

中国山洪区划研究

陈跃红¹, 徐聪聪¹, 张晓祥¹, 张若婧¹, 马 强², 刘昌军², 任立良¹, 时开鑫¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院减灾中心, 北京 100038)

摘要: 根据水利部2020年统计结果, 中国山洪灾害伤亡人数占洪涝灾害的近70%, 已成为造成人员伤亡的主要自然灾害之一。山洪区划是进行因地制宜地实施山洪灾害防治管理的重要基础。本文在吸纳现有与山洪相关的自然地理区划成果基础上, 按照综合性与主导性、相似性和差异性以及完整性和等级性原则, 从山洪灾害的致灾因子和孕灾环境两方面构建中国山洪区划指标体系, 采用自上而下与自下而上相结合的区划思路构建了基于自组织神经网络的混合聚类方法, 制定了包含9个区划单元的中国山洪一级区划方案和33个区划单元的中国山洪二级区划方案。以1951—2015年全国历史山洪事件点调查值为基础, 利用地理探测器进行客观评价发现, 本文制定的一级和二级区划方案对历史山洪事件空间分布的解释力分别达到66.4%和75.4%, 表明本文制定的中国山洪区划方案与历史山洪事件的疏密分布规律吻合度较高。本文制定的中国山洪区划方案不仅有效刻画了山洪的地区分异规律, 而且为实行因地制宜的山洪灾害防治减灾措施提供了科学依据, 有利于推动中国山洪灾害预警预报与防治管理事业的稳健发展。

关键词: 区划; 山洪灾害; 短历时强降雨; 下垫面; 机器学习; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202305001

1 引言

中国地域辽阔, 地表要素空间分异显著, 对其进行地理区划一直是地理学的核心研究工作和基础内容^[1-3]。地理区划是研究地表要素在区域内的相似性与区域间的差异性, 通过区域单元的划分组合, 得到地表要素的同质性区划单元, 为资源有序开发、产业合理布局、社会经济建设和可持续发展提供科学指导^[4-6]。

山洪是山丘区因短历时强降雨诱发在特殊的下垫面下形成的急涨急落地表径流, 常造成环境破坏、财产损失和人员伤亡的灾害^[7-9]。山洪灾害是多要素共同作用的地域综合体, 具有显著的空间分异特征^[10-13]。中国地形复杂、暴雨多发、气候多样, 山洪灾害频繁发生^[14-16]。根据水利部官方多年统计, 中国山洪灾害伤亡人数占洪涝灾害的近70%, 已成为造成人员伤亡的主要自然灾害之一^[17]。因此, 开展山洪区划研究是山洪灾害防治管理的重要内容和迫切需要, 不仅能有效刻画山洪发灾的空间分异格局, 还有利于为缺资料

收稿日期: 2022-08-29; 修订日期: 2023-02-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510601); 广西省重点研发计划(2019AB20003); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-17) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2019YFC1510601; Key R&D Program of Guangxi Province, No.2019AB20003; Water Resources Science Technology Program of Hunan Province, No.XSKJ2019081-17]

作者简介: 陈跃红(1987-), 男, 四川遂宁人, 副教授, 中国地理学会会员(S110013005M), 主要从事地理大数据与空间智能研究。E-mail: chenylh@lreis.ac.cn

通讯作者: 张晓祥(1979-), 男, 江苏南通人, 教授, 主要从GIS空间分析与建模和数字孪生流域研究。

E-mail: xiaoxiang@hhu.edu.cn

地区山洪预报预警模型的参数区域化移用提供参考,进而为山洪灾害实施“分而治之”的防治和管理提供科学依据^[7, 9, 15, 18]。

山洪区划属于地理区划的研究内容之一^[7, 19-21],目前学界在综合自然区划^[1, 5, 22]、地貌区划^[23-24]、土壤区划^[25-26]、气候区划^[27-28]、生态区划^[29-31]、水文区划^[32-33]和洪水区划^[14, 34]等地理区划开展了大量研究,在山洪区划方面也取得了诸多成果。如,针对山洪的分布特征,1996年赵士鹏^[20]制定了中国的山洪灾害特征一致性区划图。针对山洪灾害的防治管理,2006年张平仓等^[7]制定了中国的山洪灾害防治区划。这些全国尺度的山洪区划成果为山洪灾害的防灾减灾发挥了重要作用,然而既有的山洪区划由于观测资料的局限性划分出的区划单元界线相对粗略且区划单元数量有限,如中国的山洪灾害特征一致性区划图仅6个区划单元^[20]。同时,随着全球气候变化的加剧和城市化的深入,影响山洪灾害的地表要素发生了剧烈变化,亟待利用当前丰富的对地观测资料对山洪区划进行完善和更新^[4, 21]。此外,中国政府近年来愈发重视山洪灾害问题,调查了1951—2015年期间的历史山洪事件,为更新和制定中国山洪区划方案提供了全面可靠的基础数据^[8, 9, 12, 35]。

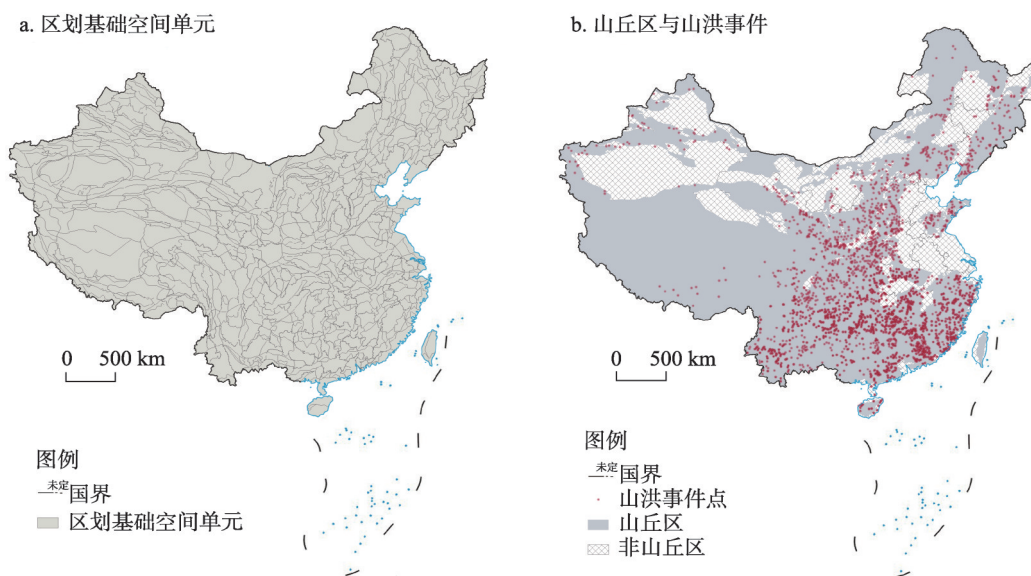
鉴于此,本文面向山洪预警预报与防治管理需求,综合考虑山洪灾害的致灾因子和孕灾环境两方面的影响因素,构建中国山洪区划的原则、依据和理论框架,运用最新的山洪相关数据,制定中国山洪的一级和二级区划方案。

