

doi:10.3799/dqkx.2016.514

浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报

冯杭建^{1,2}, 周爱国^{1*}, 唐小明², 俞剑君³, 游省易²

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 浙江省地质矿产研究所, 浙江杭州 310007

3. 牛津大学地理与环境学院环境变化研究所, 英国牛津 OX13QY

摘要: 泥石流灾害是我国东南地区引起群死群伤的主要自然灾害, 目前对其发育规律和区域预报的研究程度还较低. 基于浙江省小流域泥石流地质灾害调查评价成果数据, 开展沟谷泥石流发育特征和时空分布规律研究, 研究表明, 浙江省泥石流发生时期集中在台汛期和梅汛期, 其中台汛期发生的泥石流占总数的 70.1%, 梅汛期占 27.4%, 可见台风诱因显著; 泥石流在浙江省三大降雨区, 即台风雨主控区、梅雨主控区和梅台雨兼容区的空间分布具有明显差异性, 总体上东南沿海一带台风雨控制区分布密度要大于西部和北部地区, 而梅汛期发生泥石流则比较明显集中在西部地区. 在此基础上, 分别求取了梅汛期和台汛期的浙江省东南地层区和扬子地层区引发泥石流的降雨阈值; 选择泥石流易发程度区划图、24h 预报雨量和前期有效降雨量 3 个因子, 以小流域作为评价单元, 基于可拓理论方法, 构建了泥石流危险性区域预报模型. 采用灾害强度 R 值和危险性等级面积百分比累加—泥石流频度百分比累加曲线两种方法, 以 2004 年“云娜”台风期间和 2006 年 6 月份梅雨期发生的泥石流灾害样本开展模型合理性检验, 证明预测结果合理.

关键词: 泥石流; 发育分布规律; 可拓方法; 降雨阈值; 区域预报; 灾害防治; 工程地质.

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2016)12-2088-12

收稿日期: 2016-04-02

Development and Distribution Characteristics of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Regional Forecast

Feng Hangjian^{1,2}, Zhou Aiguo^{1*}, Tang Xiaoming², Yu Jianjun³, You Shengyi²

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, Hangzhou 310007, China

3. Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford, Oxford OX13QY, UK

Abstract: Debris flow is one of the major geohazards that may lead to mass injuries or casualties in Southeast China, however, studies on the development law and predictions need to be furthered. This study presents the characteristics of debris flow development and spatial-temporal distribution in Zhejiang Province based on the results of small drainage geohazards survey. It is found that the debris flows mainly occur in Meiyu period (i. e. 27.4%) and typhoon season (i. e. 70.1%). Generally, the debris flows in typhoon season are mostly distributed in southeast Zhejiang, whereas those in Meiyu period are distributed in west. Based on that, rainfall thresholds of different raining seasons have been determined. Separate forecasting models based on extension method have been established taking small drainage as assessment unit, where the susceptibility map, 24-hour forecast rainfall and effective antecedent precipitation are employed as model inputs. Two debris flows, occurred in Yunna typhoon period in 2004 and in Meiyu period in June, 2006, were selected to validate the established forecasting models. The results in terms of hazard intensity (R) and receiver operating characteristic curve (ROC) confirm the feasibility of the proposed scheme for debris flow forecasting.

Key words: debris flow; development and distribution characteristics; extension method; rainfall threshold; regional forecast; disaster prevention; engineering geology.

基金项目: 浙江省公益技术应用研究项目(No. 2016C33045); 浙江省国土资源厅“浙江省小流域泥石流地质灾害综合研究”项目.

作者简介: 冯杭建(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为地质灾害预测和风险评估. E-mail: pcerma@foxmail.com

* **通讯作者:** 周爱国, E-mail: aiguo Zhou@cug.edu.cn

引用格式: 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2016. 浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报. 地球科学, 41(12): 2088-2099.

浙江省位于我国东南沿海,常遭受台风暴雨侵袭,地质灾害频发,其中,泥石流灾害是造成群死群伤的主要地质灾害。据 2011—2015 年浙江省地质环境公报数据,“十二五”期间浙江省造成重大人员伤亡和财产损失的 21 起地质灾害中,由泥石流造成的人员死亡和失踪的比例高达 68%。其中造成单起死亡(失踪)人数 3 人以上的地质灾害均为泥石流灾害,危害特别严重。从 2000 年以来,对浙江省造成严重滑坡泥石流灾害的台风主要有:2004 年“云娜”台风、2005 年“泰利”台风、2006 年“桑美”台风、2007 年“韦帕”和“罗莎”台风、2009 年“莫拉克”台风、2012 年“海葵”台风、2013 年“菲特”台风和 2015 年“苏迪罗”台风,引发了诸如乐清北部山区、庆元、青田、上虞、平阳等地群发性泥石流灾害,造成了严重的人员伤亡和财产损失。此外,梅汛期局地短历时强

降雨引发的泥石流灾害近年来也有增长的趋势,比如 2014 年 6 月份梅汛期龙泉市龙渊街道一村泥石流造成 3 人死亡,遂昌县黄沙腰镇大熟村特大型泥石流造成大量民房倒塌和农田损毁(图 1)。

开展降雨引发的滑坡泥石流灾害预警预报工作,是避免滑坡泥石流造成人员伤亡和财产损失的有效手段。我国泥石流预警预报研究程度较高的区域主要在我国西部地区(谭炳炎,1994;谭万沛等,2000;崔鹏等 2005;韦方强等,2005;张京红等,2008;唐川,2010;周伟和唐川,2013)和北部地区(靳怀成等,2004;丛威青等,2006;白利平等,2009),而我国东南沿海地区泥石流预警预报研究程度相对较低。东南沿海地区由于其所处地质环境和气候条件特殊,发育的泥石流有其独特的地域特征,西部地区泥石流预报的研究成果,对于东南沿海台风暴雨型



图 1 浙江省近年来造成重大人员伤亡和财产损失的泥石流灾害

Fig. 1 The major debris flows causing severe casualties and property losses occurred in Zhejiang in recent years

a. 2004 年“云娜”台风引发的乐清龙西仙人坦泥石流; b. 2004 年“云娜”台风引发的乐清仙溪白岩山下屋泥石流; c. 2006 年“桑美”台风引发的庆元县荷地镇石磨下村泥石流; d. 2007 年“韦帕”台风引发的青田县小舟山乡乌马沙泥石流; e. 2013 年“菲特”台风引发的上虞区曹娥街道朱山头村泥石流; f. 2012 年 8 月 10 日局地特大暴雨引发嵊州市长乐镇寨岭头自然村“8·10”泥石流; g. 2014 年 6 月梅汛期局地强降雨引发的遂昌县黄沙腰镇大熟村特大泥石流; h. 2014 年 6 月梅汛期局地强降雨引发的龙泉市龙渊街道一村泥石流; i. 2015 年“苏迪罗”台风引发的平阳县顺溪镇石柱村泥石流

泥石流的预测预报和防治未必完全适用. 因此, 本文选择浙江省为研究区, 分析我国东南地区降雨引发泥石流灾害的发育分布特点, 提出并构建与之相适应的预警预报模型, 以提高泥石流防灾减灾能力.

