

# 基于雨型分类的山洪小流域洪水预报研究

蔡亦婷<sup>1</sup>, 覃光华<sup>1,2\*</sup>, 黎小东<sup>1</sup>, 余媛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>四川大学水利水电学院, 四川 成都

<sup>2</sup>四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2026年2月26日

## 摘要

洪水的形成受到多重因素共同作用, 其中降雨作为主要驱动因子, 其时间分布特征对洪水过程具有重要影响。对降雨进行雨型分类, 并针对不同雨型进行差异化的预报, 是提高水文模型预测精度的一种可行且有效的技术路径。本文以四川省山洪小流域清溪河为研究对象, 引入无量纲曲线刻画降雨事件的时间分布, 基于聚类分析对流域的不同降雨类型进行辨识, 并进一步研究了降雨的时间分布特征对洪水响应及水文模型模拟能力的影响。结果表明, 清溪河流域的主要降雨类型有三种, 其中时程分布相对均匀的雨型最为常见。不同雨型在洪水响应方面表现出显著差异: 降雨集中且峰值出现较早的雨型更易诱发单峰洪水, 而分布均匀的雨型则倾向于形成多峰洪水。基于新安江模型对三类雨型对应的洪水过程进行模拟, 所得平均纳什效率系数分别为0.75、0.77和0.81, 表明模型对降雨过程均匀的雨型模拟效果最佳, 而对短时强降雨类型的模拟精度相对较低。本研究揭示了流域降雨时间分布对洪水形成的影响规律, 可为山洪小流域的洪水预报提供技术参考。

## 关键词

山洪小流域, 降雨雨型, 时间分布特征, 洪水预报, 新安江模型

# Research on Flood Forecasting in Small Mountainous Watersheds Based on Rainfall Patterns

Yiting Cai<sup>1</sup>, Guanghua Qin<sup>1,2\*</sup>, Xiaodong Li<sup>1</sup>, Yuan Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: October 28, 2025; accepted: November 11, 2025; published: February 26, 2026

作者简介: 蔡亦婷(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文变化规律及其应用, Email: cyting00@163.com

\*通讯作者 Email: ghqin2000@163.com

文章引用: 蔡亦婷, 覃光华, 黎小东, 余媛. 基于雨型分类的山洪小流域洪水预报研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(1): 1-11.

DOI: 10.12677/jwrr.2026.151001

## Abstract

The formation of floods is influenced by multiple factors, among which rainfall events, as the primary driving force, play a decisive role, with their temporal distribution being a particularly critical factor. Classifying rainfall into different patterns and adopting differentiated forecasting strategies is a feasible and effective approach to improving the accuracy of hydrological model predictions. This study took the Qingxi River Basin, a small mountainous watershed in Sichuan Province, as the research area. Dimensionless mass curves were introduced to characterize the temporal distribution of rainfall events, and cluster analysis was employed to identify different rainfall types within the basin. Furthermore, the impacts of rainfall temporal distribution on flood response and hydrological model performance were investigated. The results indicate that three main rainfall types are identified in the Qingxi River Basin, among which the relatively uniform temporal distribution is the most common. Significant differences are observed in flood responses under different rainfall types: rainfall with concentrated distribution and earlier peak occurrence tends to generate single-peak floods, while uniformly distributed rainfall is more likely to result in multi-peak floods. Flood simulations of the three rainfall types using the Xin'anjiang Model yield average Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of 0.75, 0.77, and 0.81, respectively, suggesting that simulations perform best for uniformly distributed rainfall, but less accurately for short-duration and high-intensity rainfall events. This study reveals the crucial role of the temporal distribution of rainfall in shaping flood processes and provides valuable technical references for flood forecasting in small mountainous watersheds.

## Keywords

Small Mountainous Watershed, Rainfall Pattern, Temporal Distribution Characteristics, Flood Forecasting, Xin'anjiang Model

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

洪水是全球范围内最常见、破坏性最广的自然灾害之一。在我国各类水灾害中，山洪灾害影响范围广、致灾风险高，是最具威胁的类型之一。我国大部分地区处于季风气候区，山丘区面积约占国土面积的三分之二，地理与气候条件的叠加使得山洪灾害频发。2022年，全国洪涝灾害共造成3385.26万人受灾，171人死亡或失踪，其中因山洪导致的死亡失踪人数达119人，占比高达69.6% [1]。

山洪小流域一般是指山区集水面积不大于300 km<sup>2</sup>的小流域。该类流域地形陡峭，汇流时间短，洪水形成迅速、突发性强，常伴随滑坡、泥石流等次生灾害。降雨作为山洪形成的关键因子，其时空分布特征直接影响洪水的响应过程。由于降雨过程具有较强不确定性，其对流域产汇流机制的影响十分复杂，因而受到国内外学者的持续关注。国外在雨型构建与应用方面的研究起步较早，积累了较为丰富的成果，如芝加哥雨型[2]、Huff雨型[3]和不对称三角雨型[4]等。近年来，学者们进一步将雨型分析拓展至洪水响应研究，Li Jiake [5]基于SWMM模型，利用多种雨型模拟洪水过程，揭示了不同雨型下暴雨径流响应的差异规律；Gaopeng Tang [6]提出不应局限于若干简化的典型雨型，引入了考虑降雨历和平均降雨强度的随机降雨模式；Henning Oppel [7]通过无监督聚类方法识别典型降雨时间分布类型，并解释了其与不同洪水类型之间的对应关系。国内学者也开展了相关研究：毛北平[8]发现不同降雨模式会对预警指标造成显著影响；沈天元等[9]构建降雨时程分布不均匀系数模型，

