

张国平, 许凤雯, 赵琳娜. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010, 36(2): 81-86.

中国降水型泥石流研究现状^{* 1}

张国平 许凤雯 赵琳娜

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 在综合调研泥石流研究现状基础上,总结了降水型泥石流研究进展。从降水资料的使用、泥石流发生区域雨量的估算、分析降水与泥石流关系的模型、环境背景因子的考虑等四个方面分别进行了论述。目前加密雨量观测资料、卫星雷达资料的应用,提高了泥石流灾害所在小流域实况降水估算精度。由简单地考虑临界雨量发展到考虑前期间接有效雨量、前期直接有效雨量、激发雨强和历时,同时考虑降水类型对泥石流的影响。目前降水和泥石流的关系模型发展为确定性模型和概率性模型。环境因子的考虑向两个方向发展:一种倾向是针对环境背景数据开展更加精细的区划,针对每个区域单元所处的环境背景情况建立降水与泥石流关系模型;另一种发展趋势是利用信息量等模型将环境因子作为降水与泥石流关系模型中的变量。

关键词: 降水型泥石流, 前期有效雨量, 确定性模型, 概率性模型

Review of the Study of Rainfall-Triggered Debris Flows

ZHANG Guoping XU Fengwen ZHAO Linna

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: The research status of debris flow at home and abroad is reviewed. On this basis, the research advance of relationship among the debris flow, effective antecedent precipitation and eco-environment factors is briefly summarized. It is discussed from four aspects, i. e. the ways of the use of precipitation, the estimation of precipitation, the analysis model of relation between precipitation and debris, and the eco-environment factor. The applying of intense rain gauge, radar and satellite gauge made the rainfall estimating of debris flow position more precise. The study is developed from the analysis about the impact of the critical rainfall on debris flow to effective antecedent rainfall, rain rate triggered debris flow and the type of precipitation on debris flow. At present, there are deterministic model and probability model which analyze the relationship between the rainfall and the debris flow occurrence. The study of the applying of eco-environment factors developed forward to two directions; one is that the debris flow model is developed in elementary area on the basis of finer definition of geological hazardous region. The other is that the eco-environmental factor is used as one of the variables in the model. Besides, more analyses are needed to solve the problem found in the present debris flow study.

Key words: rainfall-triggered debris flows, effective antecedent rainfall, deterministic model, probability model

引 言

泥石流是指发生在沟谷和坡地上的包含小至粘土、大至巨砾的固液两相流,也是山区介于挟沙水流和滑坡之间的土(泛指固体松散物质)、水、气混合

流。其具有爆发突然、搬运冲击淤埋能力强的特点,且有很大的破坏力^[1]。中国大陆约占 2/3 的山区都有泥石流活动,其中尤以青藏高原周边山地、秦岭山脉、太行山区、燕山山脉等地最为严重^[2]。因此,中国是受泥石流危害最为严重的国家之一,每年由泥石流造成的直接经济损失达 20 亿元,死亡 300~

* 国家自然科学基金项目 40775036. 2007 年公益性行业(气象)科研专项“东南地区强降水诱发地质灾害预警报技术研究”(GYHY(QX) 2007-6-37), 中国气象局“十一五气象监测与灾害预警工程”项目和国家气象中心水文地质灾害气象科研团队

2009 年 4 月 14 日收稿; 2009 年 7 月 1 日收修定稿

第一作者: 张国平, 从事气象条件引发地貌过程和环境灾害的分析和预报工作. Email: zhanggp@cma.gov.cn

600 人。中国政府十分重视泥石流的研究与减灾,投入了大量资金和专门人员从事这一工作。在泥石流综合减灾技术,特别是泥石流预测预报方面取得了许多成功的经验。

许多研究表明,降水是诱发泥石流灾害的主要因素^[3],研究降水与泥石流的关系是开展泥石流预报、区划和灾害防治的重要步骤。分析我国不同区域降水和泥石流的关系,可以将小流域定量研究与大范围应用研究结合起来,有利于揭示在特定的地理、地质和气候条件下前期降水引发泥石流的可能性,为开展大区域乃至全国泥石流预报提供有价值的信息^[4]。

