

杜俊, 任洪玉, 张平仓, 等. 大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 66–72. [DU Jun, REN Hongyu, ZHANG Pingcang, et al. Comparative Study of the Hazard Assessment of Mountain Torrent Disasters in Macro Scale[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 66–72.]

大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究^{*}

杜俊^{1,2}, 任洪玉^{1,2}, 张平仓^{1,2}, 张长伟^{1,2}

(1. 长江科学院水土保持研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 首先以长江流域为例, 将历史灾情作为基础验证资料, 分析比较了不同评估模型的输出结果, 以此探讨大尺度山洪灾害危险评估模型的构建方法与优选方案, 后将成果推广至全国尺度, 结果显示: ①暴雨和地形类指标图层的乘积叠加成果可以较好地反映区域山洪的危险分布特征, 其他要素指标的引入, 若它们对山洪发育的影响在时空上存在不确定性, 或是与前两类主因子存在明显的交互作用, 则可能使结果产生偏差; ②我国国土面积中约62%的地区山洪危险度较低, 高危险区主要分布在我国东南片的台湾中央山脉、武夷山脉、南岭、江南丘陵等中低起伏地区, 以及西南片的盆周山地、滇东横断山脉、青藏高原东南等高起伏山地, 其中以西南诸省最为严重。

关键词: 山洪灾害; 危险评估; 风险理论; 长江流域; 全国尺度

中图分类号: X43; P954 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2016)03–0066–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2016.03.011

自然灾害风(危)险评估是预判灾情的有效手段, 也是开展防治工作的基础。依据评估对象的差异, 山洪灾害风(危)险评估可分为面上评估和线上评估两类, 前者主要基于GIS技术, 利用因子图层代数叠加的方法计算二维平面上的风(危)险度^[1–3]; 后者往往基于水文计算或动力学方法, 获得给定河道/沟道在不同重现期洪水/泥深条件下的影响范围, 再结合承灾体属性绘制灾害曲线, 得到沿河区域在特定规模频率洪量/泥深条件下的期望损失^[4–6]。显然线上评估侧重于反映洪水规模频率与灾害损失的关系, 研究尺度一般较小; 而面上评估着力于把握区域总体灾情格局, 更适合宏观风(危)险分析。目前国内开展较多的主要是中小尺度(如省、市、地区等)山洪灾情面上评估^[7–10], 以及城市或流域尺度线上评估^[11–13], 而对大区或全国这样的大空间尺度山洪灾害风(危)险评估则很少涉及, 为数不多的近似成果也缺乏有效验证^[14–15]。

与中小尺度评估不同, 大空间尺度山洪灾害风(危)险评估的资料收集与整理难度骤增, 对于模型确定、指标选取及结果验证都是挑战; 且随着空间尺度的扩大, 一些因子图层的贡献度和叠

加形式都有可能发生变化(即尺度效应), 使原本基于历史文献和经验判断确定的评估体系失效。由于目前尚没有针对因子贡献度尺度效应的研究, 自行设计指标因子权重及评估模型体系也缺乏理论依据。据此, 本着试错的原则, 从“分布格局愈发逼近历史灾情的成果愈可靠”这一假设出发, 本文拟将历史灾害数据作为基础验证资料, 首先以长江流域为例进行试验性危险评估(大尺度承灾体易损性资料收集困难, 且目前没有适合的技术方法, 这里暂不考虑), 比较不同评估模型所得出的危险图与历史灾害资料之间的差异, 进而: ①辨析我国大尺度山洪灾害危险评估中相关因子的取舍; ②找到适用的优选方案; ③将所得成果推广至全国尺度, 分析我国山洪灾害危险分布格局。

1 数据方法及基本情况

1.1 研究案例概况

长江流域系指长江干流及其支流流经的广大区域, 位于我国南部, 介于24°30′~35°45′N、90°

^{*} 收稿日期: 2015–10–27 修回日期: 2016–01–19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41501109); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301059); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2015010/TB); 水利部“948”计划项目(201507)

第一作者简介: 杜俊(1983–), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水沙灾害防治。E-mail: dxjx2006@126.com

33' ~ 122°25'E 之间(图 1), 流域面积 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$, 涉及人口 4 亿多人。

