M T, et al. Remote sensing and impact estimation for Sichuan hot-drought based on temperature vegetation dryness index [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 141-146.



(上接第148页)

- [21] 蔡冠雄, 吴燕, 陈异植, 等. 福建省中小流域洪峰流量经验公式的初步探讨[J]. *福州大学学报*, 1984(1): 69-76, 128.  
Cai G X, Wu Y, Chen Y Z, et al. Establishing an empirical formula of flood flow for the middle or small basins in Fujian Province[J]. *Journal of Fuzhou University*, 1984(1): 69-76, 128.
- [22] Fu S H, Wei X, Zhang G H. Estimation of peak flows from small watersheds on the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(21): 4233-4238.
- [23] Liu B Y, Wang D A, Fu S H, et al. Estimation of peak flow rates for small drainage areas [J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(5): 1635-1647.
- [24] Shi W H, Wang M M, Li D H, et al. An improved method that incorporates the estimated runoff for peak discharge prediction on the Chinese Loess Plateau [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(2): 290-300.
- [25] 石炜, 徐永波, 陈娟, 等. 华东地区小流域设计洪水计算方法探讨[J]. *水利规划与设计*, 2015(12): 29-31.
- Shi W, Xu Y B, Chen J, et al. Discussion on design flood calculation method of small watershed in East China [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2015(12): 29-31.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [27] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及其影响因素研究[J]. *地理研究*, 2009, 28(3): 583-591.  
Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 583-591.
- [28] 蔡强国, 刘纪根, 刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. *地理研究*, 2004, 23(4): 433-439.  
Cai Q G, Liu J G, Liu Q J. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(4): 433-439.