揭示了降雨时间分布特征对临界雨量的影响，表明在山洪预警中应根据实际雨型动态修正预警指标；高长松等[10]分析了不同雨峰系数下暴雨雨型变化对城市内涝过程的影响，揭示了雨峰分布特征对积水演变规律等的关键作用。近年来，关于降雨时空分布特征对水文模型模拟性能的影响也逐渐受到关注。梁峰铭等[11]在下孤山流域的对比研究中，利用新安江模型与 SCS-CN 模型进行分析，探讨了降雨时空变化对水文模型模拟能力的影响，结果表明降雨时空分布与模型响应存在强相关性；霍雨等[12]基于 EasyDHM 模型分析了不同雨型条件下的洪水响应。这说明水文模型的模拟性能不仅受模型结构及参数影响，更与降雨的时间分布与空间格局密切相关。

尽管近年来针对降雨特征及其水文响应规律的研究不断深入，但对雨型与洪水类型之间系统关联的探讨仍显不足，水文模型在不同雨型条件下模拟性能差异的形成机理也有待深入解析。系统研究不同雨型下洪水类型及模型模拟性能的差异，对揭示小流域产汇流机制、提高山洪预报精度具有重要意义。针对上述问题，本文选取四川省典型山洪小流域——清溪河作为研究区，系统分析该区域降雨雨型特征，揭示不同雨型与洪水类型之间的响应规律，评估水文模型对各类雨型的模拟性能，并从机理层面解释模型表现的差异，以期为山区小流域的洪水预报实践提供技术支撑。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 研究区概况

清溪河位于四川省达州市宣汉县境内，是嘉陵江流域渠江的三级支流，河长 44 km，全流域面积 286 km<sup>2</sup>，其中清溪水文站控制集水面积 256 km<sup>2</sup>。清溪河流域共有 3 个雨量站，1 个水文站，分布情况见图 1。清溪河流域的 3 个雨量站中，峰城站降雨数据的时间分辨率为 6 h，其余站点均为 1 h，直接使用峰城站数据可能导致降雨过程特征的细节失真，影响数据的一致性与可靠性，因此未将该站数据纳入分析。本研究基于清溪河流域两个雨量站与一个水文站在 1998~2017 年间摘录的降雨及洪水流量数据进行研究。

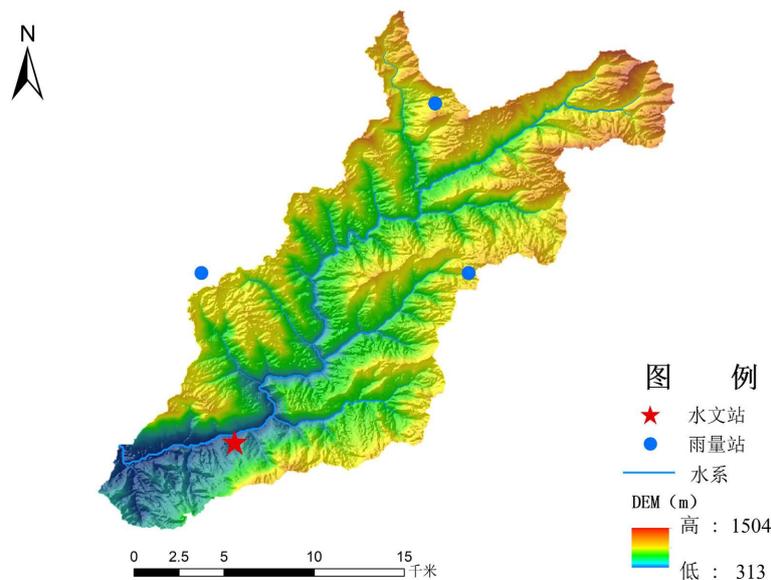


图 1. 清溪河流域图

### 2.2. 降雨与洪水资料

依据面平均降雨无雨间隔时间作为判定原则，本研究设定 6 小时为阈值。当连续无降雨时段超过该阈值时，认为前后降雨属于不同事件；若不足 6 小时，则视为同一事件[13]。最终统计得到 127 场有效降雨事件。同时对场

次降雨对应的场次洪水流量过程进行提取,通过识别洪峰流量、起涨流量和退水流量界定事件的起始与终止时段。

### 2.3. 研究方法

雨型是指在一个连续的降雨事件中,降雨随时间变化的分布规律,描述了一次降雨从开始、发展到结束的全过程。在本研究中,为了统一分析不同降雨事件的时程分布特征,采用无量纲化方法对降雨总量以及降雨历时做归一化处理,这种处理方式能够有效消除降雨量级和历时差异对雨型形态识别的干扰,突出降雨过程内部的时序分布特征,以实现降雨过程的可比性。

从降雨数据中提取降雨事件时间分布的常见方法是由 Huff [4]提出的无量纲累积曲线法。降雨数据通常是等时间间隔的降雨总量,对每个降雨事件,设持续时间为  $Dur$ , 对应时间  $T_i = 0, 1, \dots, Dur$ , 降雨量  $P_i = P_0, P_1, \dots, P_{Dur}$ , 针对每场降雨,对时间和累积降雨量两个指标进行以下归一化处理:

$$T_{Norm} = \frac{T_i}{Dur} \tag{1}$$

$$P_{Norm} = \frac{\sum_{k=0}^i P_k}{\sum_{k=0}^{Dur} P_k} \tag{2}$$

$T_{Norm}$  与  $P_{Norm}$  的取值范围均为[0, 1], 并均在区间内单调递增。为减少聚类分析时的特征空间维度,需要定义若干个采样点[7], 采样点在[0, 1]之间均匀分布,通过插值得到若干个相应的累积降雨百分率,处理过程如图 2 所示。