1 研究技术路线

国外关于滑坡泥石流的预报系统大多基于降雨强度—历时阈值预报法(Caine, 1980; Keefer *et al.*, 1987; Jibson, 1989; Wiczorek *et al.*, 2000; Casadei *et al.*, 2003; Guzzetti *et al.*, 2007; Dowl-ing and Santi, 2013; Gariano *et al.*, 2015), 通过对引发(或未引发)滑坡和泥石流的历史降雨数据的统计分析来确定可能引发滑坡、泥石流的临界降雨量作为滑坡泥石流是否发生的阈值开展预报工作. 国内学者也大多以降雨作为主要研究对象, 通过对滑坡泥石流事件和对应的降雨事件进行统计分析, 确定灾害发生时的临界降雨量作为实时预报的阈值, 以此为判据结合雨量观测和降雨预报数据开展滑坡泥石流预报(谭炳炎等, 1992; 刘传正等, 2004; 侯圣山等, 2007; 殷坤龙等, 2007; 周平根等, 2007; 白利平等, 2008; Li *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2014; 马云等, 2014).

针对泥石流灾种而言, 近年来国内泥石流预报模型采用较多的方法是可拓方法(蔡文, 1999), 如韦方强等(2004)和白利平等(2009)采用可拓方法开展了北京山区的泥石流预报, 匡乐红等(2006)和谷复光等(2010)基于模糊可拓方法开展了泥石流危险度区划研究. 本文也将基于可拓方法开展降雨引发泥石流危险性预报研究, 研究技术路线如图 2 所示. 首先, 以浙江省 2005—2008 年开展的全省 48 个山区县(市、区)小流域泥石流灾害调查成果数据为基础,

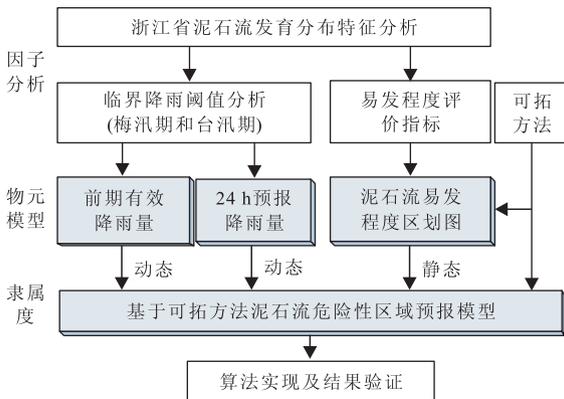


图 2 研究技术路线
Fig. 2 Research model

进行泥石流发育特征和时空分布规律研究; 然后, 在此基础上进行小流域泥石流易发程度区划和引发泥石流降雨阈值研究, 建立符合浙江省泥石流发育特点的泥石流危险性区域预报模型; 最后, 进行算法实现和模型预测结果检验.

2 泥石流发育分布规律分析

2.1 泥石流概况

2005—2008 年, 浙江省率先在全国开展了以县(市、区)为单位的山区小流域泥石流地质灾害的专项调查与评价工作(冯杭建等, 2013), 建立了较为完整的泥石流灾害编目数据库, 该库详细记录了 1990—2007 年期间浙江省已发生的 486 处泥石流灾害(图 3), 包括坡面型泥石流 139 处, 占 28.6%, 沟谷型泥石流 347 处, 占 71.4%. 由于本次调查工作主要以沟谷泥石流类型为主, 系统全面地编录了浙江省历史上发生的主要沟谷泥石流灾害, 因此, 本文主要基于上述 347 处沟谷泥石流样本数据开展发育分布特征和区域预报研究.

2.2 发育特点

我国西南、北部、西北黄土高原等不同地区发育的滑坡泥石流均有各自不同的发育特点(邱海军, 2016). 下面主要从相对高差等 7 个方面来分析浙江省沟谷泥石流的发育特点.