2 山洪区划的原则与依据

与其他地理区划目标类似^[1, 2, 23, 26, 30, 32],山洪区划的目标需研究不同区域的山洪空间分异特征,构建一个具有等级、层次差异的完整体系,在各层级内划分成具有区域内相似性、区域间差异性的空间单元,为山洪灾害防灾减灾管理提供科学依据^[7, 20-21]。基于该目标,中国山洪区划需遵循一定的原则,依照相应的依据。

借鉴既有与山洪相关的地理区划成果^[7, 20, 23, 26-27, 32, 36],本文在进行山洪区划时考虑3个方面原则:① 综合性与主导性原则;② 相似性和差异性原则;③ 完整性和等级性原则。因山洪的形成是降雨和地形地貌等多要素的综合作用结果,需考虑其综合性,而在一级和二级区划中需考虑不同的侧重,本文从孕灾环境和致灾因子的区域分异尺度差异角度考虑,以区域分异尺度较大的地形地貌作为一级区划的主导因素,以区域分异尺度较小的降雨作为二级区划的主导因素。相似性和差异性原则要求山洪区划单元内部的要素需尽量相似,区划要素在区划单元之间则需有较明显的差异性。完整性和等级性原则要求考虑到山洪特征类型的全面性和空间上的连续性和完整性,且不同等级之间的区划单元需有明确的所属和包含关系。

中国三级阶梯^[37]、地貌区划^[23]、地形区划^[36]体现了山洪孕灾环境的空间分异,流域区划^[37]、水文区划^[32]体现了山洪水文情势地域上的分异规律,气候区划^[27]反映了气候分布规律对山洪区域性的影响,土壤区划^[26]也呈现出土壤质地地带性分布对山洪空间分异的影响,故中国山洪区划将这些区划作为依据。借鉴李旭旦提出的“界线束”方法^[3],通过对这7种区划依据的空间叠加,以保留各类区划的边界特征,再将细碎图斑合并到相邻大图斑,生成中国山洪区划的基础空间单元(图1a)。山丘区是山洪发生的主要区域^[38],为将山洪与非山洪形式的洪涝进行区分,本文仅利用中国山丘区(图1b)内的基础空间单元进行中国山洪区划。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 中国山洪区划的基础空间单元和山丘区范围

Fig. 1 The basic spatial unit and mountainous area of the flash flood regionalization in China

3 山洪区划的理论框架

3.1 山洪区划指标体系

山洪孕灾环境的区域分异尺度往往大于山洪的致灾因子,根据综合性和主导性原则,一级山洪区划主要考虑孕灾环境,即以地形地貌为主导因素,二级山洪区划主要考虑致灾因子,即以短历时强降雨为主导因素,以便于在区划结果中能够快速识别出山洪的不同等级与主导因素的影响^[7, 9, 20]。

诸多研究表明区域下垫面条件直接作用于地表径流的汇流条件,对山洪的形成起着重要影响^[8, 11-12, 21]。坡度大、切割深的地区,地表汇流速度快,时间短,径流损失小,多为山洪易发区域。故要考虑影响山洪的地形起伏、地貌类型等下垫面条件。山洪的孕灾环境是指相对稳定的下垫面条件,其对山洪的产、汇流过程有重要影响。地形地貌下垫面环境是形成山洪的内在条件,不仅为山洪的发生提供成灾空间,也为滑坡,泥石流的形成提供了物质来源。因此,山洪一级区划选取山洪孕灾环境相关的19个下垫面指标,如表1所示。

大量研究表明短历时强降雨是山洪灾害的致灾因子,是引发山洪的直接诱因,主要是在短时期内连续的高强度暴雨累积,加快了地表径流的形成,进而使得山区河流水位上涨,从而导致山洪的发生^[8, 11-12, 21]。由于雨量、雨强和降雨时长都密切影响着山洪的形成,因此,本文在一级区划的约束下,选择短历时强降水作为山洪二级区划的主导因素,按照降雨的时段长短、频率高低构建了不同等级下的降雨指标,用以研究不同时段、不同频率的降雨对山洪灾害的影响情况。综合考虑降雨数据的可靠性,选择ERA5卫星降水再分析产品,采用皮尔逊III(P-III)曲线^[39],计算不同时段不同频率降水设计值,得到最大1 h、3 h、6 h、12 h、24 h不同频率的31个降雨指标,如表1所示。

表 1 中国山洪区划指标体系

Tab. 1 Indicator system of the flash flood regionalization in China

指标类型	指标名称	指标描述	指标来源
下垫面	高程	区域平均海拔高度(90 m×90 m 栅格)	SRTM3 V4.1 数据 (https://srtm.csi.cgiar.org/)
	高差	区域最大和最小高程之差(90 m×90 m 栅格)	
	坡度	根据高程数据计算得到(90 m×90 m 栅格)	
	流域相对高程	基于高程数据计算的最近河道的高程(90 m×90 m 栅格)	MERIT Hydro (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_Hydro/)
	植被指数	小流域内年度植被指数的平均值(1 km×1 km 栅格)	2015 年度中国植被指数 (https://www.resdc.cn/)
	平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地、极大起伏山地的占比	根据地貌图集计算区域内 7 个地貌类型的占比(1 km×1 km 栅格)	《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》 (https://www.resdc.cn/)
	耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地、海洋占比	根据土地利用数据计算区域内 7 个土地利用类型的占比(1 km×1 km 栅格)	2020 年中国土地利用数据(1 km) (https://www.resdc.cn/)
降雨	100 a、50 a、20 a、5 a、2 a 一遇最大 1 h 降雨量	基于 ERA5 卫星降水再分析产品，采用皮尔逊 III(P-III)曲线 ^[39] ，计算不同时段不同频率降水设计值，得到最大 1 h、3 h、6 h、12 h、24 h 不同频率的 25 个降雨指标(0.25°×0.25°栅格)	ERA5 卫星降水再分析产品 (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form)
	100 a、50 a、20 a、5 a、2 a 一遇最大 3 h 降雨量		
	100 a、50 a、20 a、5 a、2 a 一遇最大 6 h 降雨量		
	100 a、50 a、20 a、5 a、2 a 一遇最大 12 h 降雨量		
	100 a、50 a、20 a、5 a、2 a 一遇最大 24 h 降雨量		
	最大 1 h、3 h、6 h、12 h、24 h 降雨量均值	基于 ERA5 卫星降水再分析产品，统计计算出不同小时级的 5 个降雨均值指标(0.25°×0.25°栅格)	
	年均降雨量	基于 ERA5 卫星降水再分析产品，统计年均降雨指标(0.25°×0.25°栅格)	