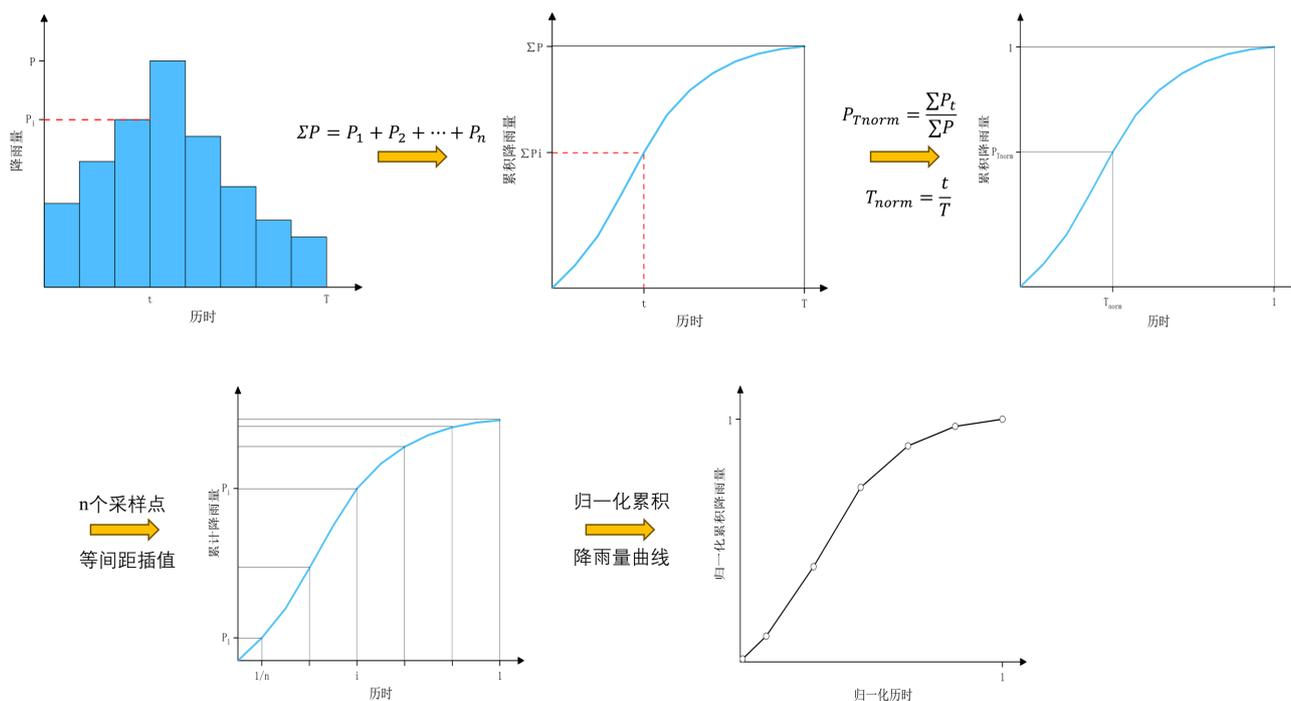


图 2. 降雨事件归一化处理示意图

采样点的数量对于雨型的表达十分重要。随着采样点数量的增加,时间分布的精度也提高,但聚类分析的维度也会增加,复杂度提高;采样点数量减少则会使得雨型的表达更为概化,削弱异常数据的干扰,增加雨型的泛化能力,同时简化的雨型也更容易被直观理解和比较。除此之外,采样点的数量也限制了可用于分析的降雨事件需要达到的最小时长。因为从少于采样点数量的数据中提取更多采样点,就会人为地引入误差,可能对聚类分析的结果造成偏差,因此所有降雨数据少于选择采样点数量的事件都要从研究中剔除。

综合考虑采样点数量对降雨事件持续时间的要求及其对特征表达能力的影响，通过采用不同采样点导致降雨事件样本数量变化以及时间分布精度两方面影响的对比分析，最终选取 10 个采样点作为最优方案，以在尽可能提高时间分布精度的同时，最大程度保留原始降雨样本。清溪河流域提取的降雨事件如图 3 所示。