(1) 相对高差: 泥石流沟两侧山体相对高差为

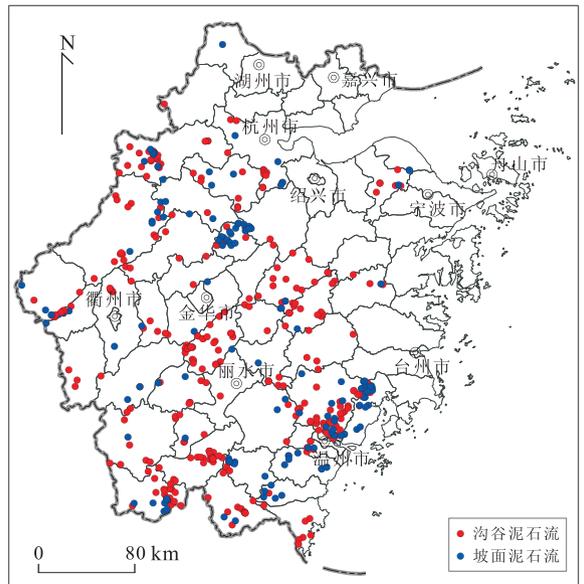


图 3 历史泥石流分布
Fig. 3 The distribution of historical debris flows

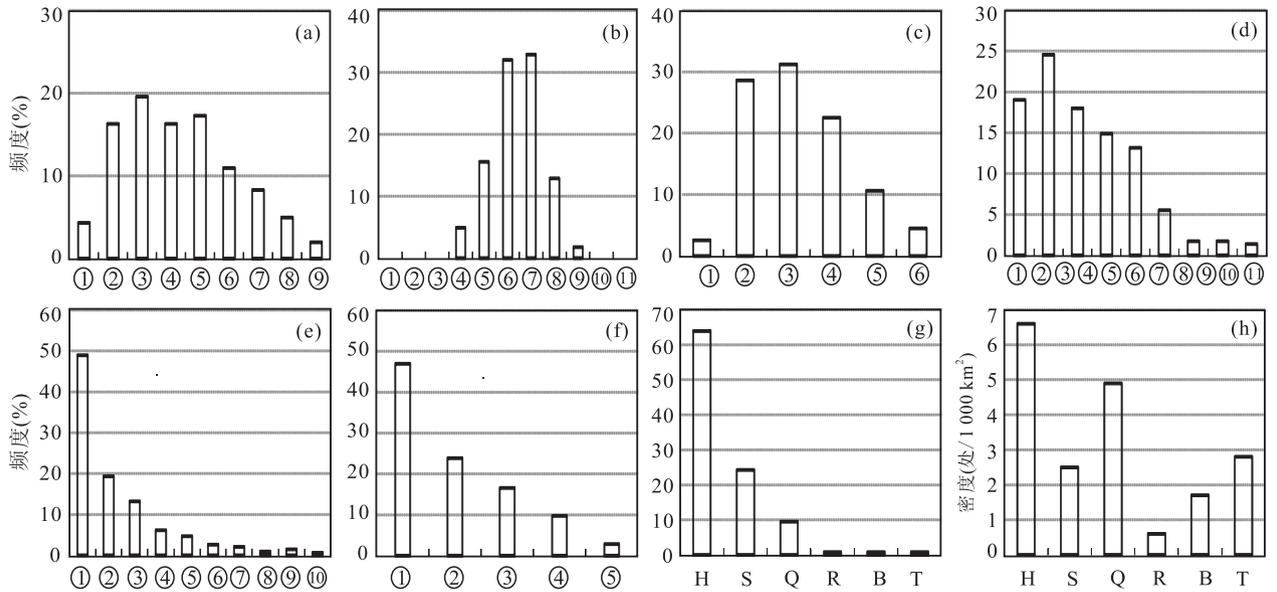


图 4 不同影响因素下泥石流频度分布

Fig. 4 The frequency ratios of debris flows in various controlling factors

a. 相对高差, ①<100 m, ②100~200 m, ③200~300 m, ④300~400 m, ⑤400~500 m, ⑥500~600 m, ⑦600~700 m, ⑧700~800 m, ⑨>800 m; b. 山坡坡度, ①<10°, ②10°~15°, ③15°~20°, ④20°~25°, ⑤25°~30°, ⑥30°~35°, ⑦35°~40°, ⑧40°~45°, ⑨45°~50°, ⑩50°~55°, >55°; c. 纵坡降, ①<100, ②100~200, ③200~300, ④300~400, ⑤400~500, ⑥>500; d. 主沟长度, ①<0.4 m, ②0.4~0.8 m, ③0.8~1.2 m, ④1.2~1.6 m, ⑤1.6~2.0 m, ⑥2.0~2.4 m, ⑦2.4~2.8 m, ⑧2.8~3.2 m, ⑨>3.2 m; e. 流域面积, ①<0.5 m², ②0.5~1.0 m², ③1~1.5 m², ④1.5~2.0 m², ⑤2.0~2.5 m², ⑥2.5~3.0 m², ⑦3.0~3.5 m², ⑧3.5~5.0 m², ⑨5.0~10.0 m², ⑩>10.0 m²; f. 距断层距离, ①<0.5 km, ②0.5~1.0 km, ③1.0~1.5 km, ④1.5~2.0 km, ⑤>2.0 km; g. 工程地质岩组, H. 火山碎屑岩, S. 砂岩、砂砾岩、泥岩等碎屑岩, Q. 侵入岩, R. 熔岩, B. 变质岩, T. 碳酸盐岩; h. 在工程地质岩组中的分布密度, 横坐标代号同(g)

0~800 m(图 4a), 以 200~300 m 分布数量最多, 占总数的 19.6%。

(2) 山坡坡度: 泥石流沟发育数量最多的山体坡度范围是 25°~45°(图 4b), 该坡度范围的斜坡也是浙江省崩塌、滑坡灾害的高敏感性区域, 沟谷山体斜坡发生滑坡、崩塌可为泥石流启动和流通提供物源条件。

(3) 沟谷纵坡降: 泥石流发生频率随纵坡降呈现正态分布, 频率最高的沟谷纵坡降在 200‰~300‰之间(图 4c)。当沟床纵坡降增大时, 山体地形能给泥石流的启动和流通提供较好的动力条件, 但不利于沟道内松散物质的堆积; 而纵坡降减小时虽有利于沟道内松散物源堆积, 但对泥石流的起通和流通不利。

(4) 沟谷长度: 泥石流沟的主沟长度在 3.2 km 以内(图 4d), 其中又主要分布于 2.0 km 范围内, 占总数的 89.6%。各区间段中以 0.4~0.8 km 沟谷长度内分布的泥石流沟数量最多, 占总数的 24.6%。

(5) 流域面积: 泥石流在流域面积小于 0.5 km² 范围内的分布数量最多, 占总数的 49%(图 4e), 随着流域面积增大, 泥石流数量呈指数减少, 大于

2.0 km² 的泥石流只占总数的 12.3%。

(6) 距断层距离: 统计距断层不同距离(x)缓冲区内的沟谷泥石流数量(y)可以发现, 两者具有较好的指数函数关系:

$$y = 97.9e^{-0.65x}, R^2 = 0.95, \quad (1)$$

即距断层越近的缓冲区内, 泥石流的分布数量越多, 反之则少(图 4f), 在距离断层 0.5 km 缓冲区内的泥石流占总数的 47%。

(7) 地层岩性: 泥石流在各岩组中分布数量大小依次为: 火山碎屑岩>碎屑岩>侵入岩>熔岩>变质岩>碳酸盐岩(图 4g), 其中在火山碎屑岩中分布数量最多, 占总数的 64%。花岗岩等侵入岩内发育的泥石流总数虽不多, 占总数的 9.5%, 但是其密度较大(图 4h), 达到 4.9 处/km², 这与侵入岩岩性大多易于风化往往形成厚度较大的松散堆积层有关, 这些风化松散物质可为泥石流提供充足的物源条件。

综上所述, 浙江省沟谷泥石流相比于我国其他地域, 具有两侧山体相对高差较小、山体斜坡坡度大、沟谷纵坡降较大、沟谷流域面积较小、沟谷主沟流程较短等典型发育特点(游省易等, 2013); 在地层

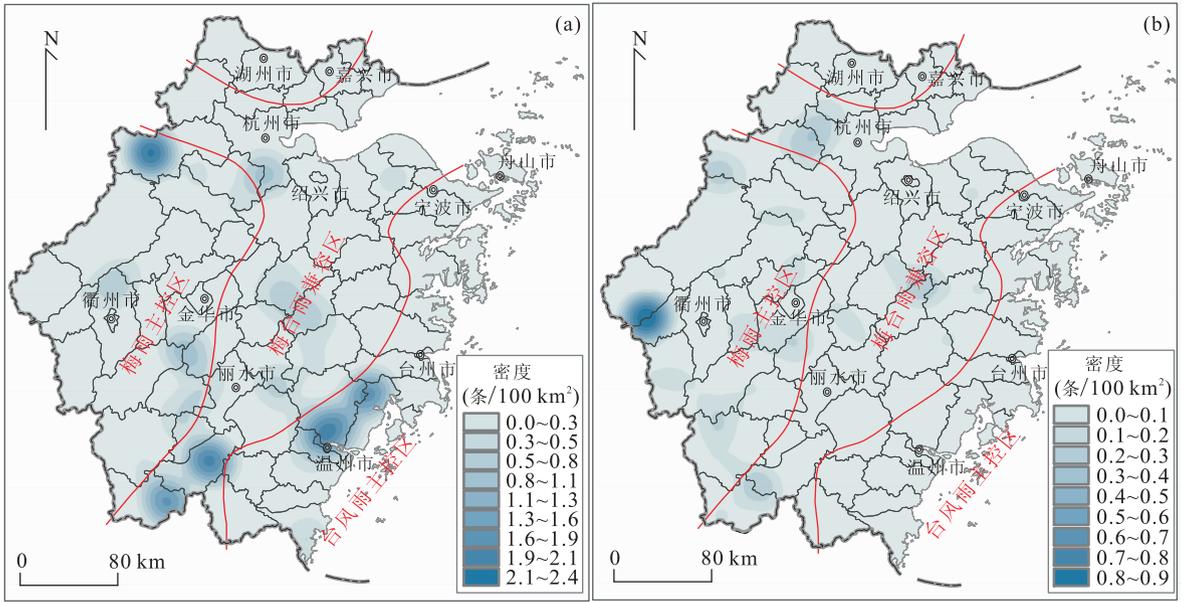


图 5 泥石流分布密度

Fig. 5 The distribution of debris flows density

a. 台汛期密度图; b. 梅汛期密度图

岩性和构造方面,在火山碎屑岩和砂岩、泥岩等碎屑岩岩组中较为发育,分布数量距断层由近及远有逐渐减少的趋势。

2.3 在降雨区的空间分布特征

按照降雨的年内分配和降水成因,浙江省范围大致可分为 3 个降雨分区,即:台风雨主控区、梅雨主控区和梅台雨兼容区,不同时期发生的泥石流在不同降雨区的空间分布密度如图 5 所示。其中,台汛期发生的泥石流在全省均有分布(图 5a),但在东南沿海台风雨主控区分布较为集中,特别是温州市的乐清、永嘉和丽水市南部的庆元和景宁等县市分布尤为密集。这一区域受台风影响强烈,加之受山区特殊地形地貌控制,有利于台风期发生强降雨事件,从而引发泥石流灾害(Ma *et al.*, 2015)。西部梅雨主控区的泥石流在整个区域分布都较少,但在临安、浦江和武义一带分布较多。梅汛期泥石流总体上比台汛期要少,且受降雨区的控制明显(图 5b),主要分布在浙西梅雨主控区,在浙西衢州市的开化、常山分布密度最大,而东南沿海一带台风雨主控区和梅台雨兼容区则很少分布。