3.2 山洪区划方法

本文采用自下而上合并和自上而下划分结合的区划思路，借鉴研究组先前的研究^[21]，构建图 2 所示的中国山洪区划方法，主要包括以下 6 个步骤。

- (1) 数据预处理。处理用于山洪一级区划的地形地貌下垫面指标和用于二级区划的短历时强降雨相关的降水指标，并根据山洪区划依据生成山洪的区划基础单元，选取山丘区内的基础空间单元用于中国山洪区划，最后利用历史山洪事件点（图 1b）生成山洪事件强度空间分布用于后续分析。
- (2) 选取下垫面和降雨关键因子。由于下垫面和降雨指标众多，指标中存在冗余和干扰的信息，利用随机森林定量化选取影响山洪一级和二级区划的关键因子。
- (3) 构建基于自组织映射神经网络（Self-Organizing Map, SOM）的混合聚类模型。综合运用 SOM 和层次聚类（Ward）各自的优势，以 SOM 进行一阶段聚类，然后对其结

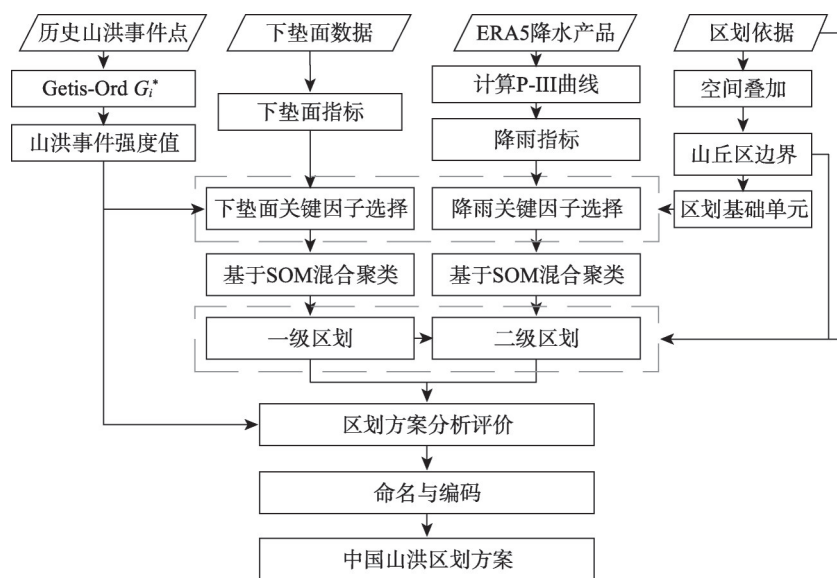


图2 中国山洪区划方法流程

Fig. 2 The flash flood regionalization method in China

果利用 Ward 进行二阶段聚类, 分别对山丘区内的基础空间单元进行山洪一级和二级关键因子的聚类, 得到中国山洪区划的初始聚类结果。

(4) 确定山洪区划单元界线。首先, 利用聚类有效性指标对不同聚类数的基于 SOM 混合聚类结果进行评价, 选取最优的聚类结果, 并对相邻的同类空间单元进行合并。其次, 对聚类结果中存在少量碎小斑块, 计算各空间单元的面积变异系数及其一阶差分, 实现碎小斑块的合并。最后, 根据中国主要山脉^[40]、山丘区边界和山洪区划依据对区划界线进行自上而下的控制和修正。对于二级区划, 结合一级区划边界和山洪的区划依据进行后处理修正。

(5) 分析和评价山洪区划方案。根据一级和二级区划结果, 分析各区划单元分布的特征。同时, 根据中国历史山洪事件点运用地理探测器对山洪一级、二级区划结果进行评价。

(6) 命名与编码中国山洪区划方案。根据上述分析和评价结果, 按照国家标准对中国山洪一级和二级区划方案进行命名与编码。

3.2.1 山洪区划数据预处理 针对以地形地貌为山洪一级区划的主导要素, 预处理得到 19 个下垫面指标。针对以短历时强降雨为山洪二级区划的主导要素, 基于 1979—2020 年 ERA5 卫星降水再分析产品, 采用皮尔逊 III (P-III) 曲线^[39], 计算不同时段不同频率的 31 个降水指标。根据山洪相关的七种区划依据, 通过空间叠加生成山洪的区划基础空间单元。对山丘区内的基础空间单元, 分别计算 19 个下垫面指标与 31 个降雨指标在各区划基础单元上的均值, 用于后续分析。根据历史山洪事件点, 利用 Getis-Ord G_i^* 工具, 生成山洪事件强度空间分布, 用于下垫面和降雨关键因子的选取。

3.2.2 山洪区划关键因子选择 常用的主成分特征选择方法通过线性变换提取主要特征变量, 但并不能较好的保留数据信息且对最终降维得到的数量不能很好的估计^[21]。近年来, 通过基于随机森林的特征选择, 可以找到与历史山洪事件相关性强的关键因子, 以数量较少的特征来预测因变量^[21]。因此, 本文利用随机森林算法的特征重要性方法来实现区划关键因子选择。根据历史山洪事件点数据, 首先训练随机森林模型, 利用袋外样

