

横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性研究

胡凯衡^{1,2}, 魏丽^{1,2,3}, 刘双^{1,2}, 李秀珍^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要：地形、降雨等环境因子决定了泥石流的时空分布特征, 理解泥石流与这些因子的关系有助于区域泥石流灾害风险评估与防灾减灾工作。以横断山区为研究区域, 选取降水、气候、地貌、地质、土地覆盖、土壤厚度、高差势能以及湿度指数等因子, 利用地理探测器和灰色关联分析等方法, 探讨了环境因子与泥石流沟空间分布的关系以及降水特征与泥石流灾害的时间关联性。结果表明, 湿度指数是决定泥石流沟空间格局的最主要因子, 其次是高差势能和土壤厚度, 多年平均分布的降水特征对泥石流沟分布的影响较小。泥石流灾害事件与降水特征的时间关联具有较大的区域异质性。泥石流发生地的激发雨量、湿度指数、高差及土壤厚度的统计分布在不同地貌、地质和气候单元中有明显差异。这表明泥石流预警不仅需要雨量等激发因子, 还必须考虑其他影响因素的空间差异性。

关键词：泥石流灾害; 环境因子; 降雨特征; 地理探测器; 灰色关联分析

DOI: 10.11821/dlxb201911008

1 前言

横断山区处于中国第一、二级地势阶梯的过渡部位^[1], 范围约为24°40'N~34°00'N、96°20'E~104°30'E^[2]。横断山区复杂的地貌类型, 多变的气候条件及剧烈的新构造活动等因素导致泥石流爆发频繁, 严重威胁居民生命安全及重大工程建设^[3-4]。近年来, 区内先后发生的里氏8.0级“5·12”汶川地震、7.0级“4·20”芦山地震以及7.0级“8·8”九寨沟地震, 为该区提供了丰富的松散物源^[5-6]。加上强降水天数呈增加趋势^[7-8], 未来该地区泥石流灾害可能更为频繁。

泥石流是受多种环境因子共同作用的结果。地质、地貌等下垫面条件是泥石流形成的本底环境。降水则是泥石流的重要激发因素, 显著影响泥石流的活动频率^[9-10]。理解泥石流与环境影响因子的关系是泥石流风险评估的重要基础之一。目前对横断山区泥石流与环境因子的研究主要集中在地震震区或小流域尺度。如Tang等^[11-12]基于遥感影像与高程模型流域划分, 发现北川县境内暴雨诱发的72处泥石流分布受岩石类型、发震断层与河流等因素控制。Guo等^[13-14]、马超等^[15]、雷发洪等^[16]对汶川震区泥石流灾害激发雨量特

收稿日期：2019-05-14; 修订日期：2019-10-09

基金项目：国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2015CB452704); 国家重点研发计划(2018YFC1505205); 四川省九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题(KJ-2018-23) [Foundation: The National Basic Research Program of China, No.2015CB452704; National Key R&D Program of China, No.2018YFC1505205; Major Research Program of Ecological Prevention against Geohazards in the Jiuzhaigou Earthquake Area by Sichuan Government, No.KJ-2018-23]

通讯作者：胡凯衡(1975-), 男, 江西瑞金人, 博士, 研究员, 研究方向为泥石流减灾理论与技术、泥石流动力学过程和数值模拟。E-mail: khhu@imde.ac.cn

征及阈值进行了探讨。丁明涛等^[17]定量分析了岷江上游不同坡度级别、岩性条件下土地利用类型对泥石流灾害的影响；丁俊等^[18]对大渡河流域地质灾害分布规律及影响因素进行了初步分析。

目前，探讨分析横断山区泥石流与环境因子关系方面的研究相对较少。边江豪等^[19]综合分析了横断山山地灾害的区域分布特征与动态演化规律；胡凯衡等^[20]基于不同本底值和降水，采用条件概率，评价了横断山区泥石流易发性。本文针对横断山区，选取降水、气候、地貌、地质、土地覆盖类型、土壤厚度、高差势能以及地形湿度等11个环境因子，利用地理探测器和灰度关联分析等方法，探讨多种环境因子与泥石流的关系，可为该区泥石流灾害的风险评估提供科学依据。

2 方法与数据

2.1 研究区概况

横断山区位于青藏高原和云贵高原、川西高原的过渡地带，总体地势西北高东南低，区内发育有中国最宽、最典型的南北向山系，面积约60多万km²，其北部海拔可达5000 m以上（图1）。境内主要有岷山、沙鲁里山、哈巴苏山、玉龙山、大雪山、邛崃山、怒江、大渡河、金沙江、雅砻江、澜沧江等一系列山脉和河流。地形从上而下分别是山岭、高原面、剥蚀面到河谷（盆地），层次分明，有81.5%的区域相对高差大于1000 m^[21]。此外，横断山区是中国东部环太平洋区与西部古地中海区间的交接过渡地带^[22]，也是中国地质结构最为复杂的一个区域，跨越亚热带、高原温带和高原亚寒带，受西南和东南两种季风的影响，南北之间气候差异很大^[23]。

2.2 研究方法

2.2.1 地理探测器和环境因子的选取

空间分异性是地理现象的基本特点之一。地理探测器（GeoDetector）是探测和利用空间分异性的工具^[24]。地理探测器既可以探测数值型数据和定性数据，还可以探测两因子交互作用于因变量。因此，可利用地理探测器，研究不同环境因子对泥石流沟空间分布的相对影响大小。