2.4 发生时间分布特征

浙江省滑坡泥石流发生与降雨强度具有强相关性(Li *et al.*, 2011)。浙江省月平均降雨量(1990—2007 年)(Ma *et al.*, 2014)呈现比较典型的“双峰”结构(图 6),6 月达到梅汛期降雨峰值,8 月份达到

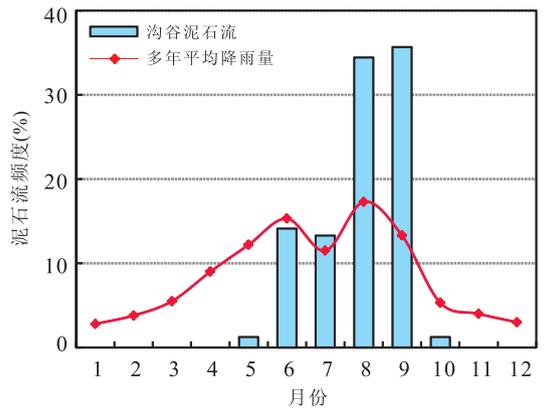


图 6 月平均降雨量(1990—2007 年)和月平均泥石流发生数量频度分布

Fig. 6 The monthly precipitation (1990—2007) and frequency ratio of debris flows in each month

台汛期降雨峰值,同样,泥石流的发生频率与月均降雨量的分布基本一致,即在 6、7 月份梅汛期和 8、9 月台汛期达到峰值,呈现出典型的“双峰”结构(岳丽霞等,2010),这两个峰值月份发生的泥石流数量占全年发生总数的 95.4%。从月平均降雨量看,两个峰值降雨量相差不大,但是泥石流发生数量却有明显差异,8、9 月台汛期峰值泥石流占 70.1%,而 6、7 月份梅汛期峰值泥石流占 27.4%,台汛期比梅汛期发生泥石流多 42.7%。究其原因,主要是两个汛期降雨特点不同,对东南地区泥石流而言,降雨强度是引发泥石流的一个重要因素,台汛期台风雨具有历

时短强度大的特点,影响时间一般不超过 2 天,如 2004 年“云娜”台风期间佛头雨量站观测雨量,最大 1 h、6 h 和过程雨量达到了 91.5 mm、357.5 mm 和 863.5 mm,分别为 50、80 和 100 年一遇的降雨量;而梅汛期期的降雨通常历时较长,但是降雨强度特别是小时降雨强度不及台风降雨,从而导致梅汛期泥石流发生数量要大大小于台汛期.因此,在下面构建泥石流区域预报模型时,也将分别计算台汛期和梅汛期引发泥石流的降雨阈值,分别开展台汛期和梅汛期的泥石流预报.

3 泥石流区域预报模型构建

降雨引发泥石流危险性区域预报模型的构建,主要包括评价单元划分、评价指标体系建立、降雨阈值计算、评价方法选择等内容,其核心是降雨阈值的确定和评价方法的实现.

3.1 评价单元和指标体系

(1)评价单元划分.本研究以浙江省水利部门划定的小流域多边形作为泥石流危险性预报的基本单元,共计 1 536 个,基本上覆盖了浙江省的山区.

(2)评价指标体系建立.泥石流发生的影响因素主要包括地形、地貌、地层岩性、地质构造、人类活动和降雨等.其中,地形、地貌、地层岩性、地质构造、植被、土壤、土地利用等因子代表下垫面因素,随时间变化很小,是相对静态或稳定的影响因素,因此在本研究中将其以“常量”的形式,即易发程度区划图进行表达.易发程度区划图是地质灾害预警预报的重要基础(冯杭建等,2016),本文泥石流易发程度区划图采用可拓方法进行编制,影响因子选择相对高差、地形坡度、地质构造、地层岩性、土壤、不良地质现象和多年平均降雨量 7 个因子,易发程度分为高易发、中易发、低易发和不易发 4 级(图 7).

降雨是泥石流的动态诱发因素,可在短时间内频繁变化,在本研究中选择前期有效降雨量和 24 h 预报降雨量两个指标进行综合表达,既考虑短历时激发雨强,即日雨量,也考虑前期长历时的累计雨量,即前期有效雨量.

综上,本文泥石流预报模型包含 3 个影响因子,即泥石流易发程度区划图、前期有效降雨和 24 h 预报降雨量.

3.2 降雨阈值分析

引发泥石流的降雨阈值是泥石流预报的最重要参数之一(Gariano *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015).

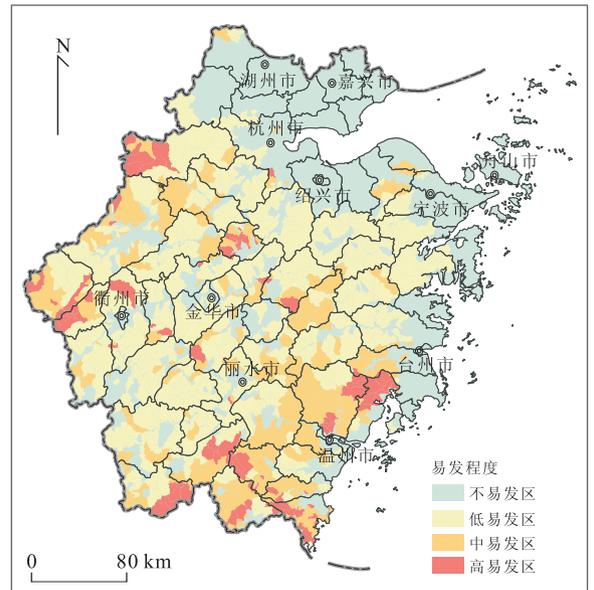


图 7 浙江省泥石流危险度区划

Fig. 7 The risk zonation of debris flows in Zhejiang Province

研究区泥石流主要发生在台汛期和梅汛期,由于这两个时期引发泥石流的降雨具有不同特点,因此笔者针对台风降雨和梅雨降雨分别计算降雨阈值.台风期临界降雨量计算结果表明(冯杭建等,2013):在前期有效降雨量大于 100 mm 或当日降雨量大于 100 mm 的情况下,泥石流发生的可能性较大;而在前期有效降雨量大于 200 mm 或当日降雨量大于 200 mm 的情况下,泥石流发生的可能性很大.因此下面主要针对梅汛期降雨开展降雨阈值讨论分析.

梅汛期引发泥石流降雨阈值采用前期有效雨量和当日雨量组合指标,其中前期有效雨量采用如下公式进行计算(吴益平,2014):

$$R_c = aR_1 + aR_2 + \dots + aR_n, \quad (2)$$

式中: R_c 为前期有效降雨量; R_n 为泥石流发生前第 n 天的降雨量; a 为衰减系数.针对浙江省梅汛期 a 的取值, a 取 0.8(杜惠良等,2006);浙江省台风期泥石流主要由 10 d 以内降雨引发,梅雨期泥石流由 15 d 以内引发(冯杭建等,2013),因此,除去灾害发生当天外,台风期取前 9 d 计算前期有效降雨量,梅雨期取前 14 d 计算前期有效降雨量.