本数据测试模型中每棵树的袋外误差,用于确定指标的重要性。本文选择指标的重要性值超过所有指标重要性均值的指标作为关键因子,用于区划的聚类过程。根据随机森林模型结果,从19个下垫面指标中选出了12个关键因子用于山洪一级区划,包括高程、坡度、高差、流域相对高程、中起伏山地占比、小起伏山地占比、平原占比、林地占比、耕地占比、建设用地占比、植被指数。从31个降雨指标中选出了10个关键因子用于二级区划,包括100 a一遇最大1 h降雨量、100 a一遇最大6 h降雨量、50 a一遇最大1 h降雨量、5 a一遇最大24 h降雨量、2 a一遇最大1 h降雨量、2 a一遇最大24 h降雨量、年均降雨量、最大1 h降雨均值、最大12 h降雨均值、最大24 h降雨均值。

3.2.3 中国山洪区划的混合聚类模型 SOM是一种人工神经网络,它将多维数据点映射到低维空间中,相似的区划基础单元可被投影到地图上附近的神经元上^[41]。SOM由两层网络组成,输入层中的神经元个数为用于山洪区划的关键指标数量,输出层被组织成二维网格的拓扑结构。SOM首先用神经元的权重向量 W_c ,计算输入向量与神经的最小距离来确定每个输入的获胜神经元,如式(1)所示:

$$|X_k - W_c| = \min_j (d_{jk}) \quad (1)$$

式中: X_k 是输入向量; d_{jk} 是输入向量与神经元的距离。

然后更新获胜神经元及其周围神经元的权重向量,如式(2)所示:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t)(x_i - w_{ij}(t)) \quad (2)$$

式中: $\eta(t)$ 为增益函数, $0 < \eta(t) < 1$,随着时间逐渐减小; t 是迭代步长; w_{ij} 是位于二维网络 (i, j) 位置的神经元的权重。

随着持续的自适应过程,算法递归收敛,其中相似的区划基础单元将链接到输出层的相邻区域。

Ward层次聚类法又称离差平方和法^[42],是层次聚类汇总比较成熟的算法,也是区划研究中常使用到的聚类算法,能够强调区域内的一致性和区域间的差异性,以体现区划研究的核心。Ward对于区域中每个基本空间单元初始时自成一类,再计算类重心间方差,首先合并离差平方和增加幅度最小的两类,再逐级进行自下而上合并。假定已经将 n 个SOM输出层节点分成了 k 类 G_1, G_2, \dots, G_k ,则 G_i 中SOM输出层节点的离差平方和如式(3)所示:

$$S_i = \sum_{i=1}^{n_i} (x_{ii} - \bar{x}_i)(x_{ii} - \bar{x}_i) \quad (3)$$

全部类内部离差平方和如式(4)所示:

$$S = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{ij} - \bar{x}_i) \quad (4)$$

式中: S_i 是类别 G_i 的离差平方和; n_i 是类别 G_i 中SOM输出层节点的个数; x_{ii} 表示 G_i 中的第 i 个SOM输出层节点的山洪关键因子向量; \bar{x}_i 是类别 G_i 的重心; k 是类别数量。

3.2.4 山洪区划界线划定 因聚类需进行参数优选,且其结果往往存在碎屑多边形等,不满足区划单元连续性的要求,无法直接作为区划结果。因此,需对聚类结果进一步优选,并对优选的聚类结果进行后处理。最后,结合主要山脉、山丘区边界和7种山洪区划依据对聚类结果进行自上而下的控制和修正,以划定最终的中国山洪区划界线,使最终的中国山洪区划方案符合山洪要素的空间分异规律。聚类有效性指标常用来判断聚类结果的质量和寻找最佳聚类数,主要包括外部与内部有效性指标^[43]。外部有效性指标只有当数据集外部信息可用时,通过比较聚类结果的类别与已知标签的匹配度来评价,而

内部有效性指标主要从类内的紧致度与类间的分离度来评价聚类结果的结构信息,从而确定最佳聚类数。本文选用DBI (Davies-Bouldin Index) ^[44]作为内部评价指标,利用外部聚类效果指数CQI (Clustering Quality Index) ^[45]对区划类别进行筛选,以类别数量作为惩罚项,叠加区域山洪关键因子的平均变异系数,来判断最佳聚类数量。因此本文通过DBI和CQI两个聚类有效性指标初步选择出最佳聚类结果。

DBI用来描述类内距离之和与类外距离之比,较低的值将意味着聚类更好,定义如式(5)所示:

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \left(\frac{\bar{d}_i + \bar{d}_j}{d_{ij}} \right) \quad (5)$$

式中: k 是聚类数; \bar{d}_i 、 \bar{d}_j 分别是第 i 、 j 个聚类中每个模式与该聚类质心之间的平均距离; d_{ij} 等于第 i 个和第 j 个质心之间的距离。

CQI综合考虑了每个空间单元的山洪灾害关键因子,以期在同类别山洪灾害关键因子差异最小化的前提下计算得到最合适的区划类别数量,定义如式(6)所示:

$$CQI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K n_i \sum_{j=1}^P CV_i^j + \delta K \quad (6)$$

式中: N 是基础空间单元总体数量; K 是类别数; P 是山洪灾害关键因子数; n_i 是类别 i 的基础空间单元数量; CV_i^j 是类别 i 中 j 山洪灾害关键因子的变异系数; δ 是用来控制数量级的常数项。

对于聚类结果中的碎小斑块,计算各个区域面积的变异系数及其一阶差分,通过ArcGIS中的Eliminate工具将其进一步合并到具有最长公共边界的相邻区域内。

3.2.5 中国山洪区划评价 地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法^[46]。地理探测器的因子探测被广泛用于揭示地表要素空间分异特征^[11, 46-47],因此用其评价分析山洪区划方案对历史山洪事件空间分异的解释力^[21]。借鉴文献^[12, 21],首先利用Getis-Ord G_i^* 热点分析工具,计算得到历史山洪事件热点的空间分布高低值(Z 值),将其作为因变量,然后利用山洪区划方案的区划单元作为自变量,利用地理探测器的因子探测分析出山洪区划对历史山洪事件空间分布的解释力大小的 q 值,如式(7)所示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为山洪区划的单元个数; N_h 为层 h 的单元数; N 为全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为山洪事件热点在层 h 和全区的方差; SSW 为层内方差之和; SST 为全区总方差。 $q \in [0, 1]$, q 值越大区划对山洪事件空间分异的解释力越强;反之越弱。