影响泥石流的环境因子众多。其中地形地貌、地质构造、气候条件、土地利用等是最常用的分析因子^[25]。本文选取的泥石流自然环境影响因子包括：年平均水量、日降水量分别> 10 mm、> 25 mm及> 50 mm的20年平均总天数、气候分区、地貌分区、

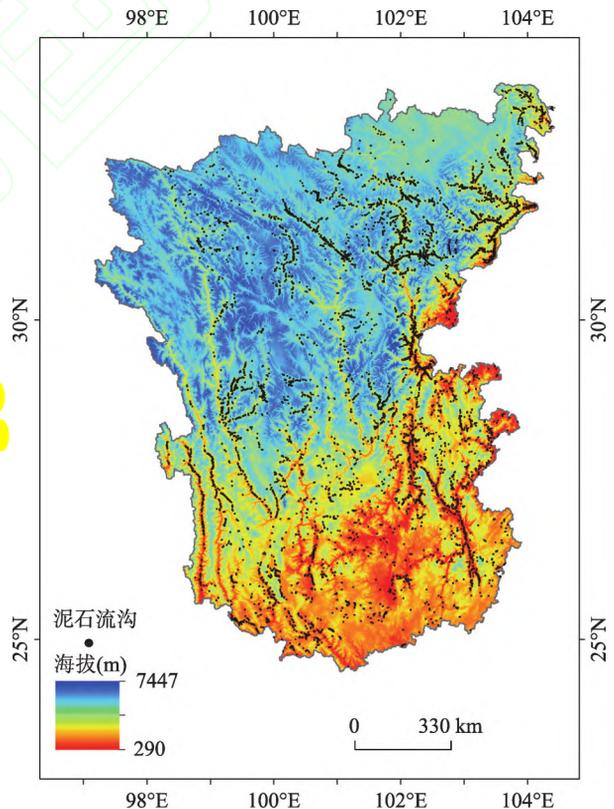


图1 横断山区海拔及泥石流沟分布

Fig. 1 Digital elevation model and debris-flow distribution of the Hengduan Mountains region

地质分区、土地覆盖类型、土壤厚度、高差势能以及地形湿度指数等11个环境因子。其中，高差势能指灾害点与其所在小流域（最大面积约为275 km²）最高海拔的高差。地形湿度指数定义为 $\ln(a/\tan\beta)$ ，源于Beven等发展的地形指数模型^[26]。该指数反映了流域饱和和缺水量的空间分布。先采用90 m分辨率的DEM数据计算地形湿度指数，再以1 km网格为单元进行统计，平均地形湿度指数可以表示为：

$$TWI = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(\alpha_i / \tan \beta_i)}{n} \quad (1)$$

式中： TWI 代表平均地形湿度指数； $\ln(\alpha_i / \tan \beta_i)$ 代表某个90 m网格处的地形湿度指数； n 代表1 km网格内的90 m网格采样数量； α_i 代表流经坡面任一点*i*处单位等高线长度的汇流面积； β_i 代表局地坡度。

2.2.2 降水特征提取和灰度关联分析 横断山从地貌、地质和气候上可分为横断高山山原地貌（I₁）、云贵川高中山山原地貌（I₂）大区，冈瓦纳和亲冈瓦纳大陆陆块群（II₁）、华南和亲华南陆块群（II₂）大区，和青藏高寒气候（III₁）、东部季风气候（III₂）大区^[2, 22, 27]。不同地貌地质和气候背景下，降水特征及对泥石流影响有显著差异。因此，为更准确地分析横断山区降水特征与泥石流灾害的时间关联性，先将整个区域分为6个不同的子区（表1）。其中，子区1为I₂、II₂和III₂的组合；子区2为I₂、II₁和III₂的组合；子区3为I₁、II₂和III₂的组合；子区4为I₁、II₁和III₂的组合；子区5为I₁、II₂和III₁的组合；子区6为I₁、II₁和III₁的组合（图2a）。

表1 6类子区的基本特征

Tab. 1 Characteristics of the six sub-regions of Hengduan Mountains region

子区编号	最低海拔 (m)	最高海拔 (m)	海拔标准差 (m)	气候类型	地貌类型	地质类型
子区1	322	6998	654	东部季风	云贵川高中山山原	华南和亲华南陆块群
子区2	669	4362	502	东部季风	云贵川高中山山原	冈瓦纳和亲冈瓦纳大陆陆块群
子区3	773	7447	767	东部季风	横断高山山原	华南和亲华南陆块群
子区4	290	5846	725	东部季风	横断高山山原	冈瓦纳和亲冈瓦纳大陆陆块群
子区5	1479	6144	491	青藏高寒	横断高山山原	华南和亲华南陆块群
子区6	1954	6629	471	青藏高寒	横断高山山原	冈瓦纳和亲冈瓦纳大陆陆块群