除考虑降雨类型对降雨阈值的影响外,本文还考虑下垫面的情况.浙江省以江绍拼合带为界,东南地区和西北地区地质背景具有比较显著的差别,东南地区以巨厚的火山岩为主,而西北地区则以较老的沉积岩地层为主.因此,本研究以江绍拼合带为界,将历史泥石流样本分为扬子地台区(YZ 区)和华夏古陆区(HX 区)两大区域进行降雨阈值分析.

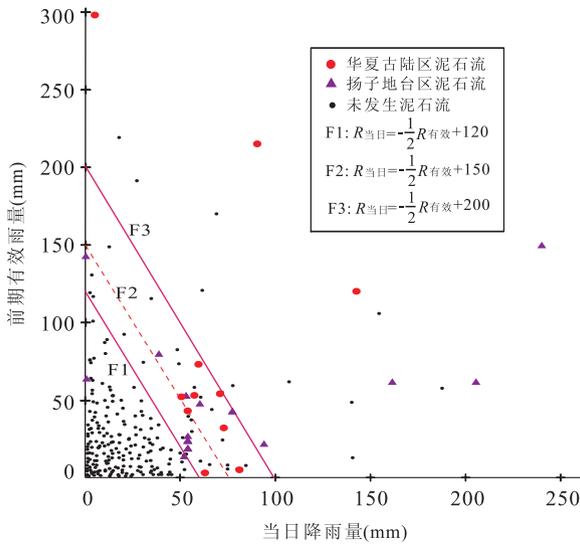


图 8 梅汛期泥石流前期有效降雨量和当日降雨量关系

Fig. 8 The relationship of effective antecedent precipitation and present day precipitation of debris flows occurred in plum rains season

根据公式(2)计算前期有效降雨量,并以其为纵坐标、当日降雨量为横坐标绘制两者关系图(图 8),图中直线 F1、F2 和 F3 为降雨阈值线.梅汛期扬子地层区引发泥石流的日降雨量和前期有效降雨量在直线 F1 下方时,几乎不发生泥石流;当位于直线 F1 和 F2 之间时,泥石流发生可能性逐渐增大;而在 F2 上方时,则发生大量泥石流.梅汛期东南地层区引发泥石流的日降雨量和前期有效降雨量在直线 F2 下方时,几乎不发生泥石流;当位于直线 F2 和 F3 之间时,泥石流发生可能性逐渐增大;而在 F3 上方时,则发生大量泥石流.

3.3 模糊可拓方法

采用模糊可拓方法对泥石流进行预报,即是小流域评价单元在泥石流易发程度、前期有效降雨和 24 h 预报降雨量这 3 个因子条件作用下,评估发生泥石流的概率大小.可以表示为评价单元 P 在状态 $R(W=x_1, J=x_2, Y=x_3)$ 下,对于单元格 P 有事物 B (包括 4 种事件,每种事件代表一个泥石流发生的概率等级)发生(靳怀成等, 2004).为了确定事物 B 中何种事件发生,需要建立关于事物 B 发生的标准物元模型,并将状态 R 下的各因子与其比较,计算各因子与这 4 种事件的关联度,再根据各因子的权重系数 α 计算评价单元 P 关于这 4 种事件的关联度 K ,计算公式如下:

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^3 \alpha_j K_j(x_i) \quad (i=1,2,3; j=1,2,3,4), \quad (3)$$

式中:权重系数 α 通过层次分析法(Shahabi *et al.*, 2014)进行确定,梅雨期泥石流易发程度、24 h 预报降雨量和前期有效降雨量的权重系数 α 取值分别为:0.164、0.297、0.539,台风期 α 取值分别为:0.144、0.413、0.443.

最后,根据最大隶属度原则确定 4 种事件中的何种事件发生,如果:

$$K_{j_0}(P) = \max_{j_0 \in \{1,2,3,4\}} K_j(P), \quad (4)$$

则小流域评价单元发生 j_0 对应的事件.

3.4 标准物元模型

建立标准物元模型是实现可拓方法的技术关键,本研究的标准物元模型如下式所示:

$$R = \begin{bmatrix} \text{泥石流发生可能性} & \text{泥石流易发程度} & \text{易发程度值} \\ \text{24 h 预报降雨量} & \text{预报降雨量值} & \\ \text{前期有效降雨量} & \text{有效雨量值} & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & W & x_1 \\ J & x_2 \\ Y & x_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: B 表示泥石流发生的可能性, W 表示泥石流易发程度, J 表示 24 h 预报降雨量, Y 表示前期有效降雨量; x_1 、 x_2 、 x_3 分别为上述各对应指标的量化区间.根据降雨阈值的分析结果,得出梅汛期和台汛期引发泥石流的降雨阈值,其中梅汛期分别针对东南地层区和扬子地台区计算降雨阈值,而台汛期由于扬子地层区样本很少,因此不再进行空间分区.结合前面泥石流易发程度区划结果,建立浙江省区域泥石流预报的标准物元模型(表 1).

4 模型可靠性检验

为了验证笔者提出的泥石流区域预报模型的合理性,在梅汛期和台汛期分别选取 1 次泥石流灾害群发事件作为检验样本,用本文提出的预报模型开展预报,形成预报结果分区图.台汛期选取 2004 年“云娜”台风期间发生的泥石流数据开展预报检验,8 月 13 日该次台风降雨事件在乐清市北部山区等地共引发了 18 处泥石流灾害.笔者对 2006 年 6 月 24 日在常山县和开化县交界一带山区发生的 10 处泥石流灾害开展预报检验.预报的首要工作是获取各评价因子的值,由于评价单元的易发程度值已经确定,因此预报时主要是获取每个评价小流域单元的前期有效降雨量和 24 h 预报雨量值,其中 24 h 预报

表 1 泥石流预报标准物元模型

Table 1 Standard matter element model for debris flow hazard prediction

分区	“梅汛期”HX 区* 标准物元	“梅汛期”YZ 区* 标准物元	“台汛期”标准物元
可能性小	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较小} & W <0,1> \\ & J <0,50> \\ & Y <0,100> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较小} & W <0,1> \\ & J <0,30> \\ & Y <0,50> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较小} & W <0,1> \\ & J <0,100> \\ & Y <0,100> \end{matrix} \right]$
可能性较大	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较大} & W <1,2> \\ & J <50,75> \\ & Y <100,150> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较大} & W <1,2> \\ & J <30,60> \\ & Y <80,120> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性较大} & W <1,2> \\ & J <100,150> \\ & Y <100,150> \end{matrix} \right]$
可能性大	$\left[\begin{matrix} \text{可能性大} & W <2,3> \\ & J <75,100> \\ & Y <150,200> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性大} & W <2,3> \\ & J <60,100> \\ & Y <120,150> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性大} & W <2,3> \\ & J <150,200> \\ & Y <150,200> \end{matrix} \right]$
可能性很大	$\left[\begin{matrix} \text{可能性很大} & W <3,4> \\ & J <100,150> \\ & Y <200,300> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性很大} & W <3,4> \\ & J <100,250> \\ & Y <150,250> \end{matrix} \right]$	$\left[\begin{matrix} \text{可能性很大} & W <3,4> \\ & J <200,500> \\ & Y <200,500> \end{matrix} \right]$