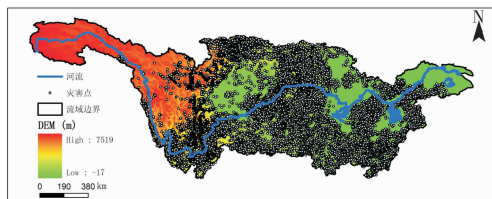


图 1 长江流域历史山洪灾害点概况

长江流域因其复杂的地质地貌及气候条件, 成为我国山洪灾害发生最为密集的地区。从历史灾害点分布情况来看(图 1), 山洪灾害在全流域除三角洲以上、江源以下皆有分布, 其中密度较高地区集中在四川盆地周边的中高山地, 包括岷山、邛崃山高山峡谷区和龙门山、滇东、滇西、米仓山、大巴山、大娄山、武陵山、秦岭、雪峰山等中山峡谷区, 以及长江中下游的大别山、幕府山、罗霄山、黄山、武夷山等中低山区; 川中丘陵区、南阳盆地、江汉平原、洞庭湖平原及鄱阳湖平原等地势起伏较低地区的灾害点明显较少。

1.2 建模方案

目前国内较有影响的灾害风(危)险评估概念模型主要有两类: 一是基于史培军灾害系统理论^[16-17]的“三元”风险评估模型(以下简称三元模型), 将灾害系统分为致灾因子、孕灾环境和承灾体脆弱性或易损性三个方面加以考量; 另一类是基于联合国人道主义事务部给出的风险定义^[18], 认为自然灾害风险由自然过程危险性与承灾体易损性的乘积求得(以下简称一般模型)。两类模型的区别在于, 三元模型将一般模型中反映危险性的外营力因子和下垫面因子, 分别作为致灾因子(本意为致灾过程危险性, 实践中大多采用外营力因子表征)和孕灾环境单列, 在叠加分析时将这两类图层做乘积叠加, 而不像一般模型那样做加权处理。两类模型数学表达式如下:

$$R = I \times E \times V; \quad (1)$$

$$R = H \times V。 \quad (2)$$

式中: R 表示自然灾害风险度; I 为致灾因子危险性; E 为孕灾环境敏感性; V 是承灾体脆弱性或易损性; H 为自然过程危险性。式(1)为三元模型, 式(2)为一般模型。

两类模型虽然理念、形式不同, 但实践中考虑的要素大同小异, 危险性、易损性、孕灾环境等单列因子同样由具体的要素指标加权得到^[2, 9], 而权重设置的依据主要来自学界共识或研究者自身的经验认知。一般的, 暴雨作为诱发山洪的源动力, 其相关指标不论在何种形式的模型中

都享有较高的权重。然而我国的降水分布是从东南向西北递减的, 如果单纯给暴雨类指标赋予高权, 可能会在大尺度分析中导致结果失真。对此, 尝试对式(2)中的 H 算法进行改进, 原式中的 H 算法如式(3)所示, 改进算法将原式中作用较突出的暴雨类指标(P)与地形类指标(S)相乘, 再与其他要素指标加权, 具体如式(4)所示。改进后的算法期望在反映暴雨、地形对山洪发育基础性作用的同时, 也能避免简单调权带来的结果失真。

$$H = a \cdot P + b \cdot S + c \cdot X_1 + d \cdot X_2 + \dots; \quad (3)$$

$$H = a \cdot P \cdot S + c \cdot X_1 + d \cdot X_2 + \dots。 \quad (4)$$

式中: P 表示暴雨类指标; S 表示地形类指标; $X_1, X_2 \dots$ 表示其他指标; $a, b, c \dots$ 表示相应的权重系数。改进了 H 算法的一般模型, 以下称为改进模型。

此外, 基于简化要素和快速评价的考虑, 本文亦加入了只考虑暴雨和地形两项山洪发育必要条件的危险评估模型, 其形式如式(5)所示, 在结构上可以认为是改进模型的简化版本, 故以下称之为简化模型。

$$H = P \cdot S。 \quad (5)$$

基于以上 4 类模型, 以及相同的要素指标和相似的权重设定, 本文将分别构建长江流域山洪灾害危险评估体系, 通过所得结果与历史灾害资料的比较验证来获得优选方案, 并将成果推广至全国尺度, 分析全国山洪灾害的危险分布特征。