泥石流灾害点数据为1998-2017年横断山区发生的部分泥石流灾害事件，包括位置和时间。降水数据为1998-2017年TRMM 3B42v7日降水产品，分辨率为25 km。首先，按照25 km的分辨率将灾害点数据网格化。由于子区6的泥石流灾害点数据很少，故只针对子区1~5进行分析。然后，提取1998-2017年整个横断山区及子区的逐年泥石流灾害次数与降水的时空分布数据，统计并分别提取日降水> 10 mm、> 25 mm以及> 50 mm的天数的逐年时空分布数据。最后，对发生过灾害的网格单元，计算区域平均的逐年降水量以及日降水> 10 mm、> 25 mm、> 50 mm的天次数（1天次等于1天1网格）。

灰度关联分析用于研究泥石流灾害与降雨的时间关联特征。该方法是一种多因素统计分析的方法^[28]。实现过程主要包括：①对灾害数、年降水量以及日降水> 10 mm、> 25 mm、> 50 mm的天数或者天次数等进行无量纲化处理；②分别计算年降水量以及日降水> 10 mm、> 25 mm、> 50 mm的天数等与灾害数的关联系数；③将时间关联系数分别求平均，得到变量之间的关联度；④针对横断山区及5个子区，分别对各个降水统计量与灾害的关联度进行比较，通过排序，揭示与泥石流灾害关联度较好的降水统计量。

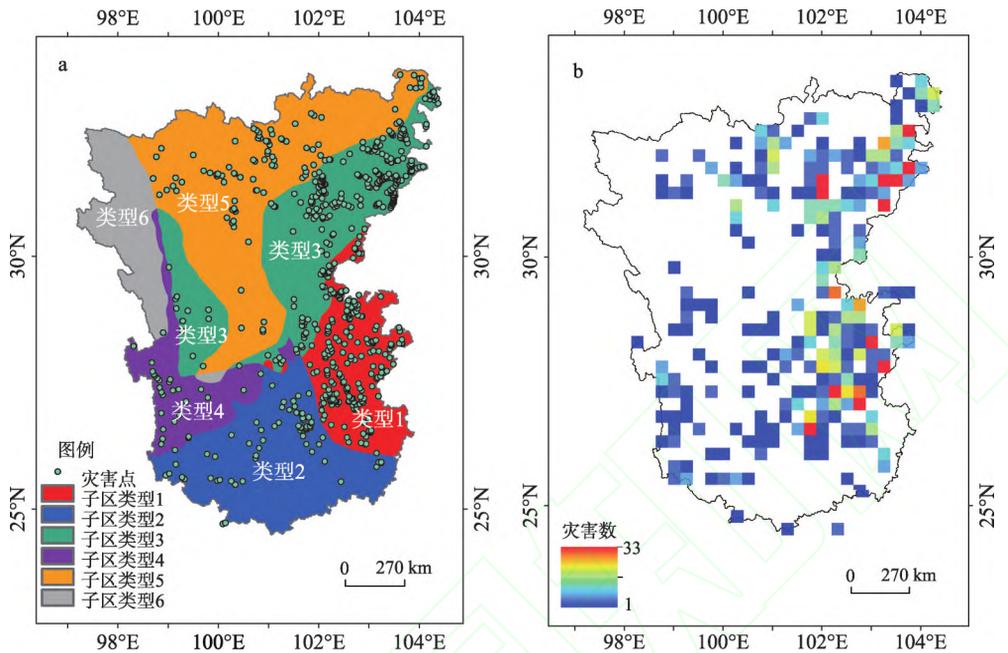


图2 横断山区不同类型子区与泥石流灾害分布(a. 根据不同气候、地质及地貌类型组合得到的6个子区及泥石流灾害点分布; b. 25 km网格化的泥石流灾害数的空间分布)

Fig. 2 Sub-regions and debris flow events in Hengduan Mountains region (a. Six kinds of sub-regions classified with the climate, geology and landform types and the debris flow events; b. Spatial distribution of debris flow events with 25 km×25 km grids)

2.2.3 泥石流灾害事件的激发降雨特征计算 泥石流的激发雨量包括前期有效雨量 P_a 和当日降雨两部分, 其中前期有效雨量 P_a 计算常选用以下公式^[29]:

$$P_a = \sum_{i=1}^n K P_i \quad (2)$$

式中: K 为降雨衰减系数; n 为计算天数, 一般取 3、7 或 14; P_i 为距离灾害发生日 i 天的降雨量。 K 与蒸发强度、地表植被、岩土体性质均有关, 文献中^[29] 的取值范围为 0.78~0.85, 一般取 0.84。本文取 $n = 7$, $K = 0.84$, 计算前期有效雨量 P_a 。根据网格提取的泥石流灾害事件当日雨量及前期有效雨量, 分别计算每场泥石流灾害事件的雨量, 将雨量数据从小到大排序, 计算不同雨量对应累积频率, 即区域泥石流灾害的发生概率。

2.3 数据获取

通过野外调查、查阅全国地质灾害通报等文献资料, 收集整编了约 7200 条泥石流沟数据 (图 1), 以及 1998-2017 年约 860 次泥石流灾害发生的时间和地点 (图 2)。降水数据采用基于最新算法处理校正后的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (约 25 km) 的 TRMM 3B42v7 日降水产品, 时长为 1998-2017 年 (<https://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador>)。收集了气候、地貌、地质分区资料以及 1 km 分辨率的土地覆盖类型数据, 10 km 分辨率的土壤厚度数据与 SRTM 90 m 分辨率的高程数据 (表 2)。

