

# 短时强降水条件下山洪流域面雨量的计算方法 ——以巴彦淖尔市阴山山脉为例

刘继东<sup>1</sup> 李菁<sup>2</sup> 柳晶<sup>2</sup> 刘璐<sup>3</sup> 刘文强<sup>4</sup>

(1 内蒙古巴彦淖尔市气象局, 巴彦淖尔 015000; 2 华风气象传媒集团有限责任公司, 北京 100081;  
3 乌拉特前旗气象局, 乌拉特前旗 014400; 4 巴彦淖尔市林业和草原资源保护中心, 巴彦淖尔 015000)

**摘要:** 巴彦淖尔市阴山山脉地区, 群山错列, 沟壑纵横, 其中洪水危害比较严重的山洪沟道有104条, 这些山沟纵坡大、流程短, 危害严重, 防洪预警能力亟待提升。本文针对巴彦淖尔市阴山山脉地区的特殊地理特点提出了一种山洪流域面雨量的计算方法, 用于预警当地山洪的发生。山洪流域面雨量的计算取决于两个关键技术, 一是流域边界的提取, 二是流域格点雨量的计算。对于山洪流域的提取, 使用多流向DINF算法形成山洪流域面矢量数据。对于格点雨量的计算, 采用按距离分配权重的插值方法, 将自动气象站雨量内插到1.0 km网格点, 然后将山洪流域面矢量和格点雨量求交集, 计算得到流域面雨量。用流域面雨量的大小做出山洪发生的预警。同时, 我们发现山洪形成过程受到瞬时降水强度、山体植被情况以及瞬时下渗强度等多种因素的影响和制约, 是一个非常复杂的非线性过程。因此流域面雨量用于山洪预警发布时, 还需要结合当地流域内的水文、地理、隐患点等情况综合决策。本文针对一次有人工观测的山洪实例, 对西乌盖沟和东升庙沟洪水的流域面雨量进行模拟, 验证了所提出流域面雨量计算方法的可用性。

**关键词:** 面雨量, DINF算法, 短时强降水, 山洪预警

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.06.005

## Calculation of Basin Areal Rainfall in Mountainous Areas under Short-Time Heavy Rainfall: Taking Bayannur Yinshan Mountains as an Example

Liu Jidong<sup>1</sup>, Li Jing<sup>2</sup>, Liu Jing<sup>2</sup>, Liu Lu<sup>3</sup>, Liu Wenqiang<sup>4</sup>

(1 Bayannur Meteorological Bureau, Bayannur 015000; 2 Huafeng Meteorological Media Group Co., Ltd., Beijing 100081; 3 Urat Front Banner Meteorological Bureau, Urat Front Banner 014400; 4 Bayannur Forestry and Grassland Resources Protection Center, Bayannur 015000)

**Abstract:** In the Yinshan Mountain area of Bayannur, mountains are staggered and gullies are crisscross, among which there are 104 mountain flood gullies with serious flood hazards. These gullies are featured with large longitudinal slopes, short flow paths and serious hazards, and hence the flood prevention and early warning capacity needs to be improved promptly. This paper proposes a method for calculating the areal rainfall of mountain flood gullies so as to predict and warn the occurrence of mountain flood. The calculation depends on two key technologies. The first is the extraction of the boundary of the mountain torrent basin, and the second is the calculation of grid rainfall. For the former, we use the multi-flow DINF algorithm to generate surface vector data for flash flood basins. As for the latter, we use the interpolation method of distributing weight according to distance to interpolate the rainfall of the automatic weather stations to the 1.0 km grid point. The watershed areal rainfall can be calculated by intersection of the watershed areal vector and the grid rainfall. And hence the early warning of mountain flood can be determined by the amount of the areal rainfall. Meanwhile, it is found that the formation process of flash flood is affected and restricted by many factors, such as instantaneous rainfall intensity, mountain vegetation and instantaneous infiltration intensity. It is a very complex nonlinear process. Therefore, when the basin areal rainfall is used for the release of mountain flood warning, it is also necessary to make a comprehensive decision in combination with the hydrology, geography, hidden danger points and other conditions in the basin.