单个泥石流沟是进行降水和泥石流关系研究的基础,环境因子可以近似为固定值或随时间变化不敏感的量。此外,单个泥石流沟研究有利于从泥石流的发生机理上展开分析。在研究大区域泥石流与降水关系时,环境背景因子不再是固定的量,会随着地貌、地质和气候条件的不同在空间上发生变化,目前有两种研究方法:(1)将降水作为自变量,同时将环境背景作为另一个自变量,来研究泥石流发生的频率^[5-8]; (2)直接将环境背景作为条件参数,针对特定环境背景来研究降水与泥石流的关系^[9-11]。

已有的研究也表明,虽然区域分析是泥石流减灾的重要手段之一,但其范围较大,只对减灾有宏观指导意义,如果区域研究与沟谷研究相结合,能明确泥石流减灾防灾的重点,具有更强的减灾指导意义^[4]。

下面从降水资料的使用、泥石流发生区域雨量的估算、分析降水与泥石流关系的模型、环境背景因子的考虑等四个方面分别论述。

1 目前前期降水和泥石流发生关系研究状况

降水资料、降水与泥石流关系模型和环境分区是开展不同环境背景下降水与泥石流关系研究的重要内容,从研究技术路线看,现有的大区域研究主要有以下几方面内容。

1.1 降水资料的使用

目前降水与泥石流关系的研究主要以常规气象观测资料为基础进行分析。常规资料的特点是质量可靠、时间序列长,可与较长时间序列泥石流灾害进行匹配,有利于研究区域内降水与泥石流灾害的统计关系。

虽然我国降水观测的气象站点有 3000 多个,但泥石流站点雨量站资料较少,仍不能满足预报的需要。

随着现代气象观测体系的建立和完善,大量针对天气预报需求布设的加密气象资料被越来越多地应用到降水与泥石流的关系研究中。一些研究工作将自动站布设到泥石流研究区内,直接获取泥石流沟所在流域的雨量信息,避开利用降水内插所带来的误差。

有一些研究工作引入了雷达估测降水来开展泥石流发生可能性分析^[12]。多普勒天气雷达降水在空间上分辨率为 0.5~4 km,时间分辨率为 0.1~1.0 h,在雷达有效探测区域内利用其降水产品进行泥石流发生可能性分析具有很强的优势;同时雷达预报降水产品对未来 3 h 的降水具有较好的响应,可以利用其做未来 0~3 h 的短临泥石流区域预报^[13-14]。但雷达估测降水空间范围有限、时间序列短,难以利用它来开展历史降水和泥石流关系研究。

1.2 泥石流发生区域雨量的估算

当雨量站空间分布密度稀疏、区域地质地质条件复杂且降水监测和预报本身在空间上变率大时,实际发生泥石流位置处的降水估算始终是个难题。这就需要有一个较为合理的插值方法。现有差值方法主要有克里格(Kriging)、反距离加权、Delaunay 三角剖分线性、双谐样条(Biharmonic Spline)和基于 DEM 的 PRISM 内插等方法。不同的插值方法对不同站点分布密度,资料分布时间有不同程度的适用程度。在雨量观测站点稀疏的地区,大量差值方法均存在灾害点处内插的雨量偏小的问题^[15-17]。而插值得到泥石流点的降水,还需要考虑地形、大型水体等因素对降水空间分布的影响^[18-19]。有一些研究开始利用测雨雷达资料来提取降水信息^[20],还有一些研究利用气象卫星资料来分析云图的分布和移动速率从而对泥石流沟所在流域降水强度和历时进行估计^[6,21]。

1.3 分析降水与泥石流关系的模型

对于大区域降水与泥石流的关系研究,从发生机理上进行建模的可行性较低,目前基本上是统计模型。模型从结果上分为确定性模型和概率模型,其主要特点见表 1。

表1 降水和泥石流关系模型类型及特征

Table 1 Models for the relationship between rainfall and debris flow and their characteristics

