

左斌斌, 谭超, 程涛, 等. 基于模糊聚类软划分法的广东省典型流域设计雨型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 108-117. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.008

ZUO Binbin, TAN Chao, CHENG Tao, et al. Research on design rainfall patterns of typical river basins in Guangdong Province based on fuzzy clustering soft partition method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 108-117. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.008

# 基于模糊聚类软划分法的广东省典型流域设计雨型研究

左斌斌<sup>1,2,3</sup>, 谭超<sup>1,2,3</sup>, 程涛<sup>1,2,3</sup>, 钟伟强<sup>1,2,3</sup>, 刘志敏<sup>1,2,3</sup>, 李泽君<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 3. 广东省河口水利工程实验室, 广东 广州 510635)

**摘要:**【目的】设计雨型作为无资料地区计算设计洪水的重要组成部分之一, 对设计洪水的洪峰流量和时程分配具有显著影响。随着气候变化的影响, 原有的雨型可能发生变化, 需要通过延长水文序列, 来进一步研究雨型的变化情况。【方法】采用 Mann-Kendall 趋势检验法和模糊聚类软划分法, 选取广东省内的4个典型流域, 涉及12个雨量站点的年最大24 h和72 h的降雨过程作为研究对象。基于指标体系构建模糊等价矩阵, 运用模糊聚类法计算得出不同历时下的设计雨型。【结果】结果表明: 年最大24 h和72 h的降雨量在洞冠水流域呈现出增加的趋势, 白芒站年最大24 h降雨量变化速率最大, 为0.96 mm/a; 而在榕江北河流域则呈现出减少的趋势, 富口站年最大72 h降雨量变化速率为-1.25 mm/a。同时, 各典型流域的设计雨型均呈现出复合型雨峰的特点, 且主雨峰在总降雨量中的占比没有明显差异, 主要不同体现在降雨的时程分配上。【结论】与《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中的设计雨型相比, 主雨峰的控制时段发生了改变。研究结果不仅可为典型流域的设计洪水计算提供有价值的参考, 同时也为无资料地区的暴雨雨型研究提供思路。

**关键词:** 广东省; 模糊聚类软划分法; 降雨; Mann-Kendall 趋势检验; 设计雨型; 气候变化; 无资料地区暴雨雨型; 洪水预报

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X43; P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0108-10



## Research on design rainfall patterns of typical river basins in Guangdong Province based on fuzzy clustering soft partition method

ZUO Binbin<sup>1,2,3</sup>, TAN Chao<sup>1,2,3</sup>, CHENG Tao<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Weiqiang<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhiming<sup>1,2,3</sup>, LI Zejun<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, Guangdong, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, Guangdong, China;

收稿日期: 2024-09-03; 修回日期: 2024-11-05; 录用日期: 2024-11-07; 网络出版日期: 2025-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52309014); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010898); 广东省水利科技创新项目(2023-05, 2024-04)

作者简介: 左斌斌(1995—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为水文水资源。E-mail: zuobin95@163.com

通信作者: 程涛(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为洪涝过程模拟。E-mail: tao\_cheng@mail.bnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

3. Guangdong Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic, Guangzhou 510635, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] Designing rainfall patterns serves as a crucial component in calculating design floods for ungauged basins, significantly influencing peak flow rates and temporal distribution of design floods. Given the impacts of climate change, existing rainfall patterns may alter, necessitating the extension of hydrology data to further investigate these changes. [Methods] This study adopts the Mann-Kendall trend test and fuzzy clustering soft partition method, selecting 12 rainfall stations within four typical watersheds in Guangdong Province, focusing on their annual maximum 24-hour and 72-hour rainfall processes. Based on an index system, a fuzzy equivalence matrix is constructed, and the design rainfall patterns under different durations are derived using fuzzy clustering. [Results] The results indicate that annual maximum 24-hour and 72-hour rainfall in the Dongguan River Basin exhibits an increasing trend, with Baimang meteorological station showing the highest rate of change at 0.96 mm/a for annual maximum 24-hour rainfall. Conversely, a decreasing trend is observed in the Rongjiang North River Basin, with Fukou meteorological station experiencing a rate of change of -1.25 mm/a for annual maximum 72-hour rainfall. Furthermore, the design rainfall patterns in all typical basins exhibit composite peak characteristics, with no significant difference in the proportion of the main rain peak in total rainfall. The primary difference lies in the temporal distribution of rainfall. [Conclusion] Compared with the design rainfall patterns outlined in the "Rainstorm Runoff Calculation Chart Manual of Guangdong Province", the control period of the main peak was shifted. This research not only provides valuable references for design flood calculations in typical watersheds but also offers insights into the study of rainstorm patterns in ungauged regions.

**Keywords:** Guangdong Province; fuzzy clustering soft partitioning method; rainfall; Mann-Kendall trend test; design rain pattern; climate change; rainstorm pattern in areas without data; flood forecast

## 0 引言

在全球气候变暖和城市化进程加剧的背景下, 极端降水事件愈发频繁, 由此而引发的洪涝事件也不断增加, 给人民生命财产安全构成严重威胁<sup>[1-5]</sup>。山洪灾害是洪涝灾害中造成人员伤亡和经济损失最为突出的一种, 据统计, 自中华人民共和国成立以来, 有约70%的人员伤亡是由山洪灾害造成的<sup>[6-7]</sup>。这些山洪灾害大多发生在中小流域, 也是中小河流治理过程中重点关注的对象<sup>[8-9]</sup>。这些中小流域由于流域集雨面积小或者流域内水文站点建站时间比较晚, 流域内往往缺乏长序列的流量观测资料, 无法由流量资料来推求设计洪水<sup>[10]</sup>。山洪灾害影响的不断增加, 对于开展中小流域治理以及缓解对山洪灾害带来的影响, 都在促使水文学家开展无资料地区设计洪水模拟的研究<sup>[11]</sup>。为了有效解决无资料地区洪水计算的问题, 经过在水利工程实践中的探索, 也诞生了许多适用于无资料地区的由暴雨资料推求设计洪水的方法, 如瞬时单位线法、推理公式法、地区经验公式法等<sup>[12]</sup>。