1.3 数据来源

历史灾害资料来自“全国山洪灾害防治规划”长江流域涉及的 19 个省(市、区)山洪灾害调查数据, 该套数据资料年限截至 2002 年; 另根据“全国山洪灾害防治县级非工程措施”项目调查资料, 对岷江和赣江流域灾害点数据进行了更新, 数据年限截至 2010 年。这些资料含长江流域建国以来发生过各型山洪灾害的山洪沟信息, 包括位置、灾害次数、滑坡体数量、泥石流冲出物方量等, 但除了位置以外, 其他信息的完整度较差, 虽然通过插值计算也可近似得到综合灾情分布, 但过程中不可避免地增加主观补点赋值成分, 故本研究主要使用灾害点的位置信息。

全国最大 10 min、1 h 和 6 h 年暴雨极值年均雨量及相应的年暴雨极值变差系数(C_v)纸质图层来自水利部水文局和南京水利科学研究院编制的《中国暴雨统计参数图集》^[19]; 使用的数字高程数据是修正以后的 SRTM 90 m; 土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心; 岩性基础资料来自中国地质调查局发布的 1: 250 万中国数字地

质图。

1.4 数学方法

本文涉及的数学方法主要有 AHP 法(层次分析法)、主成分分析法和空间相关性分析, 这些方法在国内都有较普遍的应用, 限于篇幅这里不再累述。

2 指标选取

依据相关定义, 自然灾害危险性是指可能致灾的自然过程发生的规模频率集总^[20], 是描述潜在致灾过程易发程度的一项指标, 而促使山洪发生发育的原因, 则主要与暴雨、地形、构造运动、岩性、土地利用(植被)、土壤特性以及松散堆积物状况等自然要素有关, 其中暴雨作为诱发山洪的主要外营力, 是不可或缺的影响因子; 地形条件是山洪形成最基本的下垫面因子, 其他因子则处于相对从属的地位。基于以上认识和资料, 选取以下指标作为危险评估的基本考察方面。

(1) 暴雨综合指标(H_1)

将收集得到的长江流域最大 10 min, 1 h 和 6 h 多年暴雨极值年均雨量纸质分布图进行数字化, 具体做法是: ①将各图层分别进行高分辨率扫描; ②在 Arcmap 中对各扫描图层等值线进行描绘并赋值, 得到相应的 shp 图层; ③应用 Arcmap 的“feature to point”命令, 分析得到各 shp 图层等值线的中心点图层; ④对未涉及的等值线进行补点, 补点赋值的依据为各等值线间的数值间隔, 补点结果在空间分布上力求均匀; ⑤对得到的数值点图

层进行 IDW(Inverse Distance Weighted, 反向距离权重)插值, 得到相应的栅格图层; ⑥将得到的栅格图层与原始纸质图层进行比对, 如若有较大差异则重复步骤④~⑥, 否则确认成图。

由于最大 10 min, 1 h 和 6 h 多年暴雨极值年均雨量分布图在分布范围上存在较多相似, 为避免叠加分析时重复考虑, 需对得到的 3 种数字化栅格图层进行降维处理, 得到一个反映总体特征的综合指标。这里采用主成分分析法, 提取一个主成分, 最终得到多年暴雨极值年均雨量图层(图 2a)。基于同样的方法可得到长江流域多年暴雨极值变差系数(C_v , 图 2b)

暴雨综合指标(H_1)由多年暴雨极值年均雨量(图 2a)与多年暴雨极值 C_v (图 2b)标准化后加权求和得到, 多年暴雨极值年均雨量反映的是暴雨极值的绝对分布情况, 数值越大表示年暴雨极值量越大, 越有利于山洪发生; 多年暴雨极值 C_v 反映的是长时间序列暴雨极值的年度变化特征, 数值越大表示年暴雨极值年际变化幅度越大, 越不利于洪水过程的稳定发生。两者对山洪过程分布的影响作等权处理。加权后经归一化即可得到暴雨综合指标图层(图 2c), 数值越大表示诱发山洪的可能性越大。

(2) 地形起伏度(H_2)