This paper simulates the basin areal rainfall for the flood in Xiwugaigou and Dongshengmiaogou based on one case of mountain torrent with manual observation, and verifies the applicability of the basin areal rainfall calculation method proposed in this article.

**Keywords:** areal rainfall, DINF algorithm, short-time heavy rainfall, flash flood warning

收稿日期: 2023年6月29日; 修回日期: 2024年1月2日  
第一作者: 刘继东 (1969—), Email: 653002125@qq.com  
通信作者: 李菁 (1988—), Email: 819659485@qq.com  
资助信息: 内蒙古自治区气象局引导性创新基金项目  
(nmqxycx202221)

## 0 引言

巴彦淖尔市位于内蒙古西部，位于 $40^{\circ}13' - 42^{\circ}28'N$ ， $105^{\circ}12' - 109^{\circ}53'E$ ，东接包头，西连阿拉善盟、乌海市，南隔黄河与鄂尔多斯市相望，北与蒙古国接壤，总面积 $6.4 \text{万 km}^2$ ，地表植被属荒漠草原，导致植被覆盖不足。同时，阴山山脉巴彦淖尔段山洪沟口众多，山区内夏季多出现短时强降水天气，山沟产汇流作用强而流程短，极易引发山洪灾害，给周边群众生产生活造成严重影响，山洪灾害防范能力亟需提升。

山洪预警的核心是对流域面雨量的计算。由于降水的时空分布不均匀，如何准确估算面雨量始终是一个科学难题。随着气象学、数学、水文学、遥感等学科技术的发展，流域面雨量的估算技术也有了长足的发展。近年来，雷达、卫星等遥感资料广泛应用于估算降水，其优势在于能较为完整地模拟降水在空间上的分布，但对降水量的估算精确度往往较低。阴山山脉巴彦淖尔段属内陆山区，大陆强对流型的短时强降水天气偏多，其特点是：水汽不充足、零度层偏低、由山体强迫抬升，强对流中的冰雹天气较多。俞小鼎<sup>[1]</sup>研究显示，冰雹大粒子等因素对天气雷达反射率因子有异常贡献，常使雷达对雨强的估算不够准确。山洪的预测对降水量观测精度的要求比较高，以自动站为基础的面雨量估算更符合山洪预测对雨量精确度的需求。阴山山脉巴彦淖尔段山沟的流域面积只有几十到几百平方千米、主沟长度 $20 \sim 30 \text{ km}$ ，每条山洪沟的流域面积不大、沟线不长，而且在流域的上游、中游都布设了雨量自动站，适合发展以自动雨量站为基础的流域面雨量计算方法。徐晶等<sup>[2]</sup>研究显示，通过客观站点内插到网格点的方法，得到山洪沟流域上的面雨量，这种方法只要保证雨量自动站点布置较合理、密度较适中，可以得到比较准确的面雨量估测。本文的研究目的是针对巴彦淖尔阴山山脉地区建立适应当地短时强降水特点的流域面雨量计算方法，并以此为基础设计山洪预警发布流程。

## 1 方法

### 1.1 构建山洪沟流域面矢量数据

流域面雨量计算的前提是流域面矢量的构建。本文采用DINF (D-Infinity Flow) 算法<sup>[3-6]</sup>进行山洪沟流域面矢量的构建。DINF算法是一种用于地形分析和流域划分的算法。它的发展过程可以追溯到20世纪90年代初，当时美国地质调查局 (US Geological Survey) 的研究人员提出了一种基于地表高程数据的新方法来模拟水流的流向和流量分布。最早的DINF算法是基于离散地形数据的流向分析方法。它通过计算栅格单