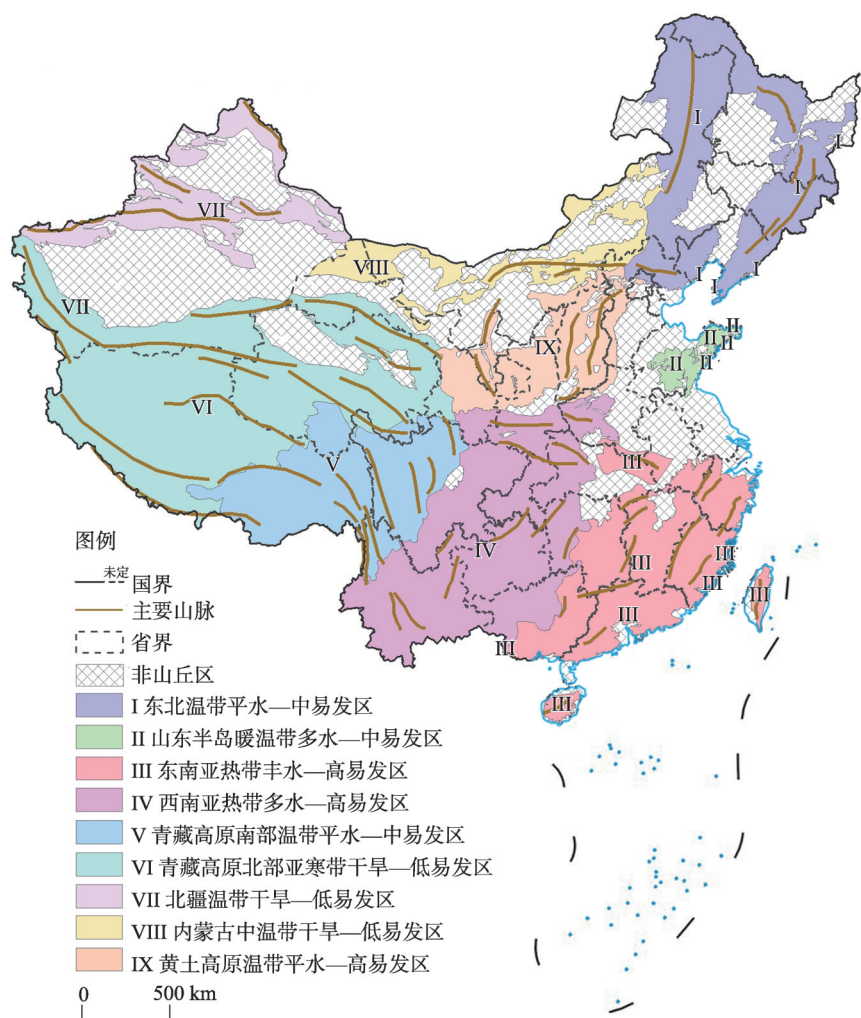
3.2.6 山洪区划命名与编码 中国山洪区划设计了两个层级的区划体系,一级区划为“区”,二级区划为“地区”。为保证区划单元命名的规范化与标准化,两个等级的山洪区划单元命名主要遵循以下原则:① 体系山洪区划方案的层级特征,标识出各个区划单元的主要特点;② 反映出山洪区划方案层级之间的对应关系,既要体现出不同层级的隶属或关联关系,又要显示同一级别各个区划单元之间特征递变规律;③ 要具有明确的地理信息标识,明确必要的自然背景及管理的侧重信息。在遵循上述原则的命名,可以更加直观地帮助了解基础的地理信息,以便山洪区划方案更好地服务于后续山洪灾害防治管理及推广。本文针对山洪一级区划的命名综合考虑地理位置、气候^[27]、水量信息^[32]和以

历史山洪事件密度刻画的易发性，制定“地理位置+气温带+水量+易发性”的范式。二级区划命名在一级区划层级下反映主要的地理位置，编码顺序是从东北方向开始，以顺时针方向顺序编码命名。

为配合命名体系以及便于计算机处理分析、数据库管理、制图综合等多方面的需求，参考《信息分类和编码的基本原则与方法》(GB/T7027-2002) 确定了中国山洪区划的编码方式。山洪一级区划对应大写罗马字母，山洪二级区划对应大写英文字母。

4 中国山洪区划方案

遵循中国山洪地域分异规律和特点，以区划原则为指导思想，根据区划依据和理论框架，首先确定区划的基础空间单元，并构建区划指标体系，再采用区划方法，将定性分析与定量计算相结合，制定出中国山洪一级（图3、表2）和二级区划方案（图4）。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 中国山洪一级区划

Fig. 3 The first-grade regionalization scheme of flash flood in China

表2 中国山洪一级区划基本情况

Tab. 2 The basic information of the first-grade flash flood regionalization in China

区代码	名称	面积(万 km ²)	空间范围
I	东北温带平水—中易发区	89.9	该区域为大兴安岭中低山，小兴安岭低山，长白山中低山地，燕山辽西中低山。
II	山东半岛暖温带多水—中易发区	7.4	该区域主要是山东半岛低山。
III	东南亚热带丰水—高易发区	88.6	该区域主要分布在东南山地丘陵。东部为浙闽低中山、粤闽中低起伏山和台湾低山，北部为大别山中低山，中部包括湘赣小起伏低山丘陵，西部为湘东中低山地，南部为粤桂低山和海南岛。
IV	西南亚热带多水—高易发区	125.3	该区域北部为秦巴中低山区，中部为川渝鄂低山丘陵区，南部为云贵高原和桂西北部中低山丘区。
V	青藏高原南部温带平水—中易发区	75.4	该区域位于青藏高原的南部地区，东部为川西高原和横断山脉，西部为藏东高山区。
VI	青藏高原北部亚寒带干旱—低易发区	176.6	该区域位于青藏高原的北部地区，北部为南疆阿尔金山和昆仑山高山区，东部主要为青海的大部分高山区，南部主要是喜马拉雅山极大起伏高山区，西部主要为喀喇昆仑山脉大起伏极高山区。
VII	北疆温带干旱—低易发区	41.1	该区域位于北疆高山区，北部主要为阿尔泰高山区，南部主要为天山高山地区。
VIII	内蒙古中温带干旱—低易发区	33.4	该区域位于内蒙古山丘区，东部主要为阴山山脉地区，西部为内蒙古西部低山地区。
IX	黄土高原温带平水—高易发区	45.4	该区域位于黄土高原区域，东部主要为太行山地区，西部主要为贺兰山和六盘水地区。