本指标反映地表形态的起伏高低情况, 数值越大表示区域高差大, 越有利于山洪的发生。长江流域地形起伏度栅格图由 DEM 原始数据经填注后, 导入 ArcGIS 中的 Neighborhood statistic 命令计算最大值和最小值并相减求得, 其中最佳统计单

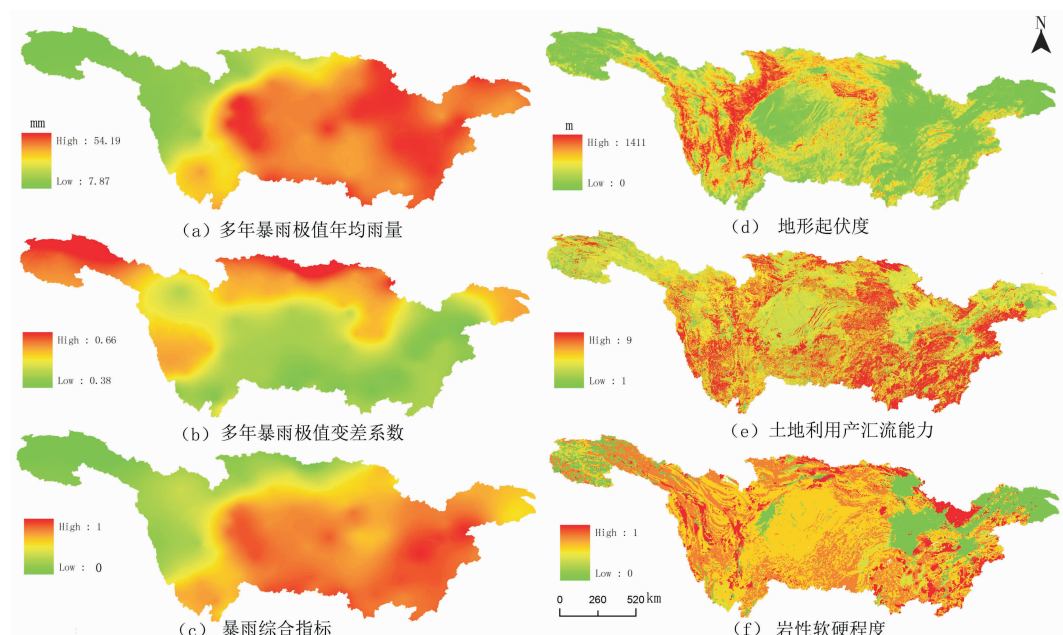


图2 长江流域山洪灾害危险性指标图集

元由均值变点法测算求得^[21], 本文测算结果为 11 × 11 网格大小。具体图层如图 2d 所示。

(3) 土地利用产汇流能力(H_3)

植被的水土保持功效已为学界共识, 本指标利用土地利用数据反映长江流域植被覆盖情况对流域产汇流的影响, 具体评估依据区域土地利用状况, 采用专家打分法对不同的土地利用类型打分(表 1), 打分越高表示流域产汇流能力越低, 越不易发生山洪(图 2e)。

(4) 岩性软硬程度(H_4)

岩性的软硬在一定程度上可以反映地表岩层的破碎风化和节理发育情况, 对地表产汇流以及松散堆积物的分布都有一定影响。这里依据表 2 对整个流域岩性分布及各类土体的软硬程度进行评估和打分, 再经 ArcGIS 归一化后出图(图 2f)。

3 各方案出图

一般模型中 $H_1 \sim H_4$ 均为危险性分析的二级指标, 采用 AHP 法对各指标进行赋权: 4 项指标中暴雨类(H_1)和地形类(H_2)指标是发育山洪的基本

表 1 土地利用产汇流能力打分

一级类型	二级类型	打分
林地	有林地	9
	灌木林地	8
	疏林地	6
	其他林地	7
草地	高覆盖草地	6
	中覆盖草地	5
	低覆盖草地	4
未利用土地	沙地	9
	戈壁	8
	裸土地	3
	其他未利用土地	2
耕地	——	4
水域	——	1
城乡、工矿用地	——	1

要素, 应当给予高权, 其中暴雨又是诱发山洪的源动力, 因此权值更高; 土地利用和岩性条件类指标(H_3, H_4)作为辅助因子给予低权, 考虑到保存较好的林地一般都是山区, H_3 在叠加过程中会削弱主要因子 H_2 的影响, 故给予 H_3 相对低权。最后权重设定如表 3 所示。