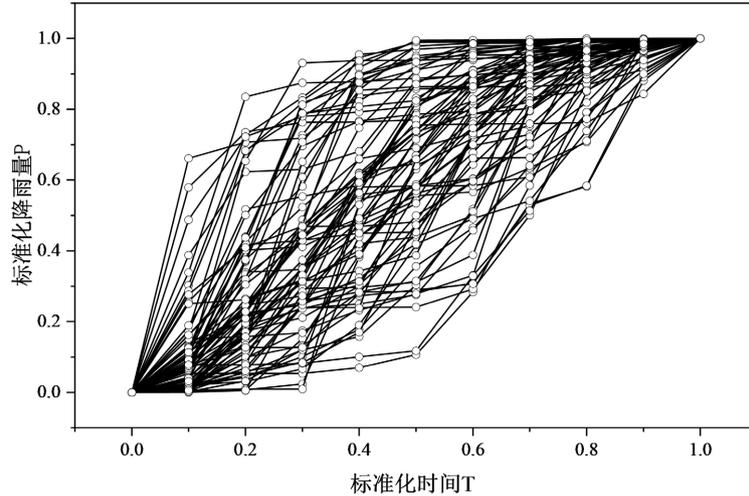


图 3. 清溪河流域降雨事件时间分布

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 降雨雨型分类结果

##### 3.1.1. 降雨事件统计与聚类模型建立

基于确定的降雨事件划分方法，在清溪河流域共提取出 127 场降雨数据，排除其中小于 10 个时间段的数据，剩余 121 场降雨数据。

本文选定不同的聚类数  $K$  进行试验，并通过轮廓系数对聚类效果进行评估，轮廓系数越接近于 1，聚类效果越好。不同聚类数的轮廓系数如图 4 所示。

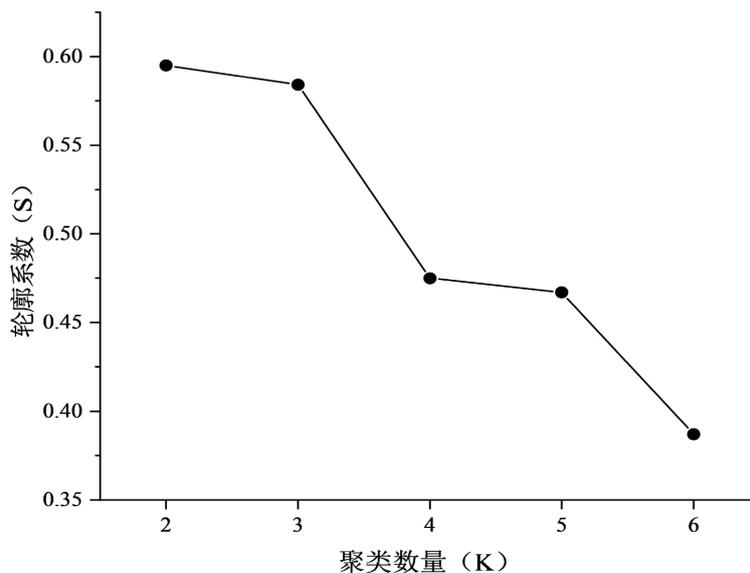


图 4. 清溪河流域轮廓系数折线图

结果表明,当  $K=2$  时轮廓系数达到最大值,为 0.595,略高于  $K=3$  时的 0.584,但由于二者差异仅为 0.011,可能由于数据本身的轻微分布差异引起,轮廓系数变化不足以构成显著判别依据。在此基础上,进一步比较了不同聚类数下的雨型特征,结果表示当  $K$  取 3 时,相对  $K$  取 2 所得到的前锋型和后峰型两类雨型,新增了一类时程分布更为均匀、雨锋相对居中的雨型,从而能够更全面地刻画不同类型降雨事件在时间分布上的差异。因此,综合轮廓系数指标与降雨事件分类的实际意义,最终选择  $K=3$  作为本研究的聚类数。

### 3.1.2. 雨型分类结果及特征对比

基于获取的降雨事件数据,取聚类数为 3,利用 K-means++ 进行类型划分,得到三种雨型,各个雨型出现的次数和占比见图 5。其中第 I 型降雨雨锋靠后,第 II 型降雨雨锋靠前,分别占降雨场次总数的 22.3% 和 28.1%;第 III 型降雨相对均匀,雨锋相对居中,为清溪河流域的主要雨型,占降雨场次总数的 49.6%。

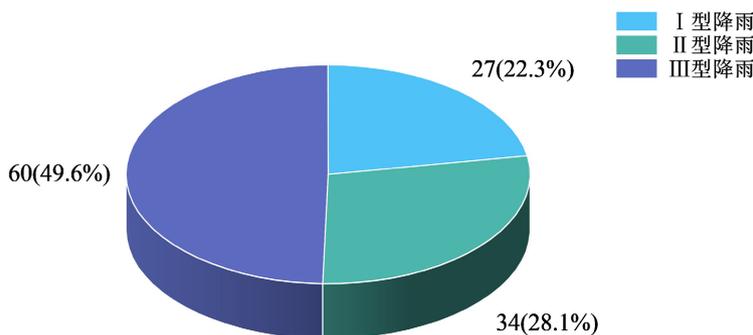


图 5. 不同雨型降雨事件占比统计图

清溪河流域的降雨类型以单峰型降雨为主,三种不同雨型的时间分布示意图如图 6 所示:

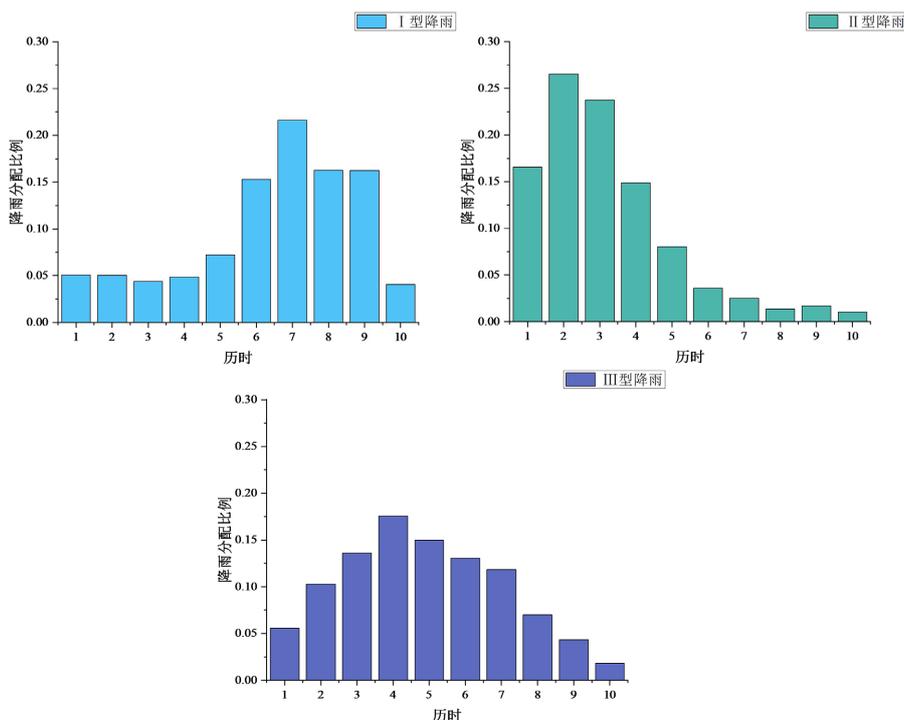


图 6. 清溪河流域特征雨型时间分布图

归类为第 I 类的降雨事件具有明显后期降雨高峰，其启动阶段大约占事件持续时间的 50%，此阶段仅产生约 26.5% 的总降雨量；随后降雨强度上升，并在接下来的持续时间内(约持续至事件 90% 时)保持稳定。事件尾部降雨强度的下降，是由于本研究采用的事件划分方法造成的。在划分事件时，本次研究提取的是从事件开始直到无降雨时间达到 6h 为止的整个降雨过程，而不是仅提取导致洪峰的那一部分降雨。因此，主峰之后的小量降雨仍被包含在事件记录中，形成了“尾部”特征。对于理解持续时间长的洪水事件，主峰之后的降雨量尤为重要，能够全面地反映降雨过程特征，避免了仅关注洪水诱发段所导致的偏差，因此这种划分方式具有实际意义。

第 II 类的降雨事件则包含那些在开始阶段具有明显的强度突增的事件。在事件持续时间的前 40% 内，降下了降雨总量的 80%。在持续时间达到 50% 之后，降雨强度迅速下降。

第 III 类降雨事件的特点是降雨分布将为均匀，有一个约占持续时间 10% 的缓启动阶段，并在 20%~70% 的时间内保持近似恒定的降雨强度，这一阶段产生了事件降雨总量的 81.3%。

## 3.2. 降雨类型与洪水的相应关系

### 3.2.1. 洪水类型判别结果

本研究中对洪水类型的分类与降雨事件的分类思路类似，考虑洪水流量的时间分布特征而将其分为单峰型洪水和多峰型洪水。当洪水过程线中出现两个及以上独立洪峰，相邻洪峰间存在明显流量回落，且峰值间隔时间大于 1 小时，则判定为多峰洪水；若仅存在一个主要洪峰或波动不足以形成独立峰值，则判为单峰洪水。不同类型的洪水过程线如图 7 所示。单峰与多峰洪水在 121 场洪水中数量大致相当：单峰洪水有 66 场，占总场次的 54.5%，多峰洪水数量为 55 场，占总场次的 45.5%。

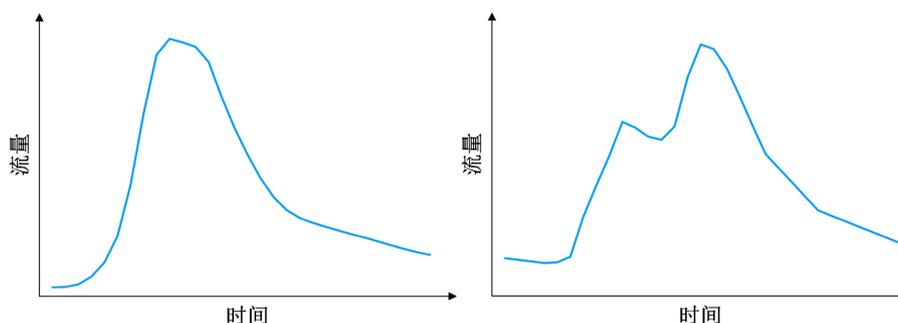


图 7. 单峰、多峰洪水示意图

### 3.2.2. 不同雨型与洪水类型的对应关系

降雨作为洪水形成的主要驱动因素，其时程空间特性直接影响着洪水过程。因此，不同类型的雨型应当会对洪水过程造成影响。经过聚类分析得到的雨型在形状和时间演变过程上便显出明显的差异，可以预期，单峰洪水可能主要由降雨初期强度较大的事件引发，而长历时多峰型洪水则可能由过程中保持中等强度的降雨引发。

为了验证这些假设的合理性，对不同洪水类型对应的时间分布聚类进行分析，结果见图 8。

总体来看，单峰洪水通常由在时间初期就出现降雨峰值的降雨事件导致，清溪河流域雨锋靠前的第 II 类降雨中，有高达 91.2% 的降雨事件都造成了单峰洪水，占单峰洪水总量的 45.5%，前期强度较大的降雨迅速产生集中径流，而后续较弱的降雨强度在大部分情况下难以再形成新的明显峰值，因此容易形成单峰型洪水特征；随着雨锋的后移，降雨强度的峰值趋于在事件中段出现，雨量随时程分配相对均匀，为清溪河流域的主要雨型，此时多峰洪水的数量显著增加，III 型降雨造成了清溪河流域 70.9% 的多峰洪水，原因可能为流域接收到相对持续的降雨补给时，产流和汇流过程存在时间和空间上的差异，因此阶段性的产汇流过程可能在出口形成多个相对独立的洪峰；I 型降雨雨锋靠后，其形成的多峰与单峰洪水数量大致相当，推测可能与前期土壤含水量以及雨锋