预报结果类型	降水判据	主要特征及优缺点
确定性预报	临界雨量	判别函数模型,结果明确;临界雨量的确定和使用有一定局限性,实际运用有困难
	有效雨量、雨强	判别函数模型,更客观地反映了降水和泥石流的关系,结果明确;实际运用有困难
概率预报	临界雨量分级	发生概率模型,结果为发生可能性大小,适合实际业务操作;临界雨量分级标准需多试验得到
	有效雨量、雨强	发生概率模型,结果为发生可能性大小,适合实际业务操作;雨量与泥石流关系更客观,有效雨量和激发雨强的确定需客观

最初的研究利用临界雨量来简单描述降水和泥石流发生的关系,一般认为24小时内降水达到某一临界值时就容易发生泥石流。代表性模型为 $Y=R \cdot M$,其中 Y 为泥石流发生的判别函数, M 为环境状态函数, R 为降雨条件函数;针对 R 有代表性的计算公式为: $R = K(H_{24}/H_{24(D)}) + H_1/H_{1(D)} + H_{1/6}/H_{1/6(D)}$,式中 K 为前期降雨量修正系数, H_{24} 为24h最大降雨量, $H_{24(D)}$ 为可能发生泥石流的24h临界雨量, H_1 为1h最大降雨量, $H_{1(D)}$ 为可能发生泥石流的1h临界雨量, $H_{1/6}$ 为10min最大降雨量, $H_{1/6(D)}$ 为可能发生泥石流的10min临界雨量^[22,6]。以上方法本质是一个判别函数模型或是类似一个决策树模型。

一些研究引入了有效雨量和雨强,认为间接前期降雨、直接前期降雨和激发雨强分别达到某一值时容易发生泥石流。利用云南蒋家沟的大量观测事实,研究结果表明间接前期降雨使土体具有较高的含水量,它在改变泥石流补给物质稳定状态的作用中占主导地位,而直接前期降雨则起到使土体进一步失稳的作用,在后续短历时雨强的激发下形成泥石流;基于泥石流沟观测结果的分析研究,间接前期降雨、直接前期降雨和激发雨量三者之间的权重关系、反向变化关系研究也开展起来,与泥石流的关系也得到定量描述^[23-24]。与上面的方法相似,这种方法也属于确定性模型范畴。有人进一步对前期有效降水的定义和计算展开研究^[25],针对计算前期有效降水的两个参数(一是递减系数,另一个是应当计算在内的天数)^[26-27]难以确定的问题,提出在两个假设条件下:(1)每次前期降水增加的土壤含水量和其有效降水量遵循相同衰减规律;(2)每次前期降水的有效降水量和其增加的土壤含水量衰减过程都是相互独立,通过分析土壤含水量随时间的变化关系,可以得到前期有效降水量与前期降水量随时间的变化关系,从而确定前期有效降水量。

以上研究大多关心前期降水总量,而对降水的时间分布特征研究的较少。此外,有研究者开展了

不同降水类型与地质灾害的关系,表明了对于不同类型坡地灾害与降雨分布特性,需采用不同的雨量预警基准^[28-29]。

用“泥石流发生”和“泥石流不发生”来描述降水与泥石流关系的确定性模型很难应用到实际的灾害防治实践中。近年来一些研究工作利用模糊数学的可拓学原理,建立降水与泥石流的可能性关系模型。根据泥石流发生条件的不同,将临界雨量划分成不同的等级范围,即根据降水量所处的等级范围,确定泥石流发生的可能性大小^[11,30-32],该模型将环境背景和降水条件对应于泥石流发生的可能性等级,在我国西南地区^[33-34]、北京山区等地区取得较好的应用效果^[4]。还有一些研究利用 Logistic 回归模型建立日雨量、前期有效降雨量和泥石流发生可能性三者之间的指数函数关系^[35-36]。

1.4 环境背景因子的考虑

在环境因子提取方面有两种不同的方法:(1)仅针对区域内的所有泥石流沟进行环境背景因子定量描述^[37-39],如利用 GIS 技术获取每条泥石流沟的流域面积、沟床比降、长度、松散物贮量和所处的位置、坡度、植被覆盖率和地质条件参数。这种方法要求识别出区域内的每条泥石流沟;(2)直接获取区域内每个栅格点处的地形高程、高差、坡度、岩石类型、断层密度、地震烈度、植被类型、植被覆盖度等因子的值^[40-42]。