表 2 岩性软硬程度打分情况

类别	亚类	强度/MPa	代表性岩石	评分
硬质岩石	极硬岩石	>60	花岗岩、花岗片麻岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英岩、石英砂岩、硅质、钙质砾岩、硅质石灰岩等	5
	次硬岩石	30 ~ 60	大理岩、硅质板岩、石灰岩、白云岩、钙质砂岩等	4
软质岩石	次软岩石	5 ~ 30	凝灰岩、千枚岩、泥灰岩、砂质泥岩、板岩、泥质(砂)砾岩等	3
	极软岩石	<5	页岩、泥岩、粘土岩、泥质砂岩、绿泥石片岩、云母片岩、各种半成岩等	2
土体	各类土体	——	——	1

表 3 不同模型危险性指标的 AHP 法评分及权重

一般模型	H_1	H_2	H_3	H_4	权重	CI
暴雨综合指标(H_1)	1	2	5	5	0.488	0.040
地形起伏度(H_2)	1/2	1	5	5	0.345	
土地利用产汇流能力(H_3)	1/5	1/5	1	1/2	0.069	
岩性软硬程度(H_4)	1/5	1/5	2	1	0.098	
改进模型	$H_1 H_2$		H_3	H_4	权重	CI
地形暴雨($H_1 H_2$)	1		9	9	0.814	0.027
土地利用产汇流能力(H_3)	1/9		1	1/2	0.072	CR
岩性软硬程度(H_4)	1/9		2	1	0.114	0.046
三元模型	H_2		H_3	H_4	权重	CI
地形起伏度(H_2)	1		5	5	0.709	0.027
土地利用产汇流能力(H_3)	1/5		1	1/2	0.113	CR
岩性软硬程度(H_4)	1/5		2	1	0.179	0.046

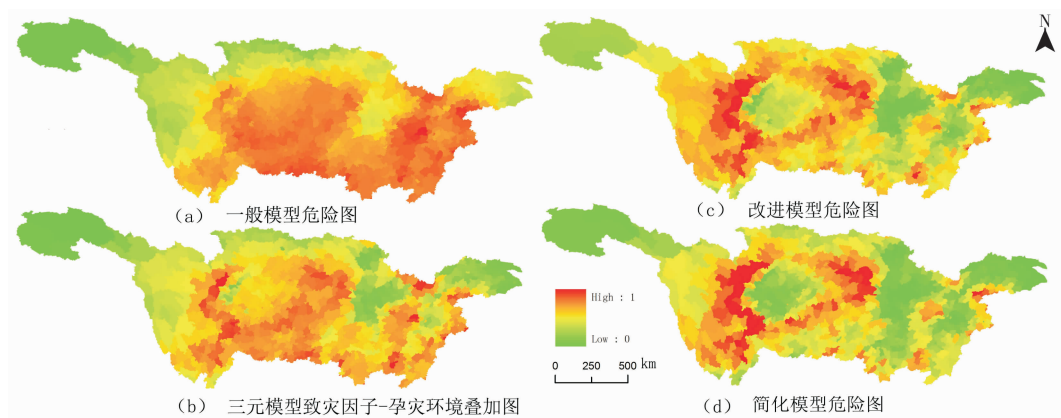


图3 各方案出图结果

依据表3中一般模型类给出的权值,对 $H_1 \sim H_4$ 图层分别进行归一化后做加权叠加,得到基于一般模型的长江流域山洪灾害危险性分布图,考虑到后继空间相关分析的需要,以其为底图,利用GIS中“Zonal statistics”功能,生成县域危险图(图3a)。

其他方案出图依此类推,根据公式(1)、(4)、(5)和表3中分配的权值,分别得到县域的基于三元模型、改进模型和简化模型的长江流域山洪灾害危险性分布图或致灾因子-孕灾环境叠加图(图3b,图3c,图3d)。