*注:HX 区. 华夏古陆区;YZ 区. 扬子地台区;台汛期不分区,整个浙江省范围统一考虑。

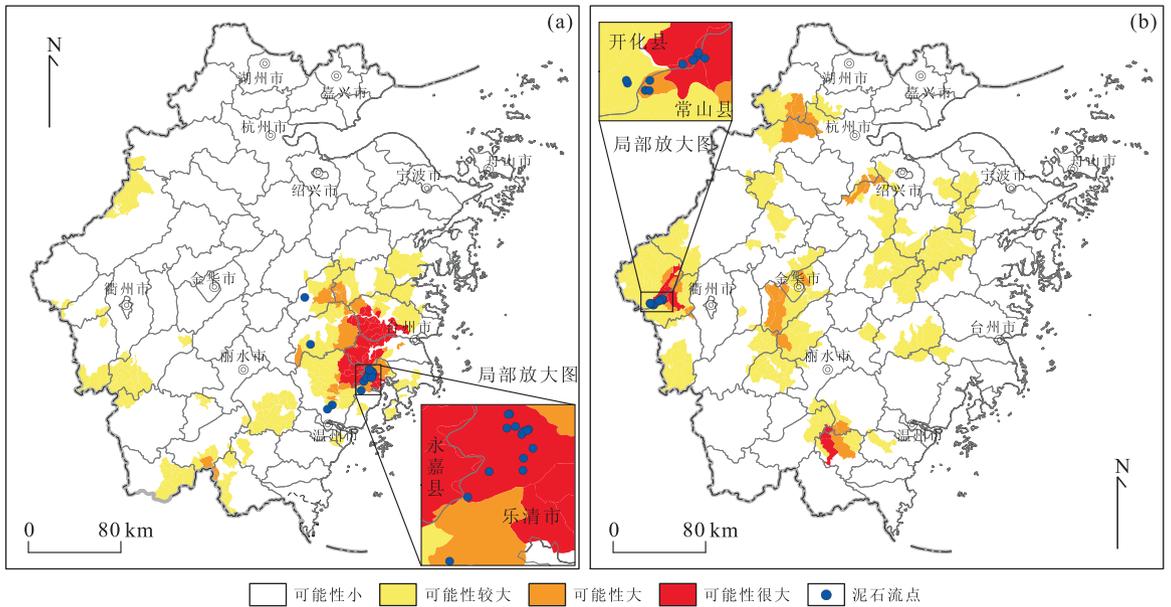


图 9 2004 年“云娜”台风(a)和 2006 年 6 月 24 日梅汛期(b)泥石流危险性预测结果

Fig. 9 Predicted hazard zones of debris flows in Yunna typhoon period (a) and in plum rains season in June 24 th, 2006 (b)

雨量值采用泥石流灾害发生当日降雨量进行替代,而前期有效降雨量则按照公式(2)采用不同的参数值分别求取梅汛期和台汛期两个案例的降雨量值,最终通过预报模型计算,得出预报结果如图 9 所示。

本研究采用灾害强度 R 指标(Li *et al.*, 2012; 冯杭建等, 2013)和危险性面积百分比累加—泥石流频度百分比累加曲线(Pradhan and Lee, 2010; van Westen *et al.*, 2003)进行预报结果检验。

(1)采用灾害强度 R 指标进行检验,如果 R 值从可能性小、可能性较大、可能性大和可能性很大依次增大,则认为分区结果合理,检验结果如表 2 所示。针对 2004 年“云娜”台风期间发生的泥石流样本,通过模型计算预报为可能性小、可能性较小、可

能性较大和可能性很大的 R 值分别为 0.01、0.21、0.46、5.10,依次增大;预报为可能性很大的分区面积仅占总面积的 2.5%,但成功预报 72.2%灾害点,预报为可能较大及以上等级的分区内发生 17 处泥石流灾害,占总数的 94.4%。针对 2006 年 6 月份梅汛期发生的泥石流样本,通过该本模型预报可能性小、可能性较小、可能性较大和可能性很大的 R 值分别为 0.00、0.82、9.35、45.38,依次增大;可能性大和可能性很大的预报分区内发生的泥石流占 80%。上述基于灾害强度 R 值的检验结果说明,无论是梅汛期还是台汛期,基于本文提出的预报模型的预测结果合理。

(2)采用危险性面积百分比累加—泥石流频度

表 2 采用灾害强度指标 R 检验预测结果Table 2 Verification of the debris flow forecasting model using hazard intensity, R

分区等级	分区面积占总面积比例(%)		分区内发生灾害点占总灾害点比例(%)		灾害强度 R	
	2006 年梅汛期	“云娜”台风	2006 年梅汛期	“云娜”台风	2006 年梅汛期	“云娜”台风
可能性小	71.4	80.9	0.0	5.6	0.00	0.01
可能性较大	24.3	14.4	20.0	16.7	0.82	0.21
可能性大	3.2	2.2	30.0	5.6	9.35	0.46
可能性很大	1.1	2.5	50.0	72.2	45.38	5.10

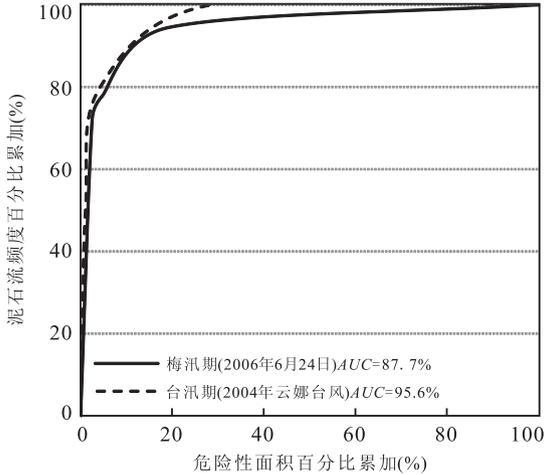


图 10 泥石流区域预报模型预测率检验曲线

Fig. 10 The prediction rate of the debris flow forecast models using area under curve

百分比累加曲线进行检验,得到 2004 年 8 月 13 日“云娜”台风期间预报结果检验的曲线下面积 AUC (area under curve) 值,即预测率为 87.7%,2006 年 6 月 24 日梅汛期预报结果检验的曲线下面积 AUC 值,即预测率为 95.6%(图 10). 上述检验结果表明,泥石流预报模型在较小面积的高等级预报区内,成功预报了尽可能多的泥石流灾害,证明预测结果合理.

5 结论与讨论

(1) 本文以浙江省 48 个山区县、市(区)小流域泥石流地质灾害调查评价成果数据为基础,总结了浙江省小流域泥石流灾害的发育特征和时空分布规律. 分别针对梅汛期和台汛期开展了降雨阈值研究,将浙江省划分为华夏古陆区和扬子地台区两个不同空间单元计算临界雨量阈值;以小流域作为评价基本单元,基于可拓理论方法,选择泥石流易发程度、24 h 预报雨量和前期有效降雨量等 3 个指标因子,构建了标准物元模型,建立了空间上分区、时间上分期的时空结合的泥石流危险性区域预报模型. 采用灾害强度 R 值和危险性等级面积百分比累加一泥

石流频度百分比累加曲线两种检验方法,分别选取梅汛期和台汛期发生的泥石流样本开展了模型合理性检验, R 值分别随着危险性等级增大而依次增大,预测率 AUC 值分别达到 87.7% 和 95.6%,均证明本文提出的预报模型预测结果合理.

(2) 浙江省沟谷泥石流具有沟床纵坡降大、相对高差小、山坡坡度大、主沟流程短、流域面积小等发育特点. 最为发育的区间分别是:纵坡降在 200‰~300‰;相对高差在 200~300 m;山坡坡度在 25°~45°;主沟长度 < 2.0 km;流域面积 < 0.5 km². 在地层岩性的分布中,在火山碎屑岩和砂岩、泥岩等碎屑岩岩组中最为发育. 泥石流分布与断层距离具有较好的指数关系,约 47% 的泥石流分布在距断层 0.5 km 范围内.