3 结果与分析

3.1 横断山区泥石流沟分布特征

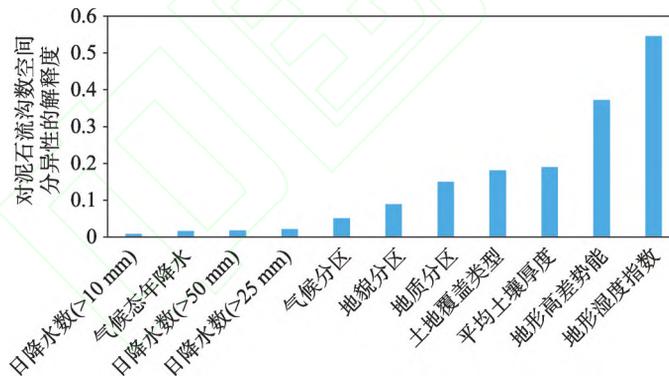
基于地理探测器计算了 11 个环境因子对泥石流沟空间分异解释度 q 值: 湿度指数

表2 数据资料来源

Tab. 2 Data sources in this study

数据名称	时间	数据来源	数据格式
泥石流灾害事件	1998-2017	文献、新闻搜集	点状图层
泥石流沟		水工环地质信息服务平台	点状图层
年平均降雨量	1998-2017	TRMM 3B42v7	25 km×25 km 格网
日降水量分别大于 10 mm、25 mm 及 50 mm 的 20 年平均总天数	1998-2017	TRMM 3B42v7	25 km×25 km 格网
地貌分区	1989	文献[2]	面图层
地质分区	1989	文献[23]	面图层
气候分区	1989	文献[24]	面图层
土地覆盖	2000	寒区旱区科学数据中心	1 km×1 km 格网
土壤厚度	2000	中山大学陆气相互作用研究工作组	10 km×10 km 格网
高程	2000	STRM	90 m×90 m 格网

(0.546) > 地形高差势能 (0.372) > 平均土壤厚度 (0.190) > 土地覆盖 (0.181) > 地质分区 (0.150) > 地貌分区 (0.089) > 气候分区 (0.050) > 日降水量分别大于 25 mm 的 20 年平均总天数 (0.021) > 日降水量分别大于 50 mm 的 20 年平均总天数 (0.018) > 气候态年降水 (0.016) > 日降水量分别大于 10 mm 的 20 年平均总天数 (0.008) (图 3)。

图3 基于地理探测器检测的泥石流沟空间分异解释度 q 值Fig. 3 q value of spatial differentiation interpretation of debris flow catchments detected by geographical detector

结果表明，地形湿度指数是决定泥石流沟空间格局的最主要环境因子，其次是地形高差和土壤厚度，降水特征要素的多年平均分布对泥石流沟数量分布的影响较小。这说明降雨虽然是泥石流发生的激发因素，但并不是泥石流沟分布的控制因素。泥石流沟的空间分布主要取决于地形、松散物源和地质等下垫面条件，而与降雨的关系较弱。

基于前面地理探测器的结果，进一步分析泥石流沟数量随地形湿度指数、地形高差以及土壤厚度的分布情况。整个横断山范围内，地形湿度指数取值范围[-1.48, 16.95]，地形高差 (m) 取值范围[68, 6107]，土壤厚度 (m) 取值范围[0.13, 21.1]。为计算泥石流沟随3个指标的分布数量，将这3个指标的取值范围从小到大分为20个等距的区间 (图4~图6)。结果显示，泥石流沟的数量随地形湿度指数和高差呈先增加后减少的趋势。泥石流沟分布的峰值出现在第4个湿度指数区间[1.28, 2.21]，而高差对应分布峰值的区间范围较宽。从图4可以看出，过少或者过多的地表径流都难以产生泥石流。地形湿度指数

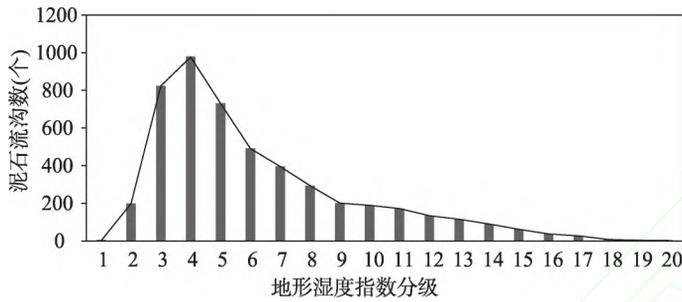


图4 横断山区泥石流沟数量随地形湿度指数的分布情况

Fig. 4 Histogram of debris-flow catchments with topographic wetness index of the Hengduan Mountains region

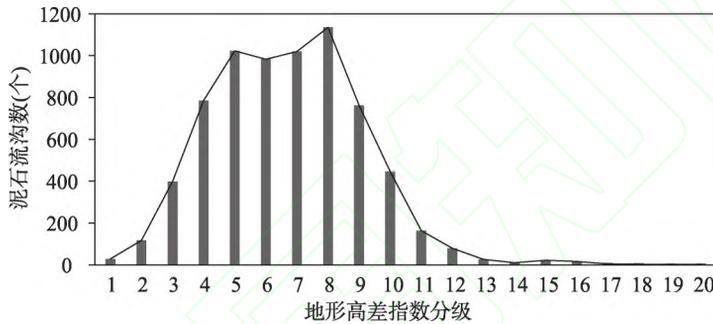


图5 横断山区泥石流沟数量随地形高差的分布情况

Fig. 5 Histogram of debris-flow catchments with relative elevation of the Hengduan Mountains region