4 方案比选

4.1 定性比较

比较各方案结果图层(图3),认为高危险区(图中偏红区)主要分布在盆周山区(岷山、邛崃山高山峡谷区、龙门山中山峡谷区、米仓山、大巴山中山峡谷区、滇东中山峡谷区、大娄山、武陵山中山峡谷区)和长江中下游中低山区(大别山中低山峡谷区、南岭中低山宽谷区、幕阜山、罗霄山中低山宽谷区和黄山、武夷山中低山区),四类模型结果的区别主要体现在侧重不同:一般模型的高危险区分布范围最广,包含了四川盆地和鄱阳湖平原的大片地区;三元模型的高值区主要分布在四川盆地东部和南部的米仓山、大巴山中山峡谷区、滇东中山峡谷区、大娄山、武陵山中山峡谷区,以及大别山中低山峡谷区;改进模型高危险区与简化模型结果相似,主要集中在盆周山区;

中危险区(偏黄区)在全流域上至江源以下、下至三角洲以上皆有分布,其中一般模型的范围仍然最广,除江源高原宽谷区和三角洲冲积平原区外均有大面积分布;三元模型、改进模型和简化模型出图结果相似,中风险区较一般模型的明

显减少,主要是剔除了中下游的洞庭湖-江汉平原和南阳盆地。它们之间的区别是:简化模型的中风险区还剔除了川中丘陵区大部 and 鄱阳湖平原,改进模型出图保留了以上两区的部分面积,三元模型结果则保留的面积更大。

低危险区(偏绿区)一般应分布在高原宽谷或平原低丘地区。四类模型出图中,改进模型和简化模型的低风险区控制得较好,其他两类模型的出图均存在较大失真。总体上,一般模型输出失真明显,一些地垫起伏不大的地区也被认定为中高危险区;三元模型的中值区亦偏多,且对近年来灾害频发的岷江流域辨识不足;改进模型和简化模型的结果相对较好。

4.2 定量比较

为进一步验证上述结果,使用全局Moran指数计算四种方案县域危险值与县域灾害点数量的相关关系,全局Moran指数考虑了空间统计单元之间的邻近关系,因而较之于传统方法更适合讨论空间序列间的相关关系。计算结果显示,四类模型的县域危险图与灾害点数量的Moran指数中,改进模型和简化模型结果明显优于其他两类结果,简化模型结果相关系数最高,是四类模型中的优选方案(图4)。

一般模型的数学本质是线性加权,不能充分反映各要素之间,以及它们与灾害分布的复杂关系,如果事先不做具体调查和参数率定,仅依靠经验赋权很难获得理想结果。改进模型明确了暴雨和地形对山洪灾害分布的基础性作用,出图结果更为准确,然而与简化方案相比,没有叠加土地利用(植被)和岩性图层(H_3 , H_4)的简化模型结果反而更优,这似乎与一般认识不符。

从山洪诱发机理来看, H_3 和 H_4 所反映的植被产汇流能力和岩性软硬条件,与山洪发育并没有必然联系。如植被对洪水的抑制作用,主要体现在涵养水源和消峰滞洪两个方面,然而有研究表

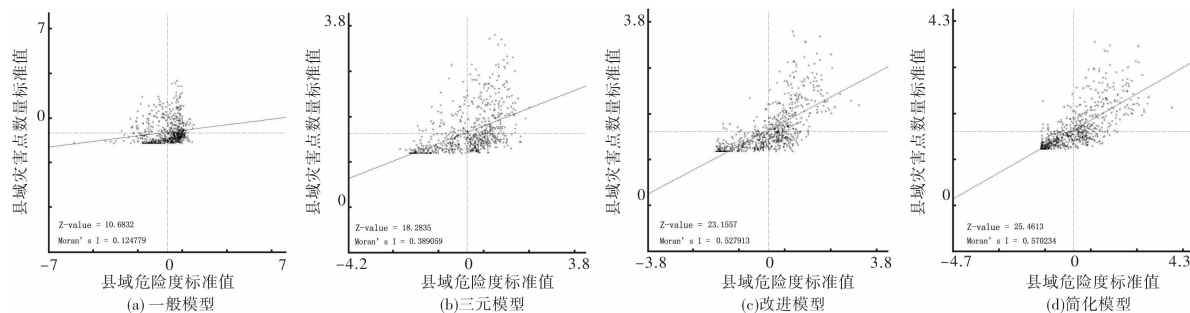


图4 县域风险值与灾害点数量 Moran 散点图

明植被的涵蓄水源特性在一定条件下反而会增加产流^[22-23], 而消峰滞洪作用对小流域尺度极端暴雨引发的洪水, 效果也很有限^[24-25]; 同样对于岩性软硬程度来说, 虽然普遍认为岩性松软、易于风化地区发生的洪水更易引发滑坡(崩塌)、泥石流等次生过程^[26], 但亦有研究表明硬岩、较硬岩地区也会广泛发育此类过程^[27-29]。这种作用方式和影响程度在时空上的不确定性, 是造成简化模型结果优于改进模型的原因之一。