(3) 在空间分布上,在浙江省三大降雨区即台风雨控制区、梅雨控制区和梅台雨兼容区的分布具有比较明显的差异性. 台风期发生泥石流在全省均有分布,东南一带密度稍大,而梅汛期发生泥石流则较明显集中在西部地区,总体上则东南沿海一带密度要大于西部. 在时间分布上,台汛期和梅汛期是泥石流发生的两个主要时段,发生的泥石流分别占总数的 68% 和 27.4%,台汛期发生泥石流数量明显大于梅汛期,台风降雨诱因显著.

(4) 本文提出的泥石流预报模型为中大尺度的省级预报模型,评价单元采用小流域范围,尺度较大可能降低预报精度. 如基础数据允许,可将本文提出的预报模型拓展至县市,通过高精度数字高程模型数据划分大比例尺的沟谷,结合“精细化”降雨预报和雨量观测数据,以提高泥石流灾害的预测精度.

致谢:感谢浙江省地质环境监测院提供“十二五”期间发生的泥石流相关资料,感谢浙江省国土资源厅信息中心李长江教授级高工和麻土华教授级高工、浙江省地质环境监测院赵建康教授级高工对本研究的指导和帮助,同时还要感谢两位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见和建议!

References

- Bai, L. P., Wang, Y. Y., Gong, B., et al., 2009. Development of the Debris Flow Forecasting System Based on Extension Theory: A Case Study of Beijing. *Geoscience*, 23 (1): 157—163 (in Chinese with English abstract).
- Bai, L. P., Sun, J. L., Nan, Y., 2008. Analysis of the Critical Rainfall Thresholds for Mudflow in Beijing, China. *Geological Bulletin of China*, 27(5): 674—680 (in Chinese with English abstract).
- Cai, W., 1999. Extension Theory and Its Application. *Chinese Science Bulletin*, 44(7): 673—682 (in Chinese).
- Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler (Series A)*, 62 (1/2): 23—27. doi: 10. 2307/520449
- Casadei, M., Dietrich, W. E., Miller, N. L., 2003. Testing a Model for Predicting the Timing and Location of Shallow Landslide Initiation in Soil-Mantled Landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (9): 925—950. doi: 10. 1002/esp. 470
- Cong, W. Q., Pan, M., Ren, Q. Z., et al., 2006. Building and Application of the Debris Flow Warning System Based on Multi-Information. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42(4): 446—450 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Gao, K. C., Wei, F. Q., 2005. The Forecasting of Debris Flow. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 20(5): 363—369 (in Chinese with English abstract).
- Dowling, C. A., Santi, P. M., 2013. Debris Flows and Their Toll on Human Life: A Global Analysis of Debris-Flow Fatalities from 1950 to 2011. *Natural Hazards*, 71(1): 203—227. doi: 10. 1007/s11069—013—0907—4
- Du, H. L., Niu, X. X., Yin, K. L., et al., 2006. Study of Meteorological Forecasting and Warning for Landslide and Debris Flow in Zhejiang Province. *Plateau Meteorology*, 25 (1): 151—158 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H. J., Zhou, A. G., Yu, J. J., et al., 2016. A Comparative Study on Plum-Rain-Triggered Landslide Susceptibility Assessment Models in West Zhejiang Province. *Earth Science*, 41(3): 403—415 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H. J., Tang, X. M., Zhou, A. G., 2013. Study on Relationship between Rainfall Duration and Occurrence of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Application Examination. *Journal of Natural Disasters*, 22 (1): 159—168 (in Chinese with English abstract).
- Gariano, S. L., Brunetti, M. T., Iovine, G., et al., 2015. Calibration and Validation of Rainfall Thresholds for Shallow Landslide Forecasting in Sicily, Southern Italy. *Geomorphology*, 228(1): 653—665. doi: 10. 1016/j. geomorph. 2014. 10. 019
- Gu, F. G., Wang, Q., Zhang, C., 2010. Debris Flow Risk Assessment by PPC and Extenics. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(2): 373—377 (in Chinese with English abstract).
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et al., 2007. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3—4): 239—267. doi: 10. 1007/s00703—007—0262—7
- Hou, S. S., Li, A., Zhou, P. G., 2007. Preliminary Study of the Geohazard Warning System Based on Weather Forecasting and Precipitation Monitoring of Yucheng District, Ya'an City, Sichuan Province. *Earth Science Frontiers*, 14 (6): 160—165 (in Chinese with English abstract).
- Jin, H. C., Zhong D. L., Xie, H., et al., 2004. Debris Flow of Beijing Mountains Area. The Commercial Press, Beijing, 150 (in Chinese).
- Jibson, R. W., 1989. Debris Flows in Southern Puerto Rico. *Geological Society of America Special Papers*, 29—56.
- Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., et al., 1987. Real-Time Landslide Warning during Heavy Rainfall. *Science*, 238(4829): 921—925.
- Kuang, L. H., Liu, B. C., Yao, J. C., 2006. Research on Regionalization of Debris Flow Risk Degree with Fuzzy and Extension Method. *Journal of Catastrophology*, 21 (1): 68—72 (in Chinese with English abstract).
- Larsen, M. C., Simon, A., 1993. A Rainfall Intensity-Duration Threshold for Landslides in a Humid-Tropical Environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler (Series A)*, 75(1/2): 13. doi: 10. 2307/521049
- Li, C. J., Ma, T. H., Sun, L. L., et al., 2012. Application and Verification of Fractal Approach to Landslide Susceptibility Mapping. *Natural Hazards*, 61(1): 169—185.
- Li, C. J., Ma, T. H., Zhu, X. S., 2010. AiNet- and GIS-Based Regional Prediction System for the Spatial and Temporal Probability of Rainfall-Triggered Landslides. *Natural Hazards*, 52 (1): 57—78. doi: 10. 1007/s11069—009—9351—x
- Li, C. J., Ma, T. H., Zhu, X. S., et al., 2011. The Power-Law Relationship between Landslide Occurrence and Rainfall Level. *Geomorphology*, 130 (3): 221—229. doi: 10.