元之间的高程梯度来确定水流的流向。这种方法可以用于生成单一流向的流域模型，但在处理复杂地形和多流向情况时存在一些局限性。随着研究的深入，学者们开始探索更精确的流域划分方法，以更好地捕捉地表流动的多样性。一项重要的改进是引入了无穷流向 (Infinite Flow Direction) 的概念，即考虑周围所有可能的流向方向。这样每个栅格单元的流向不再局限于单一方向，而是可以选择多个可能的流向路径。这种改进使DINF算法能够更好地适应复杂地形和多流向的情况。随后，学者们进一步优化了DINF算法，引入了更精细的高程梯度计算方法，考虑了地表曲率和陡峭程度等因素，以更准确地确定流向和流量分布。该算法生成的河网比较圆滑、自然，对“平行伪河道”问题改善很多<sup>[7-9]</sup>。总的来说，DINF算法经过多年的发展和改进，逐渐成为地形分析和流域划分的重要工具之一。

本文在使用DINF算法的过程中具体做了如下处理：首先，使用 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 分辨率的数字高程模型 (DEM) 作为输入数据。DEM是一个离散的栅格数据集，其中每个栅格单元包含地表的高程信息。为解决DEM中异常凸起或下凹造成的不合理流向问题，在流向计算之前对DEM数据进行洼地填充和高地削平的处理。然后，利用DINF算法计算每个栅格单元的流向。具体而言，我们以相邻栅格的高程差值为权重来进行流量分配，为每个栅格单元确定一个8方向的流向值。最后，根据流向信息来划定流域边界。从流域的出口开始，沿着流向路径向上追踪，直到遇到流向方向发生改变，得到栅格中一组像元的汇流区域，该区域的边界即分水岭线，将分水岭线闭合后就得到了山洪沟流域的面矢量数据。

### 1.2 生成巴彦淖尔市全域面雨量数据

#### 1.2.1 获取巴彦淖尔及周边区域自动站点位置信息

要生成巴彦淖尔市全域面雨量，客观站点的选取非常重要。为保证站点分布的合理性，本文选取本市所有的区域自动站点 (180个)，以及邻近市域周边盟市的区域自动站 (90个)。如图1所示，本文所研究的重点山洪沟流域是阴山山脉乌拉特后旗段，在该区域山洪沟流域的中游和上游共建设有16个基于北斗卫星通信的区域自动气象站，雨量站点布局相对均匀。

#### 1.2.2 计算短时强降水的累计量

巴彦淖尔地区短时强降水从开始到结束，一般不会超过3 h。在保证数据信号畅通的条件下，本文使用区域自动站的分钟级数据进行任意时段的雨量累计，目的是提高雨量计算在时间上的精确性和实时性。本文通过获取区域自动站的分钟降水量，对每个站点进



图1 山洪沟流域的面矢量数据空间分布 (·: 沟口位置, ⊙: 雨量站点的位置)

Fig. 1 Spatial distribution of vector data of mountain flood gullies (·: the location of the gully mouths; ⊙: the location of the rain gauge stations)

行过程降水量的累计, 然后将巴彦淖尔全域分成若干个  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的小网格, 为每个网格中心点在周边4个象限区域内分别匹配距离最近的自动站, 且最远距离不能超过5 km, 然后将格点邻近的4个自动站的过程累计雨量进行内插(图2), 作为网格中心点的雨量计算方法为:

$$P_A = R_1 \times C_1 + R_2 \times C_2 + R_3 \times C_3 + R_4 \times C_4, \quad (1)$$