此外, 从使用方法来看, 基于图层代数叠加的自然灾害风险评估体系, 很难充分考虑叠加图层间的交互影响。如在山洪形成系统中, 地形是主因子, 植被是辅因子, 地形起伏大的地区易于发生山洪, 而植被发育良好的地区, 大多也是山区, 因此在图层叠加运算时, 植被的实际作用就是抵消地形的部分影响, 这也在一定程度上使结果产生偏差。

5 全国山洪灾害危险评估

依据优选方案, 得到基于简化模型的全国山洪灾害危险度分布图(图5)。

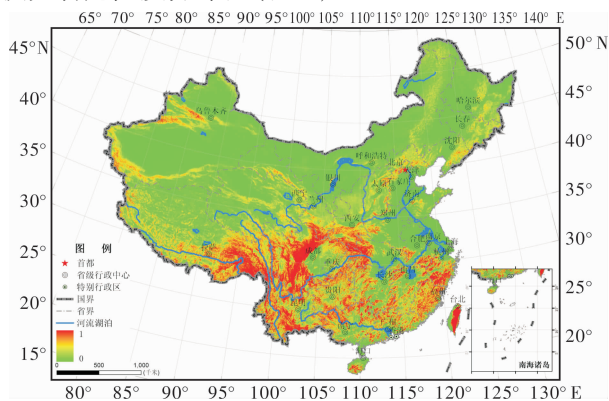


图5 全国山洪灾害危险度归一化图

从全国格局来看, 我国山洪高风险区主要分布在华东、华南、华中、西南等广大南部地区, 包括东南片的台湾中央山脉、武夷山脉、南岭、江南丘陵等中低起伏地区, 以及西南片的盆周山

地、滇东横断山脉、青藏高原东南等高起伏山地; 中危险区从我国南部进一步扩大至华北、东北的低山丘陵区, 以及新疆等地的中高山区; 低风险区分布范围最广, 约占国土面积的 62%, 主要分布在东部低丘、平原和中西部高原(盆地)。总体上, 我国南部省份的山洪危险度高于北方省份, 这其中又以西南诸省更甚。

6 结论

本文以长江流域为例, 计算比较了四类山洪灾害危险评估模型的输出结果, 并使用区域历史灾害点数据进行验证, 得到我国大空间尺度山洪灾害危险评估的优选方案, 进而在全国尺度上推广应用, 得到以下结论。

(1) 从优化指标和快速评价角度考虑, 暴雨和地形类指标在大尺度山洪灾害危险评估中最为重要, 使用这两类指标图层的乘积叠加成果可以较好地反映区域山洪的危险分布特征; 其他要素指标的引入, 若它们对山洪发育的影响在时空上存在不确定性, 或是与前述两类主因子存在明显的交互作用, 则可能使结果产生偏差。

(2) 基于优选方案得到的全国山洪灾害危险图显示: 我国大部地区山洪危险度较低, 约占国土面积的 62%, 高风险区主要分布在东南片的台湾中央山脉、武夷山脉、南岭、江南丘陵等中低起伏地区, 以及西南片的盆周山地、滇东横断山脉、青藏高原东南等高起伏山地, 这其中又以西南省份最为严重。

参考文献:

- [1] 赵士鹏. 闽江上游地区山洪灾害风险评估[J]. 地理研究, 1997, 16(1): 98-102.
- [2] 唐川, 朱静. 基于 GIS 的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 87-94.
- [3] Youssef AM, Pradhan B, Hassan AM. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery[J]. Environmental Earth