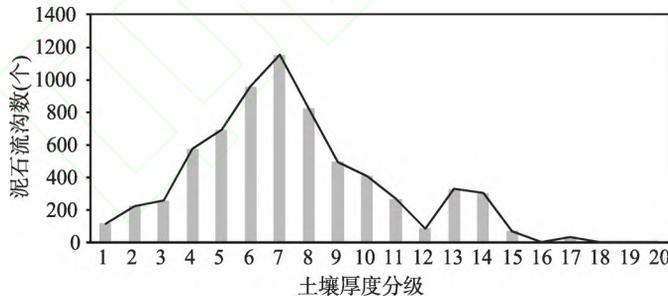


图6 横断山区泥石流沟数量随土壤厚度的分布情况

Fig. 6 Histogram of debris-flow catchments with soil thickness of the Hengduan Mountains region

较小的地方，往往是山区坡陡的地方，多以崩塌等为主，泥石流较少；而湿度指数较大的地方，坡度较缓，径流量大，容易形成山洪或含沙水流。泥石流沟随土壤厚度的分布有两个峰值。在地形较陡的山区随着土壤厚度的增加，物源量可能更多，进而更容易发生泥石流；相反，在平均坡度较小的区域，尽管堆积的土壤厚度大。但岩土体的势能低，因而泥石流发生相对较少。

3.2 泥石流灾害事件与降水特征因子的时间关联性

横断山区泥石流灾害事件数与降水统计特征值的年际变化曲线表明（图7），不论是年降水，还是日降水> 10 mm、> 25 mm、> 50 mm的天次数，1998-2017年间均一致地表现为先减少后增加的趋势，而泥石流灾害数则呈现先增加后减少的趋势。部分泥石流灾害数峰值与降水特征值的峰值相匹配，如1998年、2001年、2007年以及2010年。但

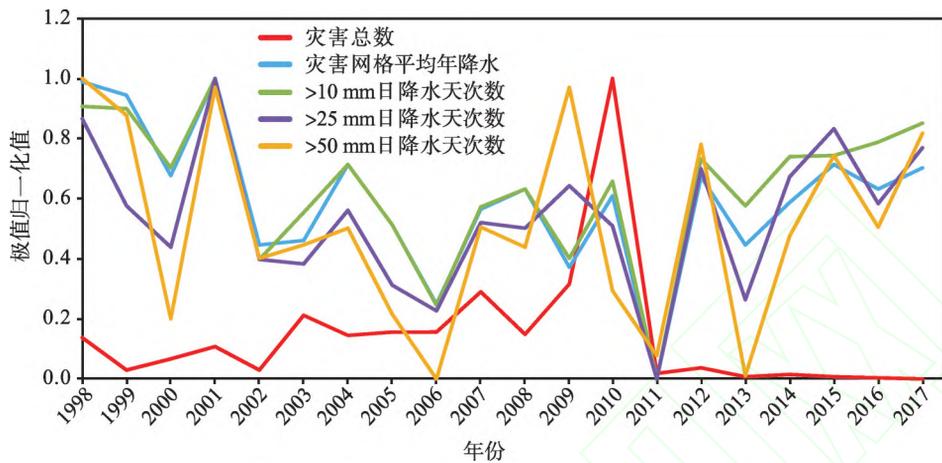


图7 1998-2017年灾害总数、灾害网格平均年降水以及日降水量 $> 10\text{ mm}$ 、 $> 25\text{ mm}$ 、 $> 50\text{ mm}$ 天次数归一化
Fig. 7 The normalized total number of debris-flow disasters, the average annual precipitation in the disaster grid and the number of days with daily precipitation $> 10\text{ mm}$, $> 25\text{ mm}$ and $> 50\text{ mm}$

2012年以后,由于国家山洪非工程措施和地质灾害监测预警系统等减灾工程的实施,灾害事件数明显偏少。因此,时间维度上的关联分析主要以1998-2012年的数据为准。

灰色关联度的计算结果表明,横断山区泥石流灾害与网格平均日降水 $> 25\text{ mm}$ 降水的天次数关联度最高,其次是 $> 50\text{ mm}$ 的天次数,再次是区域年平均降水,最后是 $> 10\text{ mm}$ 的天次数(图8a)。然而,具体到每个子区情况有所不同。子区1主要位于横断山东部季风区,海拔较低,年平均降水最多,其泥石流灾害次数变化与日降水 $> 25\text{ mm}$ 和 $> 50\text{ mm}$ 的天次数变化关系最为密切,表明子区1内的泥石流灾害可能主要受大雨和暴雨及以上降水天次数的年际变化控制(图8b)。子区2纬度较低,其灾害数变化主要受日降水 $> 25\text{ mm}$ 的天次数因素影响,与日降水 $> 50\text{ mm}$ 的天次数关联度最低(图8c)。子区3平均海拔相对较低,年均降水量也相对偏多,区域年平均降水对其泥石流灾害变化有较大影响(图8d)。子区4的网格平均年降水及日降水量 $> 10\text{ mm}$ 、 $> 25\text{ mm}$ 、 $> 50\text{ mm}$ 的天次数与灾害总数的灰色关联度依次增加,表明该地区泥石流灾害年际变化受暴雨天次数的影响最大。子区5处于高山地貌,降水偏少,关联度显示其泥石流灾害在时间尺度上与日降水 $> 50\text{ mm}$ 的区域天次总数变化最相关。整体来讲,从年际变化角度来看,每类子区泥石流灾害数与各降水因素的关联度与整个横断山区有明显差异,且各个子区之间也存在较大的不一致性,这可能与各子区不同的气候、地质、地貌等多因素相互作用有关。