在利用暴雨资料推求设计洪水过程中, 设计洪水的计算是假定指定集水区域内暴雨和洪水事件是同频发生的。因此, 在设计暴雨量一定的情况下, 暴雨的时程分配过程(即设计雨型)将直接影响到洪水的形成过程, 对设计洪峰流量、调洪演算过程等产生非常重要的影响<sup>[13-14]</sup>。因设计雨型在洪水计算中的重要性, 国内外学者采用不同方法在不同的区域开展了大

量的研究工作。最常用的设计雨型方法有芝加哥雨型法、Huff 雨型法、三角形雨型法、Pilgrim & Corder 法和同频率分析法等<sup>[15]</sup>。伴随着计算机技术的发展和成熟, 不少学者也采用新的计算方法对设计雨型进行了大量的研究, 以找到能够在各区域适应更好的设计雨型。杨星等<sup>[16]</sup>构建了基于风险率模型分析的设计雨型, 分析了深圳不同重现期下的设计雨型; 陈子燊等<sup>[17]</sup>基于最大1 h、6 h、24 h暴雨量, 构建了三变量非对称 Archimedean Gumbel-Hougaard 极值 Copula 函数, 分析了粤港澳大湾区中心城市典型设计暴雨过程线; 杨志等<sup>[18]</sup>采用综合雨峰位置系数和集中趋势度等特征参数, 确定了典型雨型的时程分配; 付晓娣等<sup>[19]</sup>采用决策树、长短记忆神经网络、LightGBM、支持向量机等四种机器学习方法, 在渭河流域进行了设计雨型的分类; 张建平<sup>[20]</sup>通过引入暴雨衰减指数来提高中小流域雨型设计的精度; 胡睿等<sup>[21]</sup>采用 Ward 层次聚类分析法分析了不同类型雨型与山洪内涝的关系。KOTTEGODA 等<sup>[22]</sup>通过蒙特卡洛法的随机方法来合成设计雨型, 在意大利皮埃蒙特等地区进行了验证并证明该方法良好的适用性。MIKOŁAJEWSKI 等<sup>[23]</sup>采用模糊聚类法, 通过平方和(WSS)和 CHIndex 指数等综合客观分析聚类确定数, 在克拉科夫市的 25 个雨量站点 1 806 场暴雨进行了验证, 证实了该方法的实用性和可重复性。PATINO 等<sup>[24]</sup>提出了基于 HyetoClust 的聚类分析方法研究设计雨型, 通过 IETD 法考虑降雨量、降雨强度和降雨

持续时间的影响, 聚类分析出了更为准确的设计雨型。聚类分析法通过识别出具有相似特征的降雨过程, 并将其划分成不同的雨型分类, 在长期的研究过程中, 证明了其良好的适用性。因此, 本文通过使用聚类分析法来研究广东省典型流域的设计雨型。

广东省中小流域分布广、数量多, 而又地处沿海地带, 气候条件复杂, 为准确计算中小流域设计洪水提出了严峻的挑战。广东省无流量资料的中小流域均采用由暴雨推求设计洪水的计算方法, 设计雨型则采用《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中提供的设计雨型。该设计雨型采用模糊聚类软划分法计算得到, 综合考虑了降雨过程和主雨峰位置的差异性, 从而计算各个水文分区的不利雨型。经过长期的使用, 模糊聚类软划分方法也得到了验证, 证明了该方法在广东具有良好的适用性<sup>[25]</sup>。但随着气候变化和人类活动的影响, 原有的设计雨型也产生了一定的变化, 需进一步延长暴雨序列来开展设计雨型的研究。本研

究采用模糊聚类软划分方法, 对选取的典型流域开展设计雨型研究, 以为广东省设计暴雨雨型研究提供参考, 提高设计洪水的精度。

## 1 研究区概况

广东省位于中国大陆最南端, 属于热带和亚热带季风气候区。地形复杂, 南高北低, 再叠加复杂天气系统的影响, 降雨呈现出雨季长、雨量多、强度大、覆盖范围广、时空分布不均等特点。降雨在时程上具有明显的前、后汛期之分, 在空间上具有高、低值之分。在《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中, 基于广东省暴雨特性, 在照顾流域完整性的基础上将全省划分为 11 个暴雨分区。为更好地研究不同暴雨分区雨型差异, 本研究选择了粤东沿海榕江北河、东江上游新丰江、西江中下游古水河和北江上游洞冠水作为雨型分析的典型流域, 各典型流域位置如图 1 所示。