4.1 一级区划

首先，运用随机森林模型对中国山洪一级区划的地形地貌指标中筛选山洪区划的关键因子，定量化地确定山洪一级区划的指标，避免了传统区划中依靠经验选择指标进行指标分级区划的主观性偏差。其次，以山丘区内的基础空间单元为对象进行基于SOM混合聚类，并根据聚类有效性指标确定最佳聚类方案和中国山洪一级区划的初步结果。然后，结合中国主要山脉、山丘区边界和山洪区划依据，对山洪区划初步结果进行地形地貌空间分异规律的控制与修正。最终，得到图3所示的9个中国山洪一级区划单元：I东北温带平水—中易发区、II山东半岛暖温带多水—中易发区、III东南亚热带丰水—高易发区、IV西南亚热带多水—高易发区、V青藏高原南部温带平水—中易发区、VI青藏高原北部亚寒带干旱—低易发区、VII北疆温带干旱—低易发区、VIII内蒙古中温带干旱—低易发区、IX黄土高原温带平水—高易发区，各区划单元的基本情况如表2所示。

4.2 二级区划

首先选取山洪二级区划主导因素的短时强降雨指标，其次基于SOM混合聚类确定最佳聚类方案和山洪二级区划的初步结果，最后在一级区划和山洪区划依据的约束下，采取自上而下与自下而上相结合的思路得到33个中国山洪二级区划（图4）。一级区划中的I东北温带平水—中易发区被细分为6个二级地区、II山东半岛暖温带多水—中易发区未进一步细分、III东南亚热带丰水—高易发区被细分为4个二级地区、IV西南亚热带多水—高易发区被细分为6个二级地区、V青藏高原南部温带平水—中易发区被细分为3个二级地区、VI青藏高原北部亚寒带干旱—低易发区被细分为4个二级地区、VII北疆温带干旱—低易发区被细分为4个二级地区、VIII内蒙古中温带干旱—低易发区被细分为2个二级地区、IX黄土高原温带平水—高易发区被细分为3个二级地区。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1585号标准地图制作,底图边界无修改。

图4 中国山洪二级区划

Fig. 4 The second-grade regionalization scheme of flash flood in China

5 讨论

5.1 最佳聚类方案的优选

参考现有各类自然地理区划方案一、二级区划中的区划单元数量,本文在聚类时对中国山洪区划的一级区划初始设置聚类数量由3类逐渐增加到15类,二级区划初始设置

聚类数量由21类逐渐增加到50类，并对每个聚类结果计算对应的CQI和DBI（图5）。从图5可以看出，一级和二级区划聚类结果的CQI随着聚类数量的增加均呈现先降低后升高的趋势，一级和二级区划分别在聚类数量为9和33的聚类结果时，CQI取得最小值，即认为当聚类别数为9类和33类时，一级和二级区划的基于SOM混合聚类取得了最佳结果。同时，根据图5中的内部有效性指标DBI也发现一级和二级区划在聚类数量在9类和33类时取值较小。因此，本文选取聚类数量为9类的聚类结果作为中国山洪一级区划的初步结果，选取聚类数量为33类的聚类结果作为中国山洪二级区划的初步结果。

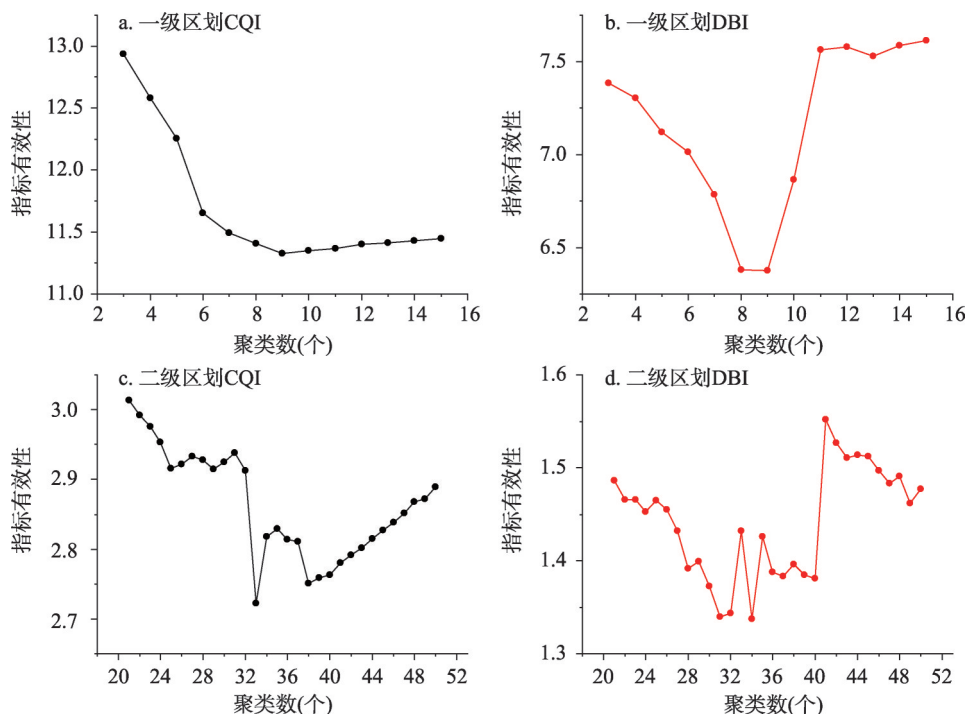


图5 聚类有效性指标

Fig. 5 Clustering validity indices

5.2 中国山洪区划方案评价与分析

利用“全国山洪灾害调查评价项目”调查的1951—2015年以来发生的历史山洪事件点^[12, 35, 38]，对本文制定的中国山洪一级、二级区划进行评价。运用公式(7)中地理探测器的因子探测分别计算出中国山洪一级和二级区划对历史山洪事件的解释力 q 值分别为66.4%和75.4%，表明本文制定的中国山洪区划方案与中国历史山洪事件的疏密分布规律吻合度较高。

从图3可见，中国山洪一级区划的I、II和III区划单元位于第一级阶梯内，V和VI两个单元位于第三级阶梯内，其余四个单元位于第二级阶梯内，且一级区划的界线与中国三级阶梯界线吻合度较高。同时，区划单元IV和IX以秦岭分界，V和VI的分界以高大山脉界划分，各区划单元内均包含了较为完整的主要山脉。由此表明本文制定的中国山洪一级区划方案与山洪孕灾的地形地貌环境分异规律较为一致，进一步从孕灾环境的分异角度说明了其实际的含义。从图4可见，中国山洪二级区划根据山洪致灾的降雨因子在各一级区划单元内将不同密度的历史山洪事件划分开。如，III区划单元中的III-B和III-C两个子区与另外子区的山洪触发的降雨分异规律明显不同，且III-B和III-C两个子