3.3 泥石流事件的影响因素

根据地理探测器的结果,分析前3个因子(地形湿度指数、地形高差、土壤厚度)及激发降雨量与泥石流发生频率分布的关系。激发降雨量(mm)取值范围(0, 169],共分成8级。其中,[20, 140]按等间距分成6级。地形湿度指数、地形高差、土壤厚度取值区间与地理探测器采用的区间一致(图9)。结果表明,泥石流事件发生频率随激发降雨量的增加呈先增后减的分布特征,分布峰值出现在第2和第3个区间(即[20, 40]和[40, 60])。从事件频率与地形湿度指数的对应关系来看,泥石流主要发生在前两个区间,即平均地形湿度指数小于3.5的范围。尽管泥石流事件均匀分布在高差势能适中的区域,但各区泥石流频率峰值对应的高差区间有较大差别。土壤厚度与泥石流频率的对应关系在各区差异明显,而不同土壤厚度分级下的各区差异较为一致。但值得注意的是,第2和4子区在

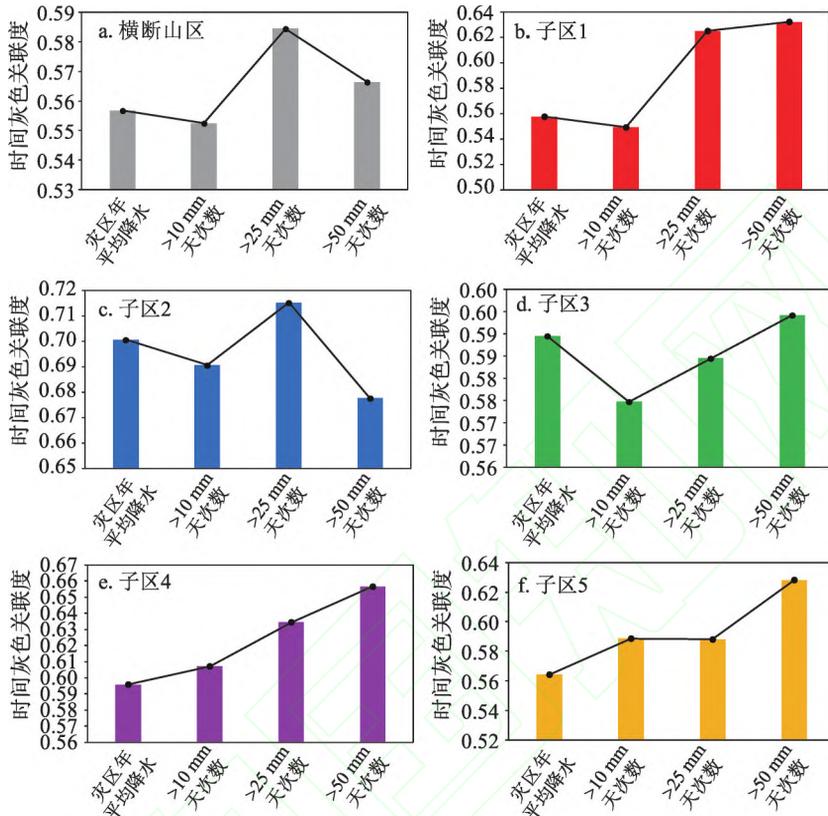


图8 横断山区灾害网格平均年降水及日降水量> 10 mm、> 25 mm、> 50 mm的天次数与灾害总数的灰色关联度

Fig. 8 Grey correlation degree between average annual precipitation and daily precipitation over 10, 25 and 50mm in the grid of Hengduan Mountain disaster and the total number of disasters in (a) the whole Hengduan Mountains region and (b-f) the first to the fifth sub-regions

土壤厚度区间[2.625, 4.35) 和[4.35, 6.79) 对应的泥石流频率明显高于其他情况，几乎达到70%，表明这两类区域泥石流的发生与土壤厚度因素有较大的关系。可见，不同地貌、地质和气候类型组合下，激发雨量、地形湿度、高差及土壤厚度等因素对应的泥石流频率有所区别，甚至某些因素在一些子区内可能起着关键作用。这意味着横断山区泥石流预警不仅需要考量雨量等直接激发因素，还必须考虑各区环境因素的空间差异性。