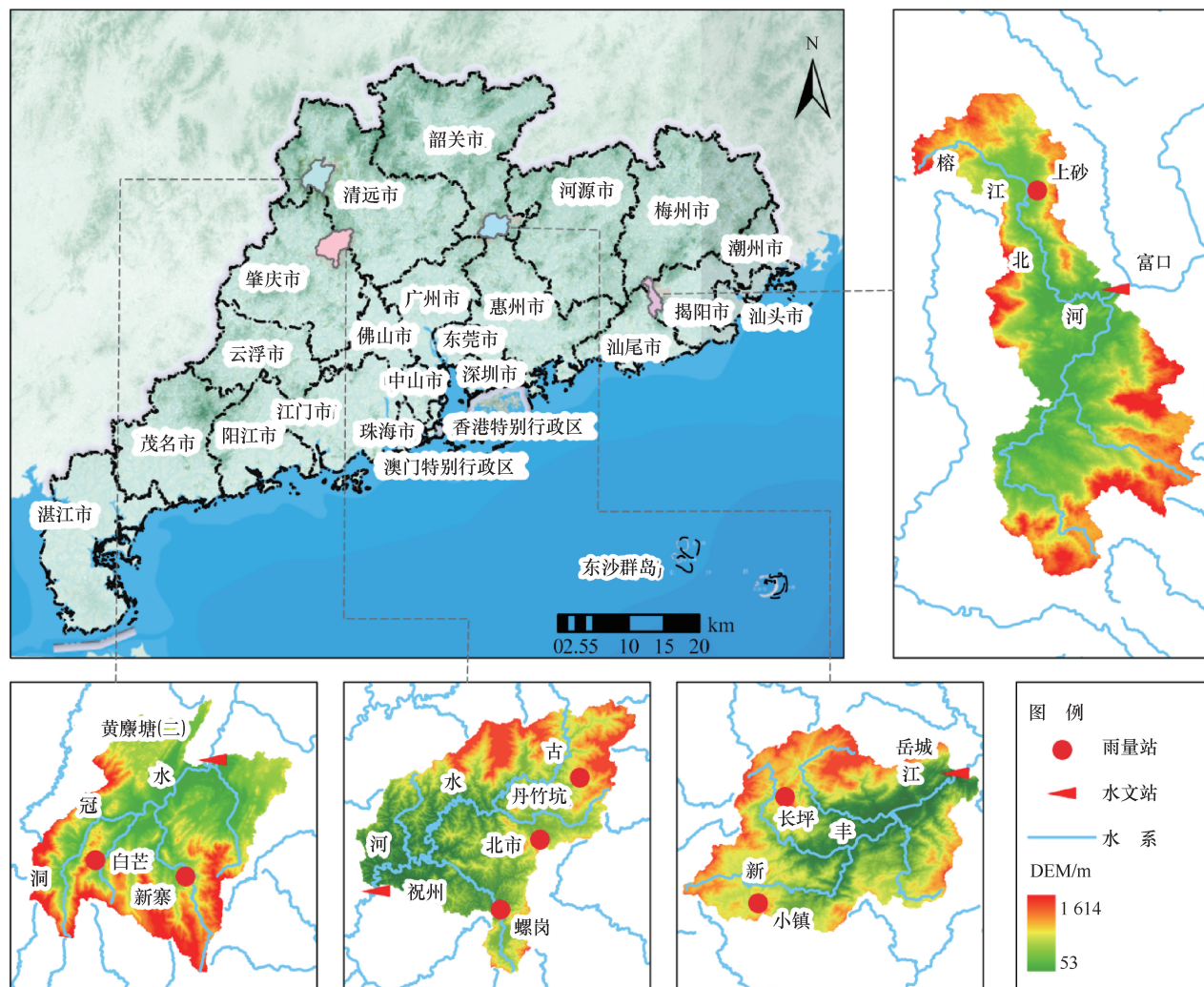


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

降雨资料是雨型分析的基础, 文中采用的降雨序列来源于经汇编后的水文年鉴, 降雨数据质量较高, 较为可靠, 满足本研究分析的需要。本研究设计雨型选择了不同降雨分区下的四个典型流域, 降雨采用四个典型流域内的 12 个雨量站点的雨量要素摘录数据(见表 1)。由于各雨量站点建站时间存在一定差异, 为充分利用各雨量站点的降雨量数据, 统一使用建站至 2019 年的降雨数据进行分析。暴雨雨型在《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中为逐小时分配, 由于部分暴雨场次数据或加密或稀疏, 文中采用线性插值方式得到逐小时降雨过程, 并基于滑动平均法提取分析设计暴雨雨型所需要的最大 24 h、72 h 降雨量过程。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 MK 趋势分析

Mann-Kendall 趋势检验(以下简称 MK 趋势检验)是一种非参数统计检验方法, 通过计算秩次来检验数据中的上升或下降趋势, 并通过显著性检验判断趋势是否具有统计学显著性。因其对数据分布要求低, 不受异常值的干扰, 可以较好地适用于分析时间序列的变化趋势<sup>[26-27]</sup>。

#### 2.2.2 雨型样本的选择

雨型样本是推求设计雨型的基础, 本研究雨型样本按照各个典型流域分片区、分历时(24 h、72 h)进行选择。考虑到本研究计算的设计雨型是供无资料地区设计洪水使用, 本研究按照选样主要选择较大的降雨过程, 即单站不同历时的累计雨量 $\geq 10$  a 一遇的面雨量作为标准进行选择。对于一次暴雨过程, 每个分区只选择一个最大单站点雨量过程, 该降雨过程既要满足雨量的要求, 又能保证该雨峰过程的完整性。24 h 雨型用逐小时分配; 3 d 雨型用 6 h 进行分配。

#### 2.2.3 雨型分类指标

##### 2.2.3.1 数据标准化

每个分区有  $n$  个雨型样本, 每个雨型样本有  $m$  个指标, 所有的雨型样本可用矩阵  $\mathbf{X}$  表示

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

考虑到不同场次降雨雨量的量级上存在差异, 会夸大绝对值较大降雨对雨型过程的影响, 为消除雨量的影响, 使用总雨量进行归一化处理, 归一化后的降

雨数据可以将雨量控制在同一量级水平, 可以更加直观地反映每个时段相对于总体降雨量的贡献, 但不改变原有降雨的时程分配关系。

##### 2.2.3.2 构建指标体系

应用模糊聚类分析方法分析设计雨型, 是利用雨型样本之间的模糊相似关系。分类指标是进行聚类分析的关键, 也将直接影响分类的结果。选择具有物理意义, 分辨能力高, 具有代表性的指标直接影响到分类结果的好坏。进行雨型样本的分类, 需对每个样本之间的相似程度进行量化, 本研究主要采用时程分配和主雨段位置来表征样本间的相似性<sup>[28]</sup>。

时程分配相似系数  $\cos \theta_{ij}$  采用夹角余弦定理表示

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik})(x_{jk})}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik})^2 (x_{jk})^2}} \quad (2)$$

式中,  $x_{ik}$ 、 $x_{jk}$  为第  $i$ 、 $j$  两个样本第  $k$  个指标。

主雨段位置相似系数采用时序距离  $d_{ij}$  指标表示

$$d_{ij} = 1 - \frac{|T_i - T_j|}{L - t} \quad (3)$$

式中,  $T_i$ 、 $T_j$  为  $i$ 、 $j$  两个样本主雨段的起(止)时序数;  $L$  为雨型样本总时段数, 24 h 雨型为 24 段, 3 d 雨型为 12 段;  $T$  为主雨段时段数, 24 h 雨型以 1 h 分段, 主雨峰为最大 6 h; 3 d 雨型以 6 h 分段, 主雨峰为最大 24 h。

综合雨型样本相似系数  $R_{ij}$  将时程分配相似系数和主雨段位置相似系数按照等权处理, 计算并构建各雨型样本间的模糊相似矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}$

$$R_{ij} = \frac{1}{2} (\cos \theta_{ij} + d_{ij}) \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n1} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据建立的模糊等价矩阵, 选用不同相似水平的  $\lambda$  值, 建立不同相似水平的  $\lambda$  截矩阵, 选择合适的  $\lambda$  值计算最优的分类结果。在雨型分类结果中, 总体可以分为 3 类, 即主雨段在前、中、后 3 类, 但也会存在少部分样本与以上 3 类差异较大的雨型样本。