式中,  $P_A$ 表示  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的网格中心点的雨量(单位: mm);  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 表示区域自动站的雨量(单位: mm);  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 和 $C_4$ 表示自动雨量站对应的距离权重, 计算方法为:

$$C_1 = (D_2 \times D_3 \times D_4)^2 / F, \quad (2)$$

$$C_2 = (D_1 \times D_3 \times D_4)^2 / F, \quad (3)$$

$$C_3 = (D_2 \times D_1 \times D_4)^2 / F, \quad (4)$$

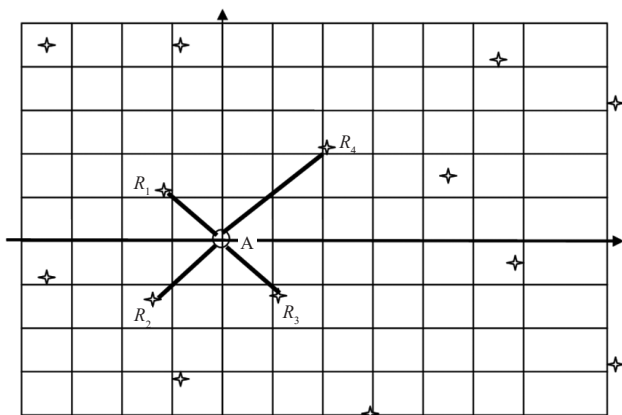


图2 网格中心点雨量插值计算

Fig. 2 Interpolation calculation of rainfall at the center of the grid

$$C_4 = (D_2 \times D_3 \times D_1)^2 / F, \quad (5)$$

$$F = (D_1 \times D_2 \times D_3)^2 + (D_1 \times D_2 \times D_4)^2 + (D_1 \times D_3 \times D_4)^2 + (D_2 \times D_3 \times D_4)^2, \quad (6)$$

式中,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_4$ 分别表示 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 区域自动站距离网格点A的距离(单位: km)。

流域内所有网格面雨量之和计算方法为:

$$T = \sum_{i=1}^n (P_{Ai} \times 10^3), \quad (7)$$

式中,  $T$ 为网格面雨量(单位:  $\text{m}^3$ );  $n$ 为流域内网格总数。

### 1.2.3 求山洪沟流域的面雨量

用山洪沟流域面矢量数据在计算机上构建一个MFC(Microsoft Foundation Classes, 微软公司提供的-一个类库)框架下的CRgn区域对象, 利用该对象的函数RectInRegion遍历所有网格点是否在该区域的边界内, 将落入该区域内的格点雨量( $\text{m}^3$ )求和再除以流域的面积, 即可得到该山洪沟流域的面雨量。当短时强降水的降雨强度远远超过裸岩石砾地的下渗能力, 即当瞬时降雨强度大于瞬时下渗强度时可以产流, 由此来判定具体暴发洪水的山沟, 以及出现洪水的大概时间。当一个流域内面雨量达到或超过某一量值时, 该流域可能发生洪水灾害, 造成冲毁农田、房屋桥梁等损失以及人员伤亡, 常把这一量值称为该流域的致灾临界面雨量(阈值), 致灾临界面雨量是山洪预警发布及采取相应预防措施的关键指标。山洪预警的具体流程如图3所示。

## 2 方法验证与初步结论

降水是导致山区洪水的直接因素和主要激发条件。本文以当地一次短时强降水天气过程引发的洪灾为例, 观察流域面雨量和山洪灾害之间的关联性。如图4所示, 2022年8月1日16时, 阴山山脉的西乌盖沟、东升庙沟流域有4个区域站发生了短时强降水, 降水持续时间约1 h, 小时雨量分别为29.6、26.7、25.4和18.5 mm。如图5所示, 将区域站点降水内插到流域内的格点上, 得到流域上的面雨量: 西乌盖沟为  $7.002 \times 10^3\text{ m}^3/\text{km}^2$ , 东升庙沟为  $9.325 \times 10^3\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。据实地观测, 这两条山洪沟口在强降水结束后的30 min均出现了洪水, 西乌盖沟的洪水量较大、维持时间较长, 冲毁了部分道路和滞洪区内的农田。东升庙虽然出现了洪水, 但由于流域内行洪能力较好, 洪水并未引发灾害。对比可知, 西乌盖沟的流域面雨量小于东升庙沟, 但洪水灾害的影响却超过东升庙沟。