4 结论与讨论

本文采用地理探测器和灰色关联分析等方法，探讨了横断山区多个环境因子与泥石流沟空间分布的关系，以及泥石流灾害与降水特征的时间关联性，揭示了不同地貌、地质和气候区的泥石流灾害事件的降雨特征。研究表明，地形湿度指数是决定横断山区泥石流沟空间格局的最主要环境因子，其次是地形高差和土壤厚度，降水特征要素的多年平均分布对泥石流沟数量分布的影响较小。泥石流灾害事件与降水特征的时间关联度具有较大的区域异质性，第2类子区泥石流灾害事件与> 25 mm日降雨天数关联度最高，其他类型区则是> 50 mm的天数影响更大。横断山区激发雨量、地形湿度、高差及土壤

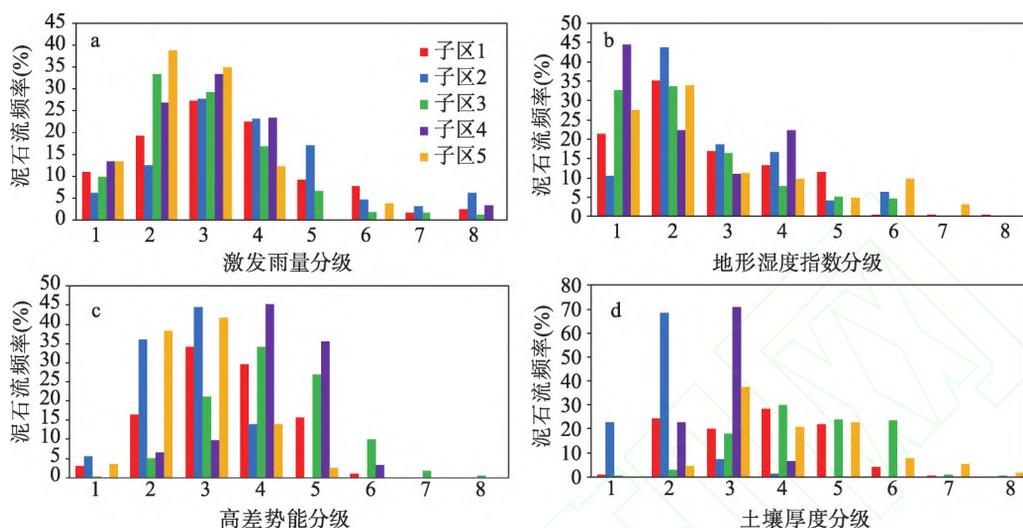


图9 横断山区不同子区泥石流灾害事件频率分布统计

Fig. 9 Frequency of debris-flow occurrence in different sub-regions of the Hengduan Mountain region

厚度等因素对应的泥石流频率在不同子区中有明显差异。

目前所收集的泥石流灾害事件记录仅有863个,样本相对稀疏,对统计分析结果有一定影响。此外,TRMM等多数的卫星或再分析降水产品难以反映复杂山区小空间尺度的天气特征^[30]。25 km网格的TRMM降水与泥石流灾害事件存在空间位置不完全匹配的问题。为了尽可能保证数据的合理性,分析工作多以粗分辨率网格为单元进行大尺度研究,重点是揭示横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性。

参考文献(References)

- [1] Zheng Du. Natural geographical differentiation and natural division of Hengduan Mountains area. Mountain Research, 1989, 7(1): 1-2. [郑度. 横断山区自然地域分异和区划. 山地学报, 1989, 7(1): 1-2.]
- [2] Li Binyuan. Geomorphologic regionalization of the Hengduan Mountains region. Mountain Research, 1989, 7(1): 13-20. [李炳元. 横断山区地貌区划. 山地研究, 1989, 7(1): 13-20.]
- [3] Lv Ruren, Li Deji. Active characteristics, formative conditions and control of debris flow in Hengduan Mountainous region. Mountain Research, 1986, 4(1): 37-44, 116. [吕儒仁, 李德基. 横断山区泥石流活动特点形成条件及防治问题. 山地学报, 1986, 4(1): 37-44, 116.]
- [4] Cui Peng, Jia Yang, Su Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 985-992. [崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985-992.]
- [5] Cui Peng, Zhuang Jianqi, Chen Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition) 2010, 42(5): 10-19. [崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 10-19.]
- [6] Zhang S, Zhang L, Lacasse S, et al. Evolution of mass movements near epicentre of Wenchuan earthquake, the first eight years. Scientific Reports, 2016, 6: 36154.
- [7] Qin Dahe, Zhang Jianyun, Shan Chunchang, et al. China's Climate Extreme and Disaster Risk Management and Adaptation to the National Assessment Report. Beijing: Science Press, 2015. [秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告, 北京: 科学出版社, 2015.]
- [8] Qin P, Xie Z. Detecting changes in future precipitation extremes over eight river basins in China using RegCM4 downscaling. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121: 6802-6821.
- [9] Winter M, Dent J, Macgregor F, et al. Debris flow, rainfall and climate change in Scotland. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2010, 43: 429-446.