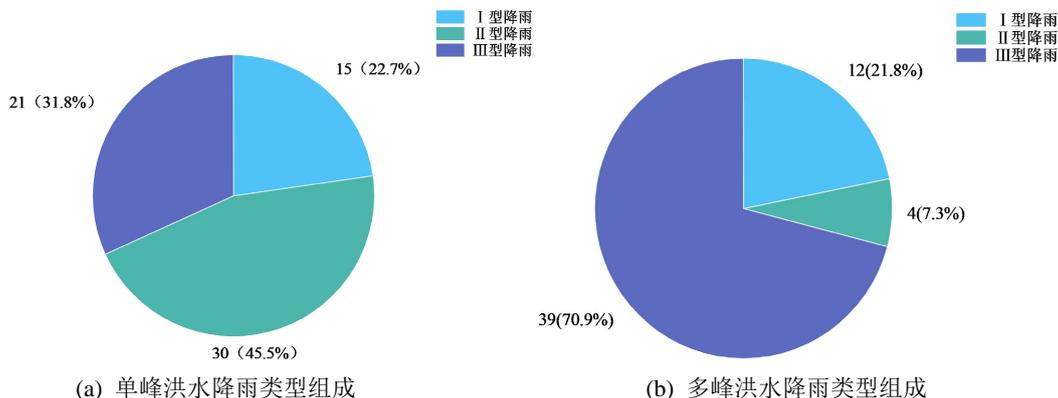


图 8. 不同洪水的降雨类型组成

前的前置降雨量有关：一方面，若前期土壤含水量较低，产流过程可能主要集中于主雨峰，从而更易形成单峰洪水；另一方面，前期含水量较高或存在明显的前置降雨可能加快了流域的响应，从而在降雨过程中更容易出现多个洪峰。

### 3.3. 洪水预报

#### 3.3.1. 长序列日径流模拟

通过对于清溪河流域进行长序列的径流模拟，可以直接率定出流域平均张水容量、不透水面积占全流域面积的比例等相关参数，为场次洪水的预报做铺垫。以日为尺度进行径流模拟，对径流资料划分了预热期(1998~1999年)、率定期(2000~2010年)和检验期(2011~2017年)。

利用遗传算法，以NSE为指标对参数进行率定，结果见图9。率定期径流NSE为0.75，检验期为0.64，模型拟合情况良好。

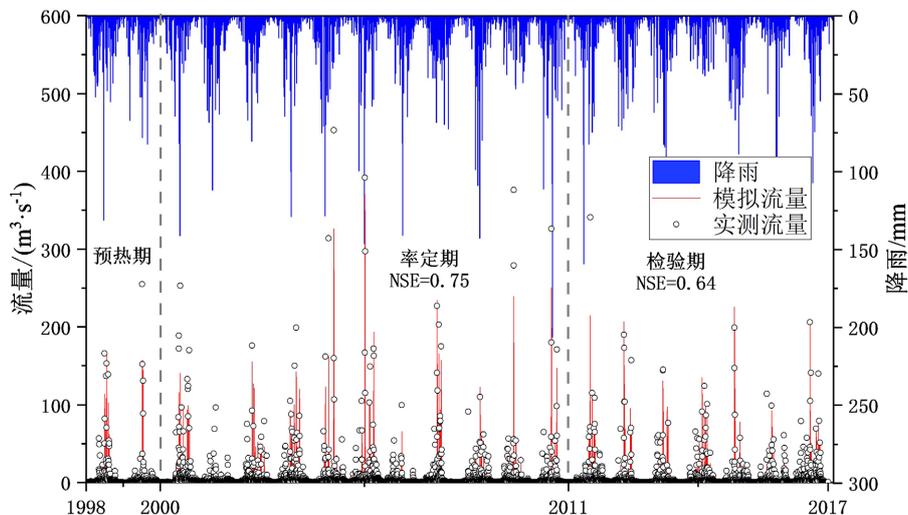


图 9. 基于新安江模型的日模型径流模拟结果

#### 3.3.2. 不同雨型场次洪水预报

利用 GA 遗传算法对新安江模型相关参数进行率定，并以纳什效率系数评估洪水过程模拟效果。在选择模拟的场次洪水时，由于部分洪水场次流量资料存在缺失或者不足的情况，无法体现出洪水过程特征，因此排除

这部分洪水场次不进行模拟计算。I、II、III型降雨对应洪水中可用的资料分别为 18 场、23 场、32 场。

对不同雨型的洪水事件分别进行洪水预报研究，不同类型的模拟结果见表 1。模型对不同类型降雨造成的洪水模拟精度较高，模型能够较好地模拟出洪水的行为特征，部分模拟结果见图 10~12。

### 3.3.3. 模型误差机理探讨

根据模拟结果可知，整体的模拟效果较好，但模拟结果整体存在洪峰流量偏小、峰现时间靠后的问题。对不同雨型的模拟效果进行对比分析，对III型降雨形成的洪水过程模拟的纳什效率系数较高，洪峰流量相对误差