- 1016/j. geomorph. 2011. 03. 018
- Liu, C. Z., Wen, M. S., Tang, C., 2004. Meteorological Early Warning of Geo-Hazards in China Based on Raining Forecast. *Geological Bulletin of China*, 23(4): 303—309 (in Chinese with English abstract).
- Ma, T. H., Li, C. J., Lu, Z. M., et al., 2014. An Effective Antecedent Precipitation Model Derived from the Power-Law Relationship between Landslide Occurrence and Rainfall Level. *Geomorphology*, 216: 187—192. doi: 10. 1016/j. geomorph. 2014. 03. 033
- Ma, T. H., Li, C. J., Lu, Z. M., et al., 2015. Rainfall Intensity-Duration Thresholds for the Initiation of Landslides in Zhejiang Province, China. *Geomorphology*, 245: 193—206. doi: 10. 1016/j. geomorph. 2015. 05. 016
- Ma, Y., Li, S. Z., Xia, Z., et al., 2014. Characteristics of Hazardous Geological Factors on Shenhu Continental Slope in the Northern South China Sea. *Earth Science*, 39(9): 1364—1372 (in Chinese with English abstract).
- Pradhan, B., Lee, S., 2010. Landslide Susceptibility Assessment and Factor Effect Analysis; Back Propagation Artificial Neural Networks and Their Comparison with Frequency Ratio and Bivariate Logistic Regression Modeling. *Environmental Modeling Software*, 25(6): 747—759.
- Qiu, H. J., Cui P., Hu S., et al., 2016. Size-Frequency Distribution of Landslides in Different Landforms on the Loess Plateau of Northern Shaanxi. *Earth Science*, 41(2): 343—350 (in Chinese with English abstract).
- Shahabi, H., Khezri, S., Ahmad, B. B., et al., 2014. Landslide Susceptibility Mapping at Central Zab Basin, Iran; A Comparison between Analytical Hierarchy Process, Frequency Ratio and Logistic Regression Models. *Catena*, 115: 55—70.
- Tan, B. Y., 1994. Results of Study on the Prediction of Rainstorm Debris Flow along Montane Railways. *China Railway Science*, 15(4): 67—74, 77—78 (in Chinese with English abstract).
- Tan, B. Y., Yang, D. W., Shi, S. G., 1992. The Study of Prediction for Debris Flow Caused by Rainstorm. *Journal of the China Railway Society*, 14(3): 92—101 (in Chinese with English abstract).
- Tan, W. P., Luo, X. M., Wang, C. H., 2000. Forecast Models of Rainstorm Debris Flows. *Journal of Natural Disasters*, 9(3): 106—111 (in Chinese with English abstract).
- Tang, C., 2010. Activity Tendency Prediction of Rainfall Induced Landslides and Debris Flows in the Wenchuan Earthquake Areas. *Journal of Mountain Science*, 38(3): 341—349 (in Chinese with English abstract).
- van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R., 2003. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 30(3): 399—419.
- Wei, F. Q., Hu, K. H., Chen, J., 2005. Determination of Effective Antecedent Rainfall for Debris Flow Forecast. *Journal of Mountain Science*, 23(4): 453—457 (in Chinese with English abstract).
- Wei, F. Q., Tang, J. F., Xie, H., et al., 2004. Debris Flow Forecast Combined Regions and Valleys and Its Application. *Journal of Mountain Science*, 22(3): 321—325 (in Chinese with English abstract).
- Wieczorek, G. F., Morgan, B. A., Campbell, R. H., 2000. Debris-Flow Hazards in the Blue Ridge of Central Virginia. *Environmental & Engineering Geoscience*, 6(1): 3—23.
- Wu, Y. P., Chen, L. X., Cheng, C., et al., 2014. GIS-Based Landslide Hazard Predicting System and Its Real-Time Test during a Typhoon, Zhejiang Province, Southeast China. *Engineering Geology*, 175(12): 9—21. doi: 10. 1016/j. enggeo. 2014. 03. 005
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889—895 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Chen, L. X., Zhang, G. R., 2007. Regional Landslide Hazard Warning and Risk Assessment. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 85—97 (in Chinese with English abstract).
- You, S. Y., Tang, X. M., Feng, H. J., et al., 2013. The Characteristics and Prevention Countermeasures of Small-Water-Basin Debris Flow in Zhejiang Province. *Bulletin of Science and Technology*, 29(11): 45—51 (in Chinese with English abstract).
- Yue, L. X., Wang, Y., Yu, S. J., et al., 2012. Debris Flow Types and Their Distribution in Zhejiang Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 30(6): 185—189 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Wei, F. Q., Deng, B., et al., 2008. Imminent and Short-Term Forecast of Regional Debris Flow and Its Application; A Forecasting System Based on Doppler Weather Radar Technology. *Journal of Natural Disasters*, 17(2): 71—77 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, P. G., Mao, J. G., Hou, S. S., et al., 2007. The Design and Construction of Landslide Warning System Based on WebGIS. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 38—42 (in Chinese with English abstract).

Zhou, W., Tang, C., 2013. Rainfall Thresholds for Debris Flows Occurrence in the Wenchuan Earthquake Area. *Advances in Water Science*, 24(6): 786—793 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白利平, 王业耀, 龚斌, 等, 2009. 基于可拓理论的泥石流灾害预警预报系统开发: 以北京市为例. *现代地质*, 23(1): 157—163.
- 白利平, 孙佳丽, 南赞, 2008. 北京地区泥石流灾害临界雨量阈值分析. *地质通报*, 27(5): 674—680.
- 蔡文, 1999. 可拓论及其应用. *科学通报*, 44(7): 673—682.
- 丛威青, 潘懋, 任群智, 等, 2006. 泥石流灾害多元信息耦合预警系统建设及其应用. *北京大学学报: 自然科学版*, 42(4): 446—450.
- 崔鹏, 高克昌, 韦方强, 2005. 泥石流预测预报研究进展. *中国科学院院刊*, 20(5): 363—369.
- 杜惠良, 钮学新, 殷坤龙, 等, 2006. 浙江省滑波、泥石流多发区气象预警研究. *高原气象*, 25(1): 151—158.
- 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等, 2016. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比. *地球科学*, 41(3): 403—415.
- 冯杭建, 唐小明, 周爱国, 2013. 浙江省泥石流与降雨历时关系研究及应用检验. *自然灾害学报*, 22(1): 159—168.
- 谷复光, 王清, 张晨, 2010. 基于投影寻踪与可拓学方法的泥石流危险度评价. *吉林大学学报: 地球科学版*, 40(2): 373—377.
- 侯圣山, 李昂, 周平根, 2007. 四川雅安市雨城区地质灾害预警系统研究. *地学前缘*, 14(6): 160—165.
- 靳怀成, 钟敦伦, 谢洪, 等, 2004. *北京山区泥石流*. 北京: 商务印书馆, 150.
- 匡乐红, 刘宝琛, 姚京成, 2006. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究. *灾害学*, 21(1): 68—72.
- 刘传正, 温铭生, 唐灿, 2004. 中国地质灾害气象预警初步研究. *地质通报*, 23(4): 303—309.
- 马云, 李三忠, 夏真, 等, 2014. 南海北部神狐陆坡区灾害地质因素特征. *地球科学*, 39(9): 1364—1372.
- 邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等, 2016. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布. *地球科学*, 41(2): 343—350.
- 谭炳炎, 1994. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究. *中国铁道科学*, 15(4): 67—74, 77—78.
- 谭炳炎, 杨大文, 石胜国, 1992. 暴雨泥石流预报的研究. *铁道学报*, 14(3): 92—101.
- 谭万沛, 罗晓梅, 王成华, 2000. 暴雨泥石流预报程式. *自然灾害学报*, 9(3): 106—111.
- 唐川, 2010. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测. *山地学报*, 28(3): 341—349.
- 韦方强, 胡凯衡, 陈杰, 2005. 泥石流预报中前期有效降水量的确定. *山地学报*, 23(4): 453—457.
- 韦方强, 汤家法, 谢洪, 等, 2004. 区域和沟谷相结合的泥石流预报及其应用. *山地学报*, 22(3): 321—325.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889—895.
- 殷坤龙, 陈丽霞, 张桂荣, 2007. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价. *地学前缘*, 14(6): 85—97.
- 游省易, 唐小明, 冯杭建, 等, 2013. 浙江省小流域泥石流发育特征及防治对策. *科技通报*, (11): 45—51.
- 岳丽霞, 王永, 余淑姣, 等, 2010. 浙江省泥石流类型及分布特征研究. *水土保持通报*, 30(6): 185—189.
- 张京红, 韦方强, 邓波, 等, 2008. 区域泥石流短临预报及其应用——基于多普勒天气雷达技术的预报系统. *自然灾害学报*, 17(2): 71—77.
- 周平根, 毛继国, 侯圣山, 等, 2007. 基于 WebGIS 的地质灾害预警预报信息系统的设计与实现. *地学前缘*, 14(6): 38—42.
- 周伟, 唐川, 2013. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值. *水科学进展*, 24(6): 786—793.