区的界线将不同疏密分布的历史山洪事件进行了较好区分,表明本文制定的中国山洪二级区划从致灾因子的空间分异角度比较合理地确定了区划的界线。

6 结论

本文面向山洪灾害预警预报与防治管理的迫切需求,以现有的与山洪密切相关的中国三级阶梯、地貌区划、地形区划、流域区划、水文区划、气候区划、土壤区划作为中国山洪区划依据,充分考虑了综合性、主导性、相似性、差异性、完整性和等级性的山洪区划原则,从山洪灾害的致灾因子和孕灾环境两方面构建了中国山洪区划的指标体系,采用了自上而下与自下而上相结合的区划思路并构建了基于自组织神经网络的混合聚类方法,制定了包含9个区划单元的中国山洪一级区划方案和33个区划单元的中国山洪二级区划方案。利用1951—2015年的全国历史山洪事件数据客观评价发现,本文制定的中国山洪区划方案对历史山洪事件的分布解释力较强且与历史山洪事件的疏密分布规律吻合度较高。

本文制定的中国山洪区划方案分别从下垫面和降雨角度刻画了山洪的地区分异规律,不仅有助于在中国因地制宜地部署山洪预报预警模型及其参数区域化移用,而且有利于制定合理的中国山洪灾害防灾减灾措施和推动中国山洪灾害防治管理事业的稳健发展。

参考文献(References)

- [1] Zheng Du, Ou Yang, Zhou Chenghu. Understanding of and thinking over geographical regionalization methodology. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(6): 563-573. [郑度, 欧阳, 周成虎. 对自然地理区划方法的认识与思考. *地理学报*, 2008, 63(6): 563-573.]
- [2] Ren Meie, Yang Renzhang. Natural regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 27: 66-74. [任美铔, 杨纫章. 中国自然区划问题. *地理学报*, 1961, 27: 66-74.]
- [3] Lee S T. Delimitation of the geographic regions of China. *Annals of the Association of American Geographers*, 1947, 37 (3): 155-168.
- [4] Zheng Du, Wu Shaohong, Yin Yunhe, et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1475-1483. [郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿. *地理学报*, 2016, 71(9): 1475-1483.]
- [5] Liu Yanhua, Zheng Du, Ge Quansheng, et al. Understanding of some problems in the study of comprehensive regionalization in China. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 321-329. [刘燕华, 郑度, 葛全胜, 等. 关于开展中国综合区划研究若干问题的认识. *地理研究*, 2005, 24(3): 321-329.]
- [6] Gao Jiangbo, Huang Jiao, Li Shuangcheng, et al. The new progresses and development trends in the research of physio-geographical regionalization in China. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1400-1407. [高江波, 黄姣, 李双成, 等. 中国自然地理区划研究的新进展与发展趋势. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1400-1407.]
- [7] Zhang Pingcang, Ren Hongyu, Hu Weizhong, et al. An elementary study on Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 196-200. [张平仓, 任洪玉, 胡维忠, 等. 中国山洪灾害防治区划初探. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 196-200.]
- [8] Xiong Junnan, Li Jin, Cheng Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1374-1391. [熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素. *地理学报*, 2019, 74(7): 1374-1391.]
- [9] Guo Liang, Ding Liuqian, Sun Dongya, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(9): 1123-1136. [郭良, 丁留谦, 孙东亚, 等. 中国山洪灾害防御关键技术. *水利学报*, 2018, 49(9): 1123-1136.]
- [10] Wang N, Lombardo L, Tonini M, et al. Spatiotemporal clustering of flash floods in a changing climate (China, 1950-2015). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(7): 2109-2124.

- [11] Zhang Ruoqing, Chen Yuehong, Zhang Xiaoxiang, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi province analyzed by optimal parameters- based geographical detector. *Geography and Geo-information Science*, 2021, 37(4): 72-80. [张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(4): 72-80.]
- [12] Liu Yesen, Yang Zhenshan, Huang Yaohuan, et al. Spatio-temporal evolution pattern and driving factors of mountain torrents in China since the founding of the People's Republic of China. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(2): 408-420. [刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(2): 408-420.]
- [13] Fang Xiuqin, Wang Kai, Ren Liliang, et al. Risk assessment and zoning of mountain torrent disaster based on GIS in Jiangxi province. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1): 111-116. [方秀琴, 王凯, 任立良, 等. 基于GIS的江西省山洪灾害风险评价与分区. *灾害学*, 2017, 32(1): 111-116.]
- [14] Zhou Chenghu, Wan Qing, Huang Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 15-24. [周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于GIS的洪水灾害风险区划研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 15-24.]
- [15] Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 87-94. [唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划. *地理学报*, 2005, 60(1): 87-94.]
- [16] Yao J, Zhang X X, Luo W C, et al. Applications of Stacking/Blending ensemble learning approaches for evaluating flash flood susceptibility. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102932. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102932.
- [17] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China has entered the flood season at present and local areas have caused flood disasters. 2020- 06- 14. http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2019ztbd/2019fxkh/mtgz/202006/t20200614_1408327.html. [中华人民共和国水利部. 当前我国已经全面进入汛期局部地区发生了洪涝灾害. 2020-06-14. http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2019ztbd/2019fxkh/mtgz/202006/t20200614_1408327.html.]
- [18] Liu Changjun, Zhou Jian, Wen Lei, et al. Research on spatio temporally- mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(1): 99-114. [刘昌军, 周剑, 文磊, 等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(1): 99-114.]
- [19] Zhao Shipeng. An integration of GIS and analytical models for evaluation of disasters caused by mountain torrents. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5): 471-479. [赵士鹏. 基于GIS的山洪灾情评估方法研究. *地理学报*, 1996, 51(5): 471-479.]
- [20] Zhao Shipeng. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in China and its hazard regionalization. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(3): 93-99. [赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究. *自然灾害学报*, 1996, 5(3): 93-99.]
- [21] Zhang R J, Chen Y H, Zhang X X, et al. Mapping homogeneous regions for flash floods using machine learning: A case study in Jiangxi province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 108: 102717. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102717.
- [22] Guo Ziliang, Cui Guofa. The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1284-1294. [郭子良, 崔国发. 中国自然保护综合地理区划. *生态学报*, 2014, 34(5): 1284-1294.]
- [23] Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Li Bingyuan, et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 839-856. [程维明, 周成虎, 李炳元, 等. 中国地貌区划理论与分区体系研究. *地理学报*, 2019, 74(5): 839-856.]
- [24] Li Bingyuan, Pan Baotian, Cheng Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 291-306. [李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论. *地理学报*, 2013, 68(3): 291-306.]
- [25] Gong Zitong, Chen Zhicheng, Luo Guobao, et al. Reference for soil systematic classification in China. *Soils*, 1999, 31(2): 57-63. [龚子同, 陈志诚, 骆国保, 等. 中国土壤系统分类参比. *土壤*, 1999, 31(2): 57-63.]
- [26] Xi Chengfan, Zhang Junmin. The soil regions of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(2): 97-109. [席承藩, 张俊民. 中国土壤区划的依据与分区. *土壤学报*, 1982, 19(2): 97-109.]
- [27] Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12. [郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.]
- [28] Qin Aimin, Qian Weihong, Cai Qinbo. Seasonal division and trend characteristic of air temperature in China in the last