- Sciences, 2011, 62(3): 611–623.
- [4] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7: 495–506.
- [5] Jakob M, Holm K, Weatherly H, Liu S, et al. Debris flood risk assessment for Mosquito Creek, British Columbia, Canada[J]. *Natural Hazards*, 2013, 65: 1653–1681.
- [6] Totschnig R, Fuchs S. Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties[J]. *Engineering Geology*, 2013, 155: 31–44.
- [7] 刘希林, 苏鹏程. 四川省泥石流风险评价[J]. *灾害学*, 2004, 19(2): 23–28.
- [8] 刘丽, 王建中, 王士革. 四川省泥石流灾害保险的风险分析与区划[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(1): 103–108.
- [9] 殷洁, 裴志远, 陈曦炜, 等. 基于 GIS 的武陵山区洪水灾害风险评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 110–117.
- [10] 南希, 严冬, 李爱农, 等. 岷江上游流域山地灾害危险性分区[J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 113–120.
- [11] 谢圣. 小流域山洪风险图及风险管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [12] 朱静. 城市山洪灾害风险评估——以云南省文山县城为例[J]. *地理研究*, 2010, 29(4): 655–664.
- [13] 李兰, 周月华, 叶雨梅, 等. 基于 GIS 淹没模型的流域暴雨洪涝灾害区划方法[J]. *气象*, 2013, 39(1): 112–117.
- [14] 张行南, 罗健, 陈雷, 等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. *水利学报*, 2000(3): 1–7.
- [15] 张平仓, 任洪玉, 胡维忠, 等. 中国山洪灾害防治区划初探[J]. *水土保持学报*, 2006(6): 196–200.
- [16] 史培军. 论灾害研究的理论与实践[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1991(11): 37–42.
- [17] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 6–17.
- [18] United Nations Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[R]. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992.
- [19] 水利部水文局, 南京水利科学研究所. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [20] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险及沟谷泥石流风险度评价[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(3): 266–273.
- [21] 蔡道明, 肖翔, 孙金伟. 区域山洪灾害预警难度评价——以长江流域为例[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(3): 84–94.
- [22] 陈军锋, 李绣斌. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474–480.
- [23] 程根伟, 钟祥浩, 何毓成. 森林水文研究中的悖论及最新认识[J]. *大自然探索*, 1996, 15(2): 81–85.
- [24] Hewlett JD, Helvey JD. Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(3): 768–782.
- [25] Hewlett JD, Bosch JM. The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa[J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 75: 365–381.
- [26] 鲁科, 余斌, 韩林, 等. 泥石流流域岩性的坚固系数与暴发频率的关系[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(9): 980–988.
- [27] 陈晓利, 邓俭良, 冉洪流. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征[J]. *地震地质*, 2011, 33(1): 191–202.
- [28] 熊绍华. 花岗岩山区与泥石流灾害问题——兼谈 1988. 7. 15 华山泥石流[J]. *地域研究与开发*, 1990, 9(2): 44–45.
- [29] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.

Comparative Study of the Hazard Assessment of Mountain Torrent Disasters in Macro Scale

DU Jun^{1, 2}, REN Hongyu^{1, 2}, ZHANG Pingcang^{1, 2} and ZHANG Changwei^{1, 2}

(1. Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Research Center on Mountain Torrent and Geologic Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to find the appropriate methodology for macro scale hazard assessment of mountain torrent disasters, the results of hazard assessment in the Yangtze River Catchment from different models are evaluated by trial-and-error method based on the historic data for validating. The results show that: ①The product of overlay analysis between layers of storm index and landform index can reflect regional hazard pattern of mountain torrents better than other models in this paper, and the introduction of other types of indices may distort the outcome if these indices have uncertain effects on development of mountain torrents in temporal and spatial scales, or the indices have significant interactive effects with the indices of storm and landform. ②The area with low level of mountain torrent hazard accounts for about 62% of land area in China. The area with high hazard level mainly distribute in the middle and low topographic relief areas of southeast China, such as the Central Range in Taiwan, the Wuyi Range, the Nanling Range and the Jiangnan hilly area, and the high topographic relief areas of southwest China, such as the mountains areas around the Sichuan Basin, the Hengduan Mountains and so on. Generally, the hazard situations of mountain torrents in the southwest provinces of China are the worst.

Key words: The Yangtze River Catchment; national scale; mountain torrent disasters; hazard assessment; theory of natural disaster risk