#### 2.2.4 计算聚类中心

模糊聚类软划分方法是运用隶属度来表征每个数据点聚类程度归属的一种聚类算法, 按照构建的指标体系, 将数据样本  $\mathbf{X}$  划分为  $C$  类, 对于各个样本对

每类的隶属度用  $u_{ik} \in (0, 1]$  来表示,  $u_{ik}$  应满足

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n u_{ik} > 0 \quad (7)$$

式中,  $u_{ik}$  为第  $i$  个样本隶属于第  $k$  类的隶属度。

通过寻找目标函数  $J$  达到最小值时的隶属度矩阵  $U$  和聚类中心  $V$ 。软划分的最优分类原则表达式为

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m \|X_k - V_i\|^2 \quad (8)$$

式中,  $u_{ik}$  为样本  $k$  对  $i$  类的隶属度;  $V_i$  为第  $i$  类聚类中心;  $m(1 \leq m < \infty)$  为加强样本对各类隶属度对比的参数, 本研究选取  $m=2$ ;  $\|X_k - V_i\|$  为样本  $x$  与  $i$  个聚类中心的欧式距离。

对于聚类中心  $V$  和隶属度矩阵  $U$  可以用以下公式进行迭代计算<sup>[29-31]</sup>

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m} \quad (9)$$

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{\|X_k - V_i\|}{\|X_k - V_j\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (10)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 降雨变化趋势

根据四个典型流域 12 个雨量站点的年最大 24 h、72 h 降雨量序列, 计算各个站点降雨量序列的均值, 分析结果如表 1 所列。从单个站点降雨量均值来看, 年最大 24 h 降雨量最大的站点为榕江北河流域的富口站, 达到 175.3 mm, 年最大 24 h 降雨量最小的站点为新丰江流域的岳城站, 仅为 141.2 mm; 年最大 72 h 降雨量最大的站点为榕江北河流域的富口站, 达到 255.6 mm, 年最大 72 h 降雨量最小的站点为洞冠水流域的黄麝塘站, 仅为 157.1 mm。

各流域 24 h、72 h 降雨量的变化趋势分析结果如表 1 所列。从 MK 趋势检验的结果来看, 在本研究选择分析的 12 个雨量站点中, 年最大 24 h 降雨量序列中有 7 个站点呈现出增加的趋势, 5 个站点呈现减少的趋势, 其中, 统计量  $Z$  值的绝对值在白芒站最大, 表明白芒站降雨量变化速度最快, 降雨量平均每年增加 0.96 mm; 统计量  $Z$  值在富口站最小, 表明降雨量在白芒站减少速度最快, 达到 0.58 mm/a。年最大 72 h 降雨量序列中有 7 个站点呈现出增加的趋势,

5 个站点呈现减少的趋势, 其中, 统计量  $Z$  值的绝对值在黄麝塘最大, 表明黄麝塘降雨量变化速度最快, 降雨量平均每年增加 0.82 mm; 统计量  $Z$  值在富口站最小, 表明降雨量在富口站减少速度最快, 达到 1.25 mm/a。从流域角度不同历时降雨量变化趋势来看, 榕江北河流域降雨量呈现减少的趋势, 洞冠水流域降雨量呈现增加的趋势, 新丰江流域 72 h 降雨量呈现出增加的趋势, 新丰江 24 h 降雨量和古水河流域内各站点呈现出空间分布的不均匀性。不同站点降雨变化趋势可能是由大气环流、地形地貌、局地小气候等引起的, 但在给定 5% 的显著性水平条件下,  $\beta$  值均在  $(\beta_L, \beta_U)$  范围内, 均没有通过显著性检验, 说明各站点年最大 24 h、72 h 降雨量虽然都有不同程度的变化趋势, 但变化并不明显。

#### 3.2 雨型样本分类

根据上述选样原则, 按照同一流域同一场洪水选择总量最大 24 h 和 72 h 降雨量过程的雨型样本进行综合选样, 同时, 选样时要保证主雨峰的完整性。以榕江北河流域 24 h 雨型样本作为典型, 绘制 11 个样本雨型的过程图, 如图 2 所示。

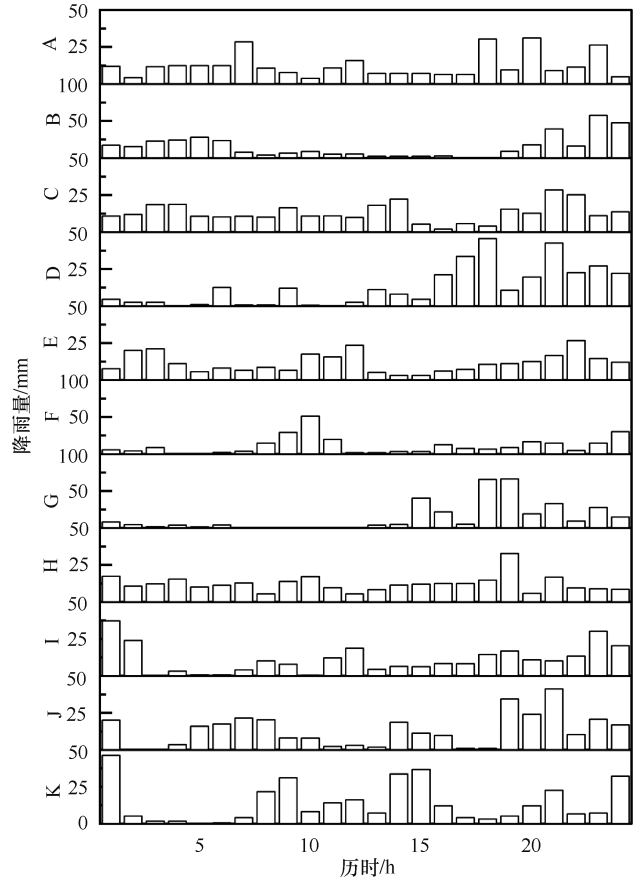


图 2 榕江北河 24 h 雨型样本过程

Fig. 2 Diagram of 24-hour rainfall pattern sample process for Rongjiang North River