通过以上个例分析, 我们注意到不同流域内不

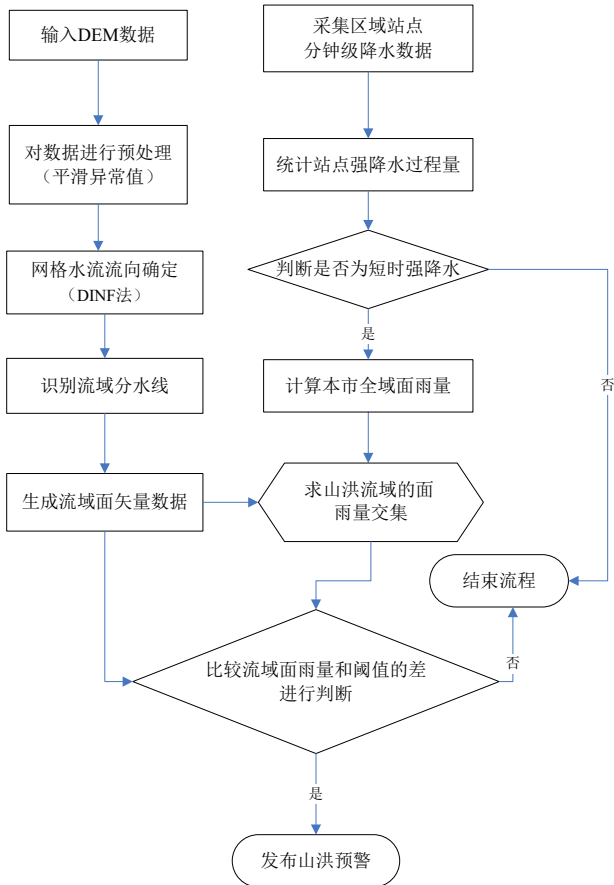


图3 山洪预警流程图

Fig. 3 Flow chart of mountainous flood warning

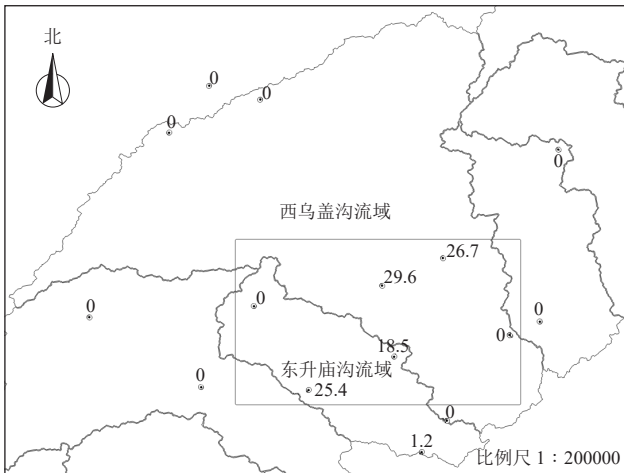


图4 站点上的短时强降水 (单位: mm)

Fig. 4 Short-time heavy rainfall at the stations (unit: mm)

同地点的致灾面雨量并不相同。致灾面雨量随前期条件如降水、土壤水分、水位的不同也会有所不同，这些条件的不断变化，使致灾面雨量也会呈现出动态变化。因此本文仅提供流域面雨量的计算方法，不对致灾面雨量临界值进行推荐，相关单位应根据当地流域

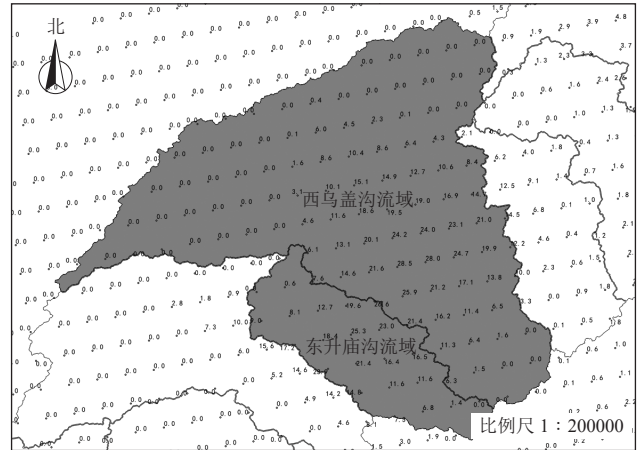


图5 插值后网格点上的降水量 (单位: mm)