表 1. 新安江模型场次洪水预报结果

降雨类型	样本	NSE	洪峰相对误差	峰现时间误差/h
I型降雨	率定	0.78	-14.3%	1.07
	验证	0.67	-22.7%	0.6
II型降雨	率定	0.78	-9.2%	0.33
	验证	0.75	-14.4%	-1.2
III型降雨	率定	0.81	-3.5%	0.64
	验证	0.82	-8.1%	-0.57

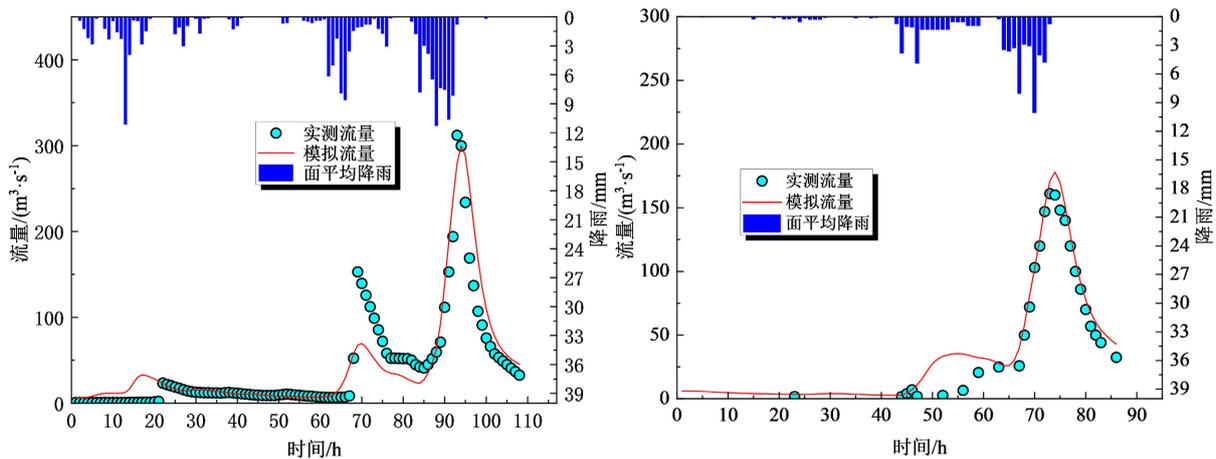


图 10. I 型降雨洪水预报结果

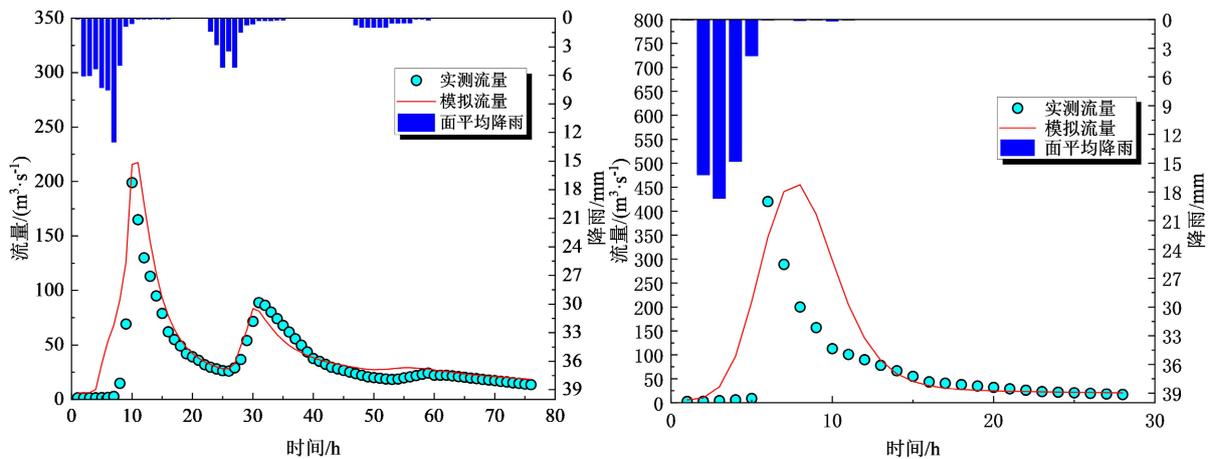


图 11. II 型降雨洪水预报结果

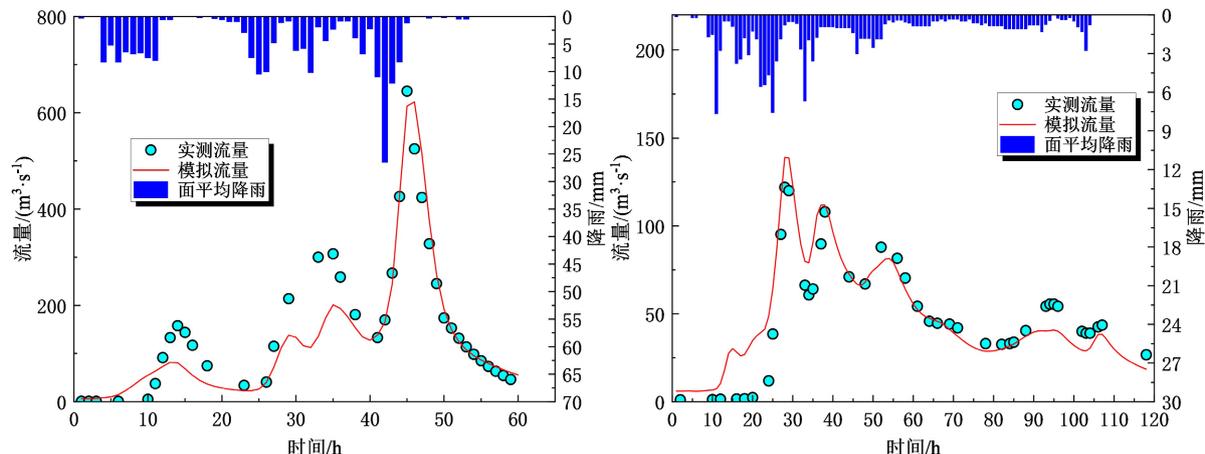


图 12. III 降雨洪水预报结果

较小，能够较好地捕捉洪水过程特征，模拟结果最佳，而对I型和II型降雨形成的洪水模拟效果则相对较差，原因可能为以下几点：

山区小流域源短坡陡，洪水过程往往更具有汇流迅速、陡涨陡落等特征。山区小流域产流过程中，尤其是在对于短时间内有高强度降雨的事件中可能存在超渗产流，而本次研究采用蓄满产流，可能导致存在洪峰低估以及峰现时间靠后的问题，I型与II型这两种降雨相对集中的雨型，此问题相对突出；除此之外，经线性水库调蓄后，也会导致过程线偏平缓，在超渗产流的情况下会削弱洪峰[14]。资料方面，暴雨常呈现强局地性，面平均降雨可能掩盖局部极端降雨，使模型输入本身就低估了洪峰条件[15]。

#### 4. 结论

本研究通过对清溪河流域降雨数据的标准化，采用无量纲曲线刻画降雨事件的时间分布，利用 K-means++ 聚类对清溪河流域的雨型进行辨识，对不同雨型与洪水类型的相应关系进行了分析，同时分别对不同雨型造成的场次洪水利用遗传算法和新安江模型进行模拟，得到的主要结论如下：

- 1) 清溪河流域的降雨类型以单峰型降雨为主，通过聚类分析将其分成三类：I型雨锋靠后，II型雨锋靠前，III型降雨雨锋则相对居中，降雨在整个时程中分布相对均匀，是清溪河流域的主要降雨类型。
- 2) 通过对于雨型和洪水特征进行对应分析，得到清溪河流域的多峰型洪水大部分由降雨分布较为均匀的III型降雨造成，而雨锋靠前的II型降雨中有 91.2%都造成了单峰洪水，占单峰洪水总量的 45.5%。
- 3) 对不同雨型降雨造成的场次洪水利用新安江模型进行模拟。其中，对于III型降雨进行的洪水过程模拟效果最佳，能够较好地模拟出洪水的过程特征。
- 4) 虽然降雨的时程分布在很大程度上决定了洪水特征，但洪水的形成受多种因素的共同作用，例如土壤前期含水量会直接决定降雨转化为径流的效率等，除此之外，地形地貌、土地利用类型、植被覆盖度等下垫面因素。因此不同流域雨型和洪水类型的对应关系也存在差异，还需进一步研究。

#### 基金项目

国家自然科学基金(52479021)、四川省科技计划资助(2025YFNH0007)、四川省科技计划资助(2025YFNH0009)。

#### 参考文献

[1] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部水文局. 中国水旱灾害公报 2022 [M]. 北京: 中国水利水电出版社,

2022.

- [2] KEIFER, G. J., CHU, H. H. Synthetic storm pattern for drainage design. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 1957, 83(4): 1-25. <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0000104>
- [3] HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resource Research*, 1967, 3(4): 1007-1010. <https://doi.org/10.1029/wr003i004p01007>