表 1 各雨量站点 24 h、72 h 降雨变化趋势

Table 1 Trends of 24 h and 72 h rainfall changes of different rainfall stations

历时	流域	站点	时间序列	均值	Z 值	$\beta$	趋势	$\beta_L$	$\beta_U$	
24 h	榕江北河	上砂	1965—2019 年	170.0	-1.01	-0.43	↓	-1.33	0.49	
		富口	1967—2019 年	175.3	-1.26	-0.58	↓	-1.43	0.40	
	新丰江	岳城	1974—2019 年	141.2	-0.08	-0.04	↓	-1.06	1.06	
		长坪	1974—2019 年	156.7	0.31	0.17	↑	-1.21	1.47	
		小镇	1973—2019 年	149.9	0.89	0.44	↑	-0.70	1.60	
	古水河	螺岗	1970—2019 年	125.5	0.48	0.25	↑	-0.74	1.16	
		祝州	1965—2019 年	122.7	-0.05	-0.03	↓	-0.65	0.55	
		北市	1966—2019 年	120.8	0.42	0.12	↑	-0.46	0.73	
	洞冠水	丹竹坑	1969—2019 年	136.4	-0.03	-0.05	↓	-0.89	0.89	
		黄廉塘	1965—2019 年	109.4	2.09	0.74	↑	0.06	1.29	
白芒		1965—2019 年	144.9	2.34	0.96	↑	0.24	1.76		
	新寨	1970—2019 年	144.4	0.82	0.47	↑	-0.63	1.38		
		榕江北河	上砂	1962—2019 年	248.3	-1.27	-0.76	↓	-2.06	0.43
			富口	1962—2019 年	255.6	-2.37	-1.25	↓	-2.31	-0.25
72 h	新丰江	岳城	1962—2019 年	189.2	1.32	0.67	↑	-0.38	1.86	
		长坪	1962—2019 年	214.1	0.19	0.18	↑	-1.69	2.05	
		小镇	1967—2019 年	208.5	0.88	0.53	↑	-0.65	2.06	
	古水河	螺岗	1969—2019 年	163.1	0.82	0.35	↑	-0.84	1.59	
		祝州	1962—2019 年	159.4	-0.30	-0.10	↓	-0.86	0.63	
		北市	1962—2019 年	165.6	-0.74	-0.25	↓	-1.00	0.47	
		丹竹坑	1964—2019 年	180.4	-0.68	-0.32	↓	-1.13	0.53	
	洞冠水	黄廉塘	1962—2019 年	157.1	2.38	0.82	↑	0.14	1.53	
白芒		1962—2019 年	205.1	1.38	0.65	↑	-0.26	1.42		
新寨		1963—2019 年	201.1	1.07	0.55	↑	-0.57	1.81		

注: Z 值为 MK 趋势分析统计量;  $\beta$  为变化趋势;  $\beta_L$ 、 $\beta_U$  为给定显著性水平条件下变化趋势的下限和上限。

基于选出的各个典型流域 24 h 和 72 h 的雨型样本, 按照构建的指标体系, 采用模糊聚类软划分方法对雨型样本进行分类, 分类结果如表 2 所列。从表中可以看出, 聚类成果的截距水平均在 0.7 以上, 且 S1 类的雨型过程占比最大, 这类样本出现频次最高且包含了较多已发生的特大暴雨, 即为最优雨型模式样本。

表 2 雨型样本分类成果

Table 2 Classification results of rainfall pattern samples

历时	流域	样本数	$\lambda$	分类			
				S1	S2	S3	S4
24 h	榕江北河	11	0.81	8	1	1	1
	新丰江	12	0.70	7	3	1	1
	古水河	21	0.75	16	3	1	1
	洞冠水	12	0.75	8	3	1	0
72 h	榕江北河	11	0.82	8	2	1	0
	新丰江	11	0.73	6	4	1	0
	古水河	27	0.78	16	10	1	0
	洞冠水	15	0.75	9	3	3	0

### 3.3 设计雨型聚类中心

最优雨型样本代表流域的雨型具有代表性, 可以很好地反映出流域的雨型特征。采用模糊聚类软划分方法, 计算 S1 雨型样本的聚类中心, 24 h 降雨雨型聚类中心如表 3 所列, 72 h 降雨雨型聚类中心如表 4

所列。从表 3 中可以看出, 在 24 h 降雨雨型中, 榕江北河流域主雨峰最靠后, 分布在第 4 个控制时段 (即时段 19, 20, 21, 22, 23, 24, 下同), 主雨峰占 24 h 降雨量的 37.4%; 古水河流域主雨峰偏后, 分布在第三个控制时段, 主雨峰占 24 h 降雨量的 39.7%; 新丰江流域和洞冠水流域主雨峰偏前, 均分布在第 2 个控制时段, 主雨峰占 24 h 降雨量的比例分别为 38.8% 和 33.5%。从表 4 中可以看出, 在 72 h 降雨雨型中, 4 个典型流域的降雨量主雨峰均分布在第 2 个控制时段, 即时段 5, 6, 7, 8), 榕江北河、新丰江、古水河、洞冠水 24 个主雨峰占 72 h 降雨量的比例分别为 46.5%、51.4%、54.6%、53.9%。从整体上来看, 24 h、72 h 降雨量的主雨峰降雨量占总降雨量的比例差异较小, 但在时程分配上因各个流域的地形地貌、气候条件等存在较大差异。

## 4 讨论

在《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中, 采用模糊聚类软划分方法对各个水文分区的降雨雨型进行了计算。本研究以流域所在水文分区的 24 h、72 h 雨型和《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中的雨型进行对比 (以下称新雨型和旧雨型), 如图 3 和

表 3 24 h 降雨雨型聚类中心(时段为 1 h)