- 41 years. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2005, 25(4): 338-345. [秦爱民, 钱维宏, 蔡亲波. 1960—2000 年中国不同季节的气温分区及趋势. *气象科学*, 2005, 25(4): 338-345.]
- [29] Zheng Du. *Ecogeographical Regional System in China*. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [30] Fu Bojie, Liu Guohua, Chen Liding, et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6. [傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.]
- [31] Bailey R G. Identifying ecoregion boundaries. *Environmental Management*, 2004, 34(1): S14-S26.
- [32] Xiong Yi. *Hydrological Regionalization of China*. Beijing: Science Press, 1995. [熊怡. 中国水文区划. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [33] Zhang Jingyi, He Hui, Lu Guihua. Research on hydrological regionalization. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 37(1): 48-52. [张静怡, 何惠, 陆桂华. 水文区划问题研究. *水利水电技术*, 2006, 37(1): 48-52.]
- [34] Zhang Xingnan, Luo Jian, Chen Lei, et al. Zoning of Chinese flood hazard risk. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(3): 1-7. [张行南, 罗健, 陈雷, 等. 中国洪水灾害危险程度区划. *水利学报*, 2000, 31(3): 1-7.]
- [35] Wang Nan, Cheng Weiming, Zhang Yichi, et al. Reasons and risk assessment of housing damage in the national mountain torrent disaster prevention county. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(12): 1575-1583. [王楠, 程维明, 张一驰, 等. 全国山洪灾害防治县房屋损毁风险评估及原因探究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1575-1583.]
- [36] Zhou Tinru, Shi Yafeng, Chen Shupeng. *Draft of Chinese Topographic Zoning*. Beijing: Science Press, 1956. [周廷儒, 施雅风, 陈述彭. 中国地形区划草案. 北京: 科学出版社, 1956.]
- [37] Wang Jing'ai, Zuo Wei. *Geographical Atlas of China*. Beijing: Sinomap press, 2010. [王静爱, 左伟. 中国地理图集. 北京: 中国地图出版社, 2010.]
- [38] Guo Liang, Zhang Xiaolei, Liu Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(12): 1548-1556. [郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1548-1556.]
- [39] Ma Xiufeng. Weight function method for calculating hydrological frequency parameters. *Journal of China Hydrology*, 1984(3): 1-8. [马秀峰. 计算水文频率参数的权函数法. *水文*, 1984(3): 1-8.]
- [40] Wu W J, Wang J H, Dai T S, et al. The geographical legacies of mountains: Impacts on cultural difference landscapes. *Annals of the American Association of Geographers*, 2018, 108(1): 277-290.
- [41] Kohonen T. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78(9): 1464-1480.
- [42] Ward J H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, 58(301): 236-244.
- [43] Arbelaitz O, Gurrutxaga I, Muguerza J, et al. An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern Recognition*, 2013, 46(1): 243-256.
- [44] Davies D L, Bouldin D W. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, PAMI-1(2): 224-227.
- [45] Mao Qi, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. An ecological function zoning approach coupling SOFM and SVM: A case study in Ordos. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 460-474. [毛祺, 彭建, 刘焱序, 等. 耦合 SOFM 与 SVM 的生态功能分区方法: 以鄂尔多斯市为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 460-474.]
- [46] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [47] Yang L, Li X M, Yang Q Y, et al. Extracting knowledge from legacy maps to delineate eco-geographical regions. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(2): 250-272.

Regionalization of flash floods in China

CHEN Yuehong¹, XU Congcong¹, ZHANG Xiaoxiang¹, ZHANG Ruojing¹,
MA Qiang², LIU Changjun², REN Liliang¹, SHI Kaixin¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, China Institute of
Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: According to the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, the number of casualties in flash flood disasters accounts for nearly 70% of flood disaster casualties in recent years and flash flood has become one of the major natural disasters causing casualties in China. Flash flood regionalization is fundamental for implementing the local measures of the flash flood prevention and mitigation according to local conditions. Using results from existing flash flood relevant physiographical regionalization schemes, and in accordance with the principles of comprehensive, dominant factors, the relative consistency within units, the relative difference between units, the integrity of spatial distribution and the hierarchical divisions, this paper firstly constructs an index system of the flash flood trigger factors and its underlying surface environment for the flash flood regionalization in China. In the combination of top-down and bottom-up regionalization, the hybrid self-organizing-map-based spatial clustering algorithm is then built. Finally, nine homogeneous regions at the first-grade and thirty-three subregions at the second-grade are delineated for flash floods in China. The historical flash flood events and the Geodetector method are adopted to evaluate the developed regionalization schemes. Results show that the first-grade and the second-grade flash flood regionalization schemes in China can respectively provide the determinant power of 66.4% and 75.4% for the spatial distribution of historical flash flood events in the whole country, indicating the developed flash flood regionalization has a good spatial consistency with the distribution of historical flash flood events with different densities. The developed flash flood regionalization not only effectively delineates the regional differentiation pattern of flash floods, but also provides a scientific basis for the implementation of localized flash flood prevention and mitigation measures in China, which benefits for the sound development of flash flood disasters prevention and management in China.

Keywords: regionalization; flash flood disaster; short-duration heavy rainfall; underlying surface; machine learning; China