- [10] Huang R, Fan X. The landslide story. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 325-326.
- [11] Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 751-758. [唐川, 梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 751-758.]
- [12] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187-194.
- [13] Guo Xiaojun, Cui Peng, Marchi Lorenzo, et al. Characteristics of rainfall responsible for debris flows in Wenchuan earthquake area. *Environmental Earth Science*, 2017, 76: 596.
- [14] Guo Xiaojun, Cui Peng, Li Yong, et al. Spatial features of debris flows and their rainfall thresholds in the Wenchuan earthquake-affected area. *Landslides*, 2016, 13(5): 1215-1229.
- [15] Ma Chao, He Xiaoyang, Hu Kaiheng. Preliminary research on the rainfall threshold and warning grades of clustering debris flow in Wenchuan earthquake region, southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(9): 37-44. [马超, 何晓燕, 胡凯衡. 汶川地震灾区泥石流群发雨量及预警等级划分. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 37-44.]
- [16] Lei Fahong, Hu Kaiheng, Hu Yunhua, et al. Excitation rainfall of debris flows in the stricken area of Wenchuan earthquake. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(2): 199-203. [雷发洪, 胡凯衡, 胡云华, 等. 汶川地震灾区震后泥石流激发雨量研究. *灾害学*, 2014, 29(2): 199-203.]
- [17] Ding Mingtao, Wang Jun, Cheng Zunlan, et al. Sensitivity of land use types to debris flow in the upper reaches of Min River, China. *Mountain Research*, 2015, 33(5): 587-596. [丁明涛, 王骏, 程尊兰, 等. 岷江上游土地利用类型对泥石流灾害的敏感性. *山地学报*, 2015, 33(5): 587-596.]
- [18] Ding Jun, Wang Jun. Analysis of the geological hazards' distribution and development trend in Dadu River catchments of Sichuan Province. *The Chinese Journal Geological Hazard and Control*, 2007, 18(S1): 22-25. [丁俊, 王军. 四川省大渡河流域地质灾害分布及其发展趋势浅析. *中国地质灾害与防治学报*, 2007, 18(S1): 22-25.]
- [19] Bian Jianghao, Li Xiuzhen, Hu Kaiheng. Study on distribution characteristics and dynamic evolution of mountain hazards in Hengduan Mountains area. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(s): 6-13. [边江豪, 李秀珍, 胡凯衡. 横断山区山地灾害的区域分布特征与动态演化规律研究. *工程地质学报*, 2018, 26(s): 6-13.]
- [20] Hu Kaiheng, Chen Cheng, Li Xiuzhen, et al. Dynamic assessment of debris-flow susceptibility under the influence of earthquake and rainfall events. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(2): 1-8. [胡凯衡, 陈成, 李秀珍, 等. 地震区降雨作用下泥石流易发性动态评估. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(2): 1-8.]
- [21] The Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Science Research Team of the Chinese Academy of Sciences, Zhang Rongzu, Zheng Du, et al. *Natural Geography of Hengduan Mountain*. Beijing: Science Press, 1997. [中国科学院青藏高原综合科学考察队, 张荣祖, 郑度, 等. 横断山区自然地理. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [22] Pan Yusheng. Division of geologic structure in the Hengduan Mountainous region. *Mountain Research*, 1989, 7(1): 3-12. [潘裕生. 横断山区地质构造分区. *山地研究*, 1989, 7(1): 3-12.]
- [23] Zhu G, He Y, Pu T, et al. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 71-85.
- [24] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017(1): 116-134.]
- [25] Reichenbach P, Rossi M, Malamud B, et al. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 2018, 180: 60-91.
- [26] Deng Huiping, Li Xiubin. Relationship of upslope contribution area and soil water content in TOPMODEL. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 103-110. [邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 103-110.]
- [27] Zhang Yiguang. Climatic division of the Hengduan Mountainous region. *Mountain Research*, 1989, 7(1): 21-28. [张谊光. 横断山区气候区划. *山地研究*, 1989, 7(1): 21-28.]
- [28] Singh T, Patnaik A, Chauhan R. Optimization of tribological properties of cement kiln dust-filled brake pad using grey relation analysis. *Materials & Design*, 2016, 89: 1335-1342.
- [29] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. Relationship between rainfall characteristics and total amount of debris flow. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 77-83. [庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 降雨特征与泥石流总量的关系分析. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 77-83.]
- [30] Yong B, Liu D, Gourley J J, et al. Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: Implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(2): 283-296.

Spatial pattern of debris-flow catchments and the rainfall amount of triggering debris flows in the Hengduan Mountains region

HU Kaiheng^{1,2}, WEI Li^{1,2,3}, LIU Shuang^{1,2}, LI Xiuzhen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Environmental factors determine the spatial and temporal distribution of debris flows. Understanding the relationship between debris flows and their effective factors is important for debris flows risk assessment at regional scale. In this paper, geographic detectors and gray correlation analysis are used to explore the relationship between 11 influencing factors, including precipitation, climate, landforms, geology, land cover type, soil thickness and topographic wetness, and the spatial distribution of debris flows-prone catchments, as well as the spatial and temporal correlation between precipitation and debris flows disasters in the Hengduan Mountains region. The results show that the topographic wetness index is the most dominant factor controlling the spatial distribution of the catchments, followed by topographic relief and soil thickness. Temporal correlation between debris flows disasters and precipitation characteristics has large regional heterogeneity. The rainfall characteristics of debris flows disaster events in different regions exhibit significant difference. The frequency of debris flows with rainfall, topographic wetness, topographic relief and soil thickness in the Hengduan Mountains region varies significantly in different zones, which indicates that not only the rainfall but also the other factors controlling the spatial pattern of debris flows should be reflected in debris flows early warning model in the region.

Keywords: debris flows disaster; environmental factors; rainfall characteristics; geographical detectors; grey relational analysis