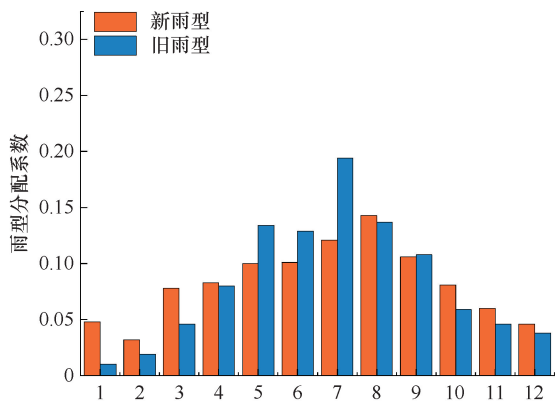
Table 3 Cluster centers of 24-hour rainfall patterns (with 1-hour time intervals)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
榕江	0.031	0.030	0.027	0.024	0.030	0.030	0.032	0.042	0.040	0.031	0.031	0.021
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	0.035	0.038	0.034	0.028	0.058	0.064	0.054	0.082	0.046	0.072	0.065	0.055
新丰江	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	0.016	0.014	0.016	0.020	0.042	0.041	0.048	0.055	0.081	0.072	0.075	0.057
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
古水河	0.023	0.046	0.042	0.028	0.038	0.046	0.046	0.053	0.029	0.012	0.052	0.048
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	0.019	0.025	0.023	0.025	0.035	0.031	0.040	0.043	0.069	0.036	0.031	0.047
洞冠水	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	0.069	0.064	0.066	0.063	0.073	0.062	0.032	0.033	0.030	0.042	0.018	0.024
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
洞冠水	0.026	0.031	0.046	0.060	0.040	0.044	0.036	0.053	0.072	0.049	0.063	0.055
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	0.033	0.026	0.036	0.029	0.019	0.028	0.050	0.040	0.043	0.053	0.041	0.026

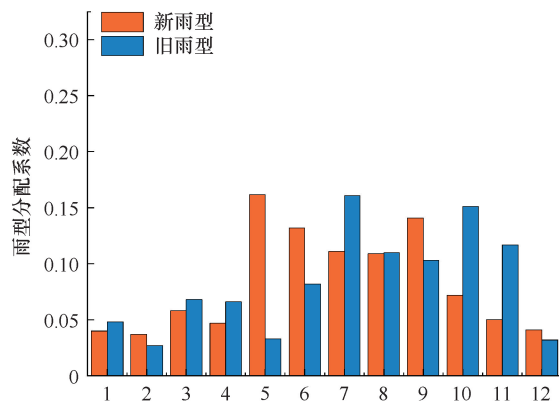
表 4 72 h 降雨雨型聚类中心(时段为 6 h)

Table 4 Cluster centers of 72-hour rainfall patterns (with 6-hour time intervals)

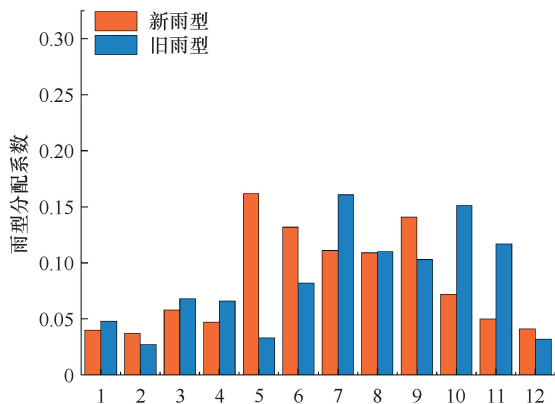
流域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
榕江	0.048	0.032	0.078	0.083	0.100	0.101	0.121	0.143	0.106	0.081	0.060	0.046
新丰江	0.040	0.037	0.058	0.047	0.162	0.132	0.111	0.109	0.141	0.072	0.050	0.041
古水河	0.026	0.03	0.049	0.081	0.179	0.156	0.100	0.111	0.123	0.052	0.035	0.058
洞冠水	0.050	0.025	0.050	0.059	0.089	0.172	0.208	0.070	0.070	0.085	0.054	0.068