Fig. 5 Rainfall on interpolated grids (unit: mm)

内的气象、水文、地理、隐患点等情况综合评估进行山洪预警的发布。

### 3 讨论

山洪是指山区小流域由降雨引起的突发的、暴涨暴落的地表径流。一般来说，溪沟流域面积小、河道调蓄能力弱、坡降较陡的区域更容易出现山洪。巴彦淖尔市地区沟壑纵横，有山洪风险的沟道较多。本文基于巴彦淖尔市阴山山脉地区复杂的地理特点提出了一种针对流域面雨量的计算方法，用于对山洪预警提供参考。本文提出的流域面雨量计算方法取决于两个关键技术，一是山洪流域边界的提取，二是网格雨量的计算。对于山洪流域的提取，本文根据巴彦淖尔地形坡度较缓的特征采用了多流向的DINF算法。首先基于高分辨率DEM数据，进行洼地填充和高地削平处理，避免产生不合理的水流方向；然后使用DINF算法计算每一个栅格的水流方向，基于山洪沟水流方向的出水口即沟口位置，搜索栅格中一组像元的汇流区域。最后利用分水岭进行实际的流域划分，形成流域面矢量数据。对于网格雨量的计算，本文基于巴彦淖尔地区自动站分布较均匀的特点，采用按距离分配权重的插值方法，先求取网格降雨量，然后将山洪沟流域面矢量和网格雨量求交集，最终计算得到流域面雨量。本文提出的一整套适用于巴彦淖尔地区地形和气象观测分布特征的流域面雨量计算方法，具有简单直观、计算量小的优势，可快速应用于对山洪风险的判断。

由于降水是水文过程中水的主要来源，因此，对降水的时空分布进行精确的测量是山洪精准预警的关键之一，而当前山洪沟流域内的区域站布设数量尚不能达到对流域面雨的精准估测。

(下转51页)

- [3] 郑石, 王冠, 林中冠, 等. 1961—2013年中国强降水特征分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 102-107.
- [4] 段鹤, 夏文梅, 苏晓力, 等. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象, 2014, 40(10): 1194-1206.
- [5] 陈鹏, 周盈颖, 冯萍, 等. 重庆短时强降水时空特征分析[J]. 气象科技进展, 2021, 11(2): 39-45.
- [6] 肖光梁, 陈传雷, 龙晓慧, 等. 辽宁省短时暴雨和大暴雨时空分布与变化特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 46-52.
- [7] 李博渊, 赵江伟, 李新豫, 等. 新疆北部暖季短时强降水的时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 34-41.
- [8] 陶局, 唐燕玲, 易笑园, 等. 近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(6): 599-607.
- [9] 吴俊杰, 郑伟鹏, 郑秀云, 等. 1980~2017年厦门地区小时尺度极端降水特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(3): 359-368.
- [10] 周雅蔓, 孙迪, 赵勇, 等. 新疆北部夏季大范围极端降水及其环流异常特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 215-224.
- [11] 陈颖, 马禹. 新疆不同等级暴雨洪涝灾害的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1515-1524.
- [12] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. 气象, 2016, 42(2): 144-155.
- [13] 仇娟娟, 何立富. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J]. 气象, 2013, 39(5): 577-584.
- [14] 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 25-32.
- [15] 许敏, 田晓飞, 任福玲, 等. 2015年冀中廊坊短时强降水的风场垂直结构特征[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 49-56.
- [16] 李德俊, 唐仁茂, 熊守权, 等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象, 2011, 37(4): 474-480.
- [17] 武文婧, 翟丹华. 基于数值模拟对重庆西部地区一次强对流天气过程的成因分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 57-63.
- [18] 赵战成. 库尔勒一次强对流大暴雨天气特征分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1070-1077.
- [19] 李爽, 丁治英, 赵欢, 等. 2014年辽宁地区一次短时暴雨过程多尺度特征分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 75-83.
- [20] 王清平, 秦贺, 程海艳, 等. 天山北坡中部一次短时暴雨的卫星反演云参数特征及成因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1580-1589.
- [21] 万瑜, 曹兴, 杨莲梅. 中亚低涡背景下中天山地区一次短时强降水过程中尺度特征[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 1-10.
- [22] 李海花, 闵月, 李校亭, 等. 昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 715-724.
- [23] 王秀英, 廖留峰, 王俊杰. 基于多元线性回归的滇西南短时强降水预报模型研究[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(2): 15-22.
- [24] 牛淑贞, 张一平, 王迪, 等. 河南省分类强对流天气概率预报方法研究与应用[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(1): 1-12.
- [25] 王金辉, 王东, 井立红, 等. 新疆南疆西部干旱地区短时强降水预报方法及指标[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 15-21.
- [26] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.