- [4] YEN, B. C., CHOW, V. T. Design hyetographs for small drainage structures. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 1980, 106(6): 1055-1076. <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0005442>
- [5] LI, J., DENG, C., LI, H., et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region. *Water Resources Management*, 2018, 32: 3271-3284. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1990-9>
- [6] TANG, G. P., HUANG, J. S. and SHENG, D. C. Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns. *Engineering Geology*, 2018, 245(1): 322-332. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.013>
- [7] OPPEL, H., FISCHER, S. A new unsupervised learning method to assess clusters of temporal distribution of rainfall and their coherence with flood types. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): e2019WR026511. <https://doi.org/10.1029/2019wr026511>
- [8] 毛北平, 张玉洁, 刘四海. 降雨时程分布对山洪灾害预警影响初步研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(24): 11-14.
- [9] 沈天元, 马细霞, 张李川, 等. 基于不同雨型的裴河小流域山洪灾害临界雨量分析[J]. *水文*, 2018, 38(6): 37-41.
- [10] 高长松, 肖洋, 许栋, 等. 暴雨雨型对城市排水管网和地表洪涝过程的联合影响[J]. *水资源保护*, 2025, 41(4): 60-70.
- [11] 梁峰铭, 谭超, 黄锋华, 等. 基于 K-means 聚类的降雨时空特征提取对水文模型预测结果的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2026, 57(1): 192-204.
- [12] 霍雨, 廖卫红, 刘岩, 等. 暴雨移植在密云水库洪水预报调度中的应用研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2025, 23(6): 669-678+688.
- [13] 付晓娣, 阚光远, 刘荣华, 等. 基于机器学习的雨型分类研究: 以渭河流域为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(2): 101-111.
- [14] 李致家, 黄鹏年, 姚成, 等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 28-35.
- [15] HUANG, Y., BÁRDOSSY, A. and ZHANG, K. Sensitivity of hydrological models to temporal and spatial resolutions of rainfall data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(6): 2647-2663. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2647-2019>