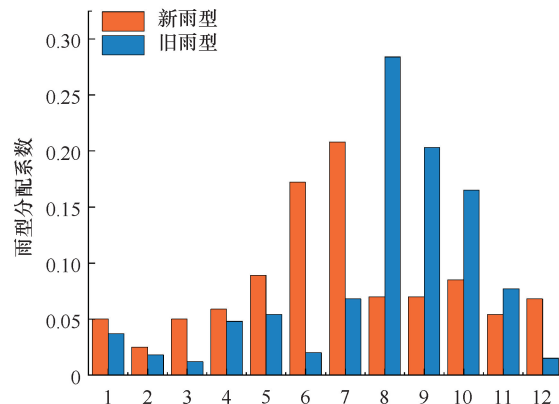
(a) 榕江北河



(b) 新丰江



(c) 古水河



(d) 洞冠水

图 3 新旧 24 h 雨型对比

Fig. 3 Comparison chart of old and new 24-hour rainfall patterns

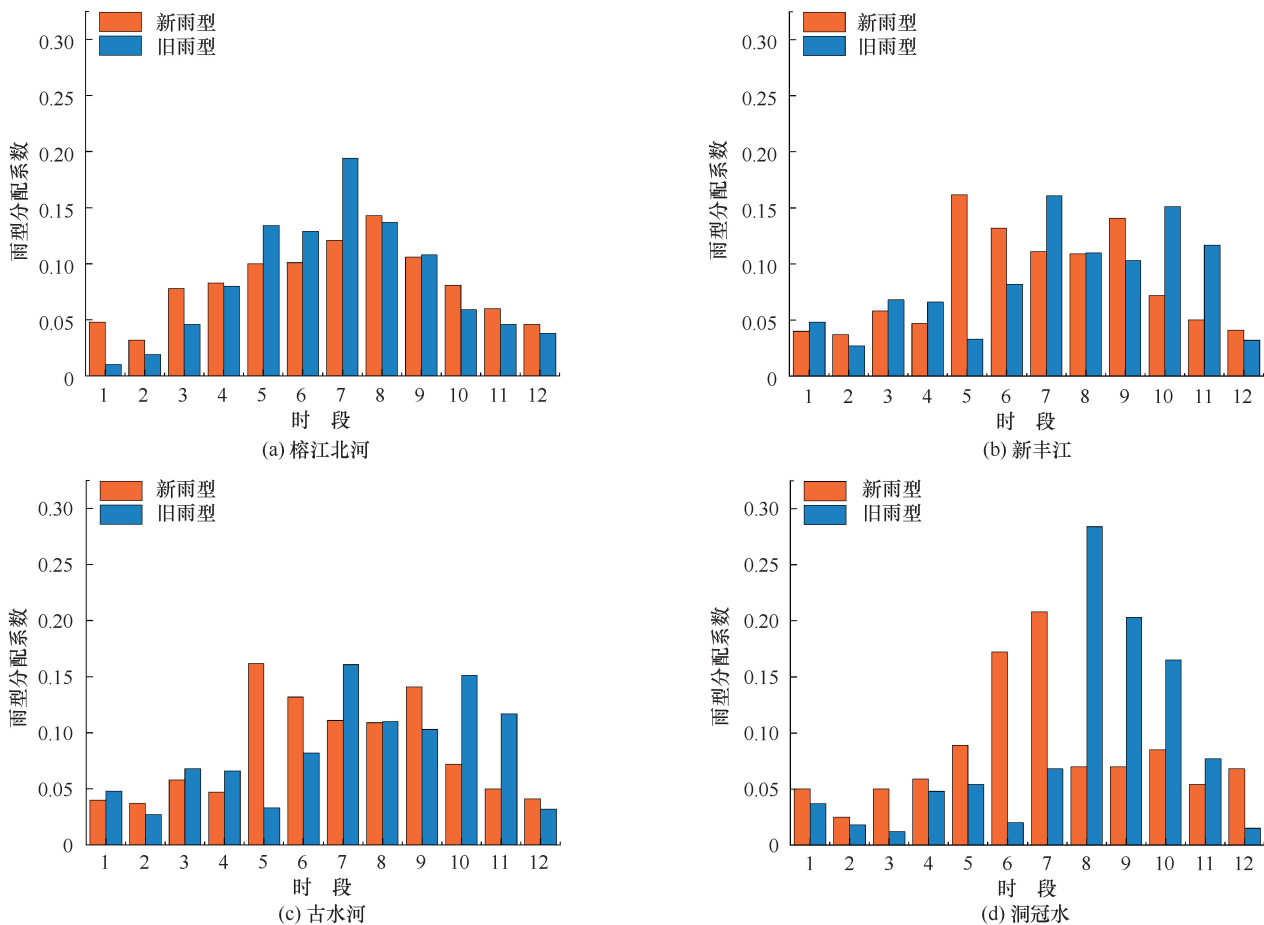


图4 新旧72 h雨型对比

Fig. 4 Comparison chart of old and new 72-hour rainfall patterns

图4所示。从图3中可以看出,在24 h雨型中,榕江北河、古水河流域主雨峰控制时段较手册均发生了改变,榕江北河主雨峰均延后了1个控制时段,洞冠水主雨峰提前了1个控制时段。从主雨峰占比来看,本研究计算的榕江北河主雨峰占比较旧雨型偏大外,其余各个流域雨型占比均偏小。从图4中可以看出,在72 h雨型中,本研究计算的设计雨型主雨峰主要分布在第2个控制时段,而手册中的雨型除榕江北河外,均分布在第三个控制时段,本研究计算的72 h雨型主雨峰整体上更靠前。

通过研究分析计算发现,4个典型流域的设计雨型都发生了一定的改变,这可能是在变化环境下,受降水变化趋势的影响,选择的雨型样本发生了较大的改变。当然,如果想全面地了解设计雨型的变化特性,还需要增加各个水文分区的雨量站点,并采用更高时间分辨率的降雨数据进行进一步研究,以分析出更具代表性的设计雨型。

## 5 结论

本文运用MK趋势检验与模糊聚类软划分法,对广东省四个典型流域内12个雨量站点的年最大24 h及72 h降雨量数据进行了深入分析,探讨了广东省中小流域降雨的变化趋势以及设计雨型的变化特征。结论如下。

(1)榕江北河流域的年最大24 h和72 h降雨量均值最大,新丰江流域次之,而古水河流域和洞冠水流域的降雨量最小且相对接近。

(2)不同流域年最大24 h和72 h降雨量呈现出不同程度增减趋势,但并不显著。榕江北河流域整体呈现减小趋势,其中富口站的减小速度最快,年最大24 h降雨量变化速率为 $-0.58 \text{ mm/a}$ ,年最大72 h降雨量变化速率为 $-1.25 \text{ mm/a}$ 。相反,洞冠水流域则整体呈现增加趋势,其中白芒站的年最大24 h降雨量变化速率最大,为 $0.96 \text{ mm/a}$ ;黄麝塘站的年最大72 h降雨量变化速率最大,为 $0.82 \text{ mm/a}$ 。

(3)24 h降雨雨型,新丰江和洞冠水流域的主

雨峰均出现在第2个控制时段,且4个典型流域的主雨峰雨量占比均在30%~40%之间。对于72h降雨雨型,主雨峰同样出现在第2个控制时段,且主雨峰雨量占比在45%~55%之间。总体来看,各典型流域的主雨峰占比差异较小,主要差异体现在时程分配上。

(4)与《广东省暴雨径流查算图表使用手册》中的设计雨型相比,本研究计算得出的24h雨型主雨峰在榕江北河延后了1个控制时段,而在洞冠水则提前了1个控制时段。对于72h雨型,除榕江北河外,主雨峰均分布在第3个控制时段,且整体上更靠前。

## 参考文献(References):

[1] FAN C, HOU J, LI D, et al. Characteristics and drivers of flooding in recently built urban infrastructure during extreme rainfall [J]. *Urban Climate*, 2024, 56: 102018.

[2] 舒章康,李文鑫,张建云,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116-125.  
SHU Zhangkang, LI Wenxin, ZHANG Jianyun, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 116-125.

[3] 吴绍洪. 2024年我国暴雨洪涝灾害特征与防范[J]. *中国减灾*, 2024(15): 12-15.  
WU Shaohong. Characteristics and prevention of rainstorm and flood disasters in China in 2024[J]. *Disaster Reduction in China*, 2024(15): 12-15.

[4] 罗兴树,章数语,郭园,等. 极端降水对陕西省农业生产的影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 339-347.  
LUO X S, ZHANG S Y, GUO Y, et al. The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shanxi Province[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 339-347.

[5] DENG Z, WANG Z, WU X, et al. Effect difference of climate change and urbanization on extreme precipitation over the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Atmospheric Research*, 2023, 282: 106514.

[6] 褚明华,杜晓鹤,何秉顺. 我国水旱灾害防御应对[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(8): 1-8.  
CHU Minghua, DU Xiaohu, HE Bingshun. China's prevention and response to flood and drought disasters [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(8): 1-8.

[7] 赵刚,庞博,徐宗学,等. 中国山洪灾害危险性评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1133-1142.  
ZHAO Gang, PANG Bo, XU Zongxue, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9): 1133-1142.