(编辑: 郑秋红)

(上接43页)

本文在方法验证阶段遇到了例证不足的困难, 主要原因是自动化标准化的山洪直接观测数据匮乏。在巴彦淖尔当地, 观测山洪的自动化设备不足, 对时间、洪量、洪峰大小的记录过度依赖于人工, 造成不同的观测者对山洪状况的描述不尽相同。还有部分山洪由于无法提前派人到沟口进行观测, 导致洪水记录缺失。因此实际能够代入系统进行验证的历史山洪个例并不多。本文针对一次有完整人工观测的山洪实例, 对西乌盖沟和东升庙沟洪水的流域面雨量计算过程进行模拟, 验证了本文所提出流域面矢量的求取方法是符合实际情况的, 对应到具体的山洪沟流域内的面雨量是可信的。未来随着水利部门在各个主要山洪沟口安装摄像头, 逐步取代人工观测, 将为短时强降水发生后山洪出现的具体时间和量级找到更加精准的对应关系, 从而提升山洪预警发布的准确性和时效性。随着观测资料的积累和完善, 未来我们会利用更多的山洪过程对本文的方法进行系统性检验。本文没有对地形和降水以外的面雨量影响因素进行分析, 原因是影响地表径流下渗的因素极其复杂, 需要结合本地实际情况具体分析。综合前人的研究和我们的实际观测, 我们发现山区降雨径流的形成受到瞬时降水强度、山体植被情况以及瞬时下渗强度等多种因素的共同影响和制约, 这是一个非常复杂的非线性过程, 给

预测山洪及洪峰出现的准确时刻, 以及洪量的大小带来了很大的难度, 因此山洪的发生和预报存在着很强的区域依赖性。比如同等降水强度下, 单位面积的裸岩石砾地要比林草地流出的水量多得多, 而阴山山脉巴彦淖尔段植被稀缺、裸岩石砾地占绝大部分山体面积, 山体持水量等下渗因素可忽略不计。

#### 参考文献

- [1] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202-209.
- [2] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007, 33(7): 15-21.
- [3] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 309-319.
- [4] Costa-Cabral M C, Burges S J. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1681-1692.
- [5] Qin C, Zhu A X, Pei T, et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007, 21(4): 443-458.
- [6] Bedient P B, Huber W C. Hydrology and Floodplain Analysis[M]. 2nd ed. Reading: Addison-Wesley, 1992.
- [7] 李宗梅, 魏锦旺, 满旺, 等. 基于D8算法和Dinf算法的水系提取研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 42-45.
- [8] 秦承志, 朱阿兴, 李宝林, 等. 基于栅格DEM的多流向算法述评[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 91-98.
- [9] 张维, 杨昕, 汤国安, 等. 基于DEM的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 94-96.

(编辑: 卢冰)