[8] AZMERI A, HADIHARDAJA I K, VADIYA R. Identification of flash flood hazard zones in mountainous small watershed of Aceh Besar Regency, Aceh Province, Indonesia [J]. *The Egyptian Journal of*

*Remote Sensing and Space Science*, 2016, 19(1): 143-160.

[9] 王元疆,江善虎,凌子涵,等. 基于降雨时空变化的山洪预警临界雨量[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 90-98.  
WANG Y J, JIANG S H, LING Z H, et al. Critical rainfall for flash flood warning based on rainfall uncertainty [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 90-98.

[10] 李治军,王华凡,侯岳,等. 我国无资料地区水文预报研究进展[J]. *水利科学与寒区工程*, 2022, 5(5): 46-50.  
LI Zhijun, WANG Huafan, HOU Yue, et al. Advances in hydrological forecasting for no data area in China [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2022, 5(5): 46-50.

[11] GRIMALDI S, NARDI F, PISCOPIA R, et al. Continuous hydrologic modelling for design simulation in small and ungauged basins: A step forward and some tests for its practical use [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 125664.

[12] 徐玲玲,张巍. 山丘平圩混合区小流域水文分析计算方法研究[J]. *水文*, 2017, 37(1): 64-67.  
XU Lingling, ZHANG Wei. Study on hydrological calculation methods for small watersheds in mountain-plain-polder mixing zone [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(1): 64-67.

[13] XIAO Y, GUO S, LIU P, et al. Design flood hydrograph based on multicharacteristic synthesis index method [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(12): 1359-1364.

[14] 郑彦辰,李建柱,荣佑同,等. 降雨时空分布量化及其在洪水过程分类中的应用[J]. *水利学报*, 2022, 53(5): 560-573.  
ZHENG Yanchen, LI Jianzhu, RONG Youtong, et al. Quantification of rainfall spatial and temporal distribution characteristics on the flood hydrograph and its application in flood type classification [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(5): 560-573.

[15] 严正宵,夏军,宋进喜,等. 中小流域设计暴雨雨型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(7): 1224-1235.  
YAN Zhengxiao, XIA Jun, SONG Jinxi, et al. Research progress on design hyetographs in small and medium-scale basins [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(7): 1224-1235.

[16] 杨星,朱大栋,李朝方,等. 按风险率模型分析的设计雨型[J]. *水利学报*, 2013, 44(5): 542-548.  
YANG Xing, ZHU Dadong, LI Chaofang, et al. Establishment of design hyetographs based on risk probability models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(5): 542-548.

[17] 陈子燊,杨芳,高时友. 粤港澳大湾区中心城市典型设计暴雨过程线分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2023, 62(6): 1-10.  
CHEN Zishen, YANG Fang, GAO Shiyu. Analysis on typical design rainstorm hydrographs of central cities in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2023, 62(6): 1-10.

[18] 杨志,夏春华,刘璐,等. 基于特征参数的长历时降雨雨型研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(9): 66-69.  
YANG Zhi, XIA Chunhua, LIU Lu, et al. Research on rainfall pattern of long duration rainfall based on characteristic parameters [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(9): 66-69.

- [19] 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.  
FU Xiaodi, KAN Guangyuan, LIU Ronghua, et al. Research of rain patterns classification based on machine learning: A case study in Pi River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 101-111.
- [20] 张建平, 朱友聪, 朱骊. 暴雨衰减指数在中小流域雨型设计中的运用探讨[J]. 中国农村水利水电, 2013(7): 75-77.  
ZHANG Jianping, ZHU Youcong, ZHU Li. A probe into the application of rainstorm attenuation index in rainfall pattern design of medium and small basins [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(7): 75-77.
- [21] 胡睿, 王双银, 王鹏飞. 基于聚类分析的短历时暴雨雨型研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 8-10.  
HU Rui, WANG Shuangyin, WANG Pengfei. Research on rainstorm pattern of short duration based on cluster analysis [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 8-10.
- [22] KOTTEGODA N T, NATALE L, RAITERI E. Monte Carlo simulation of rainfall hyetographs for analysis and design [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1-11.
- [23] MIKOŁAJEWSKI K, RUMAN M, KOSEK K, et al. Development of cluster analysis methodology for identification of model rainfall hyetographs and its application at an urban precipitation field scale [J]. Science of The Total Environment, 2022, 829: 154588.
- [24] PATINO C, MOLINA J-L, ESPEJO F, et al. HyetoClust method: Hyetograph design through cluster analysis [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130014.
- [25] 江火荣. 设计雨型分析[J]. 水文, 1995, 15(S1): 17-24.  
JIANG Huorong. Analysis of design rainfall patterns [J]. Journal of China Hydrology, 1995, 15(S1): 17-24.
- [26] 左斌斌, 徐宗学, 任梅芳, 等. 北京市通州区1966—2016年降水特性研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 556-563.  
ZUO Binbin, XU Zongxue, REN Meifang, et al. Precipitations in Tongzhou District Beijing from 1966—2016 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 556-563.
- [27] 李慧慧, 栾承梅, 夏翔, 等. 基于CMIP6气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(8): 16-29.  
LI Huihui, LUAN Chengmei, XIA Xu, et al. Prediction of future extreme precipitation scenarios in china based on CMIP6 climate model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(8): 16-29.
- [28] 广东省水文总站. 广东省设计雨型分析-模糊聚类分析法[R]. 广州: 广东省水文总站, 1988.  
Guangdong Hydrological Administration. Analysis of Design Rainfall Patterns in Guangdong Province-Fuzzy Clustering Analysis Method [R]. Guangzhou: Guangdong Hydrological Administration, 1988.
- [29] 何婷, 赵春兰, 李屹, 等. 基于FCM聚类的模糊综合评价方法[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 111-119.  
HE Ting, ZHAO Chunlan, LI Yi, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation method based on FCM clustering [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 111-119.
- [30] 何州杉月, 杨林. 中国降水区划模糊聚类软划分法[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 582-586.  
HE Zhoushanyue, YANG Lin. Precipitation regionalization based on fuzzy clustering algorithm [J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(5): 582-586.
- [31] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. 基于模糊C均值聚类法的河南省近57年干旱特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 33-39.  
WEI Linyong, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Analysis of drought characteristics in Henan Province in the latest 57 years based on fuzzy C-means clustering [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(1): 33-39.

(责任编辑 王海锋)