在分析环境背景、降水和泥石流关系时,需要对大量环境背景因子进行筛选并引入到降水和泥石流关系的分析模型中来。目前有3个发展方向:

(1)直接综合各环境因子进行区划,将大区域划分为若干个子区域,认为子区域内部环境背景是相似的,建立子区域内降水与泥石流关系时不考虑环境背景条件的差异。针对全国范围的环境背景区划目前开展较多,如在全国层面,应用到业务预报中的方法是将全国分为7个1级区和28个2级区域^[43],给每个2级区建立一个降水与泥石流的关系

模型,目前正在进行 3 级区划,将全国分为 74 个子区域,针对每个子区域建立降水和泥石流的关系模型。

(2) 用权重系数分配模型,将大量环境因子综合为一个因子(环境综合指数)。该方法首先针对每个因子进行分级并做栅格化处理,确定每个分级针对泥石流发生的影响程度,再确定每个因子的权重系数,最后将这些因子依据权重系数进行累加,得到一个综合的环境背景参数空间分布数据。权重的大小应该是影响因子对泥石流的发育程度、影响大小的反映,确定权重系数的方法主要有专家打分^[44-46]、层次分析法^[40,47-48]、主成分分析和模糊数学综合评判^[49-50]等方法。

(3) 第三种方法是在环境背景因子栅格数据集和泥石流信息数据库的基础上,利用模糊数学的可拓学原理,建立信息量模型,将所考虑的环境因子的定量值转化为信息量。信息量的大小代表了环境背景有利于泥石流发生的程度^[51-52]。

2 目前前期降水与泥石流关系研究中存在较突出的问题

2.1 雨量观测数据和泥石流发生位置雨量估计问题

研究降水和泥石流关系的前提是获取泥石流发生小流域降水量,常规气象观测资料全国有 700 多个站点,这些资料空间分布稀疏且不均匀,这些降水站点在空间位置上多数分布在城镇所在地,因此,观测得到的降水不能很好地代表影响泥石流发生的降水,所估算的泥石流灾害点的雨量就会有很大的误差。泥石流一般发生在山区,雷达资料受地形遮挡、地物回波、仰角等问题的影响,加上本身需要大量自动雨量计资料来订正,缺少时间序列资料,不利于对过去一段时期内泥石流与降水的关系进行研究。利用气象卫星红外通道所观测的亮温资料进行降水估计是对地面雨量观测的很好补充,但存档极轨卫星资料时间序列很短。如果能够以气象部门为主对各行各业的降水观测资料进行整理和共享,则有利于开展基于高密度气象资料的泥石流灾害与降水关系的分析,有非常重要的意义。

2.2 针对降水和泥石流发生关系的环境分区问题

在大区域内对每条泥石流进行定量描述几乎很

难做到,利用栅格化的环境因子进行泥石流发生的环境背景的分区较为可行。将全国分为几个大区,然后再细分为 28 个 2 级区域,再分为 70 多个 3 级区域。但是,这样的分区在研究降水与泥石流关系时难以应用,因为子区域内也是非常不均一,其坡度、岩性等因子随空间位置的不同变化极大。这导致临界雨量在区域内并不相同,反而使得临界雨量指标难以发挥作用;同时在不同子区域接边的地方,临界雨量会发生很大变化,这有悖于临界雨量分布的空间连续性。

针对环境因子栅格数据,利用权重分配来计算综合环境指数,然后再对综合环境指数进行分级,每一个分级对应于空间上分布的栅格,这些栅格可以是连续性分布也可以是非连续性分布。这种方法使得相同的分区内环境背景是相似的,降水与泥石流的关系在区域内部是适用的。但目前该方法在分配权重系数时,会使得相关性强的因子具有更高的权重,当加入越来越多的环境因子后,一些关键因子所分配的权重系数会下降。

2.3 雨量与泥石流关系分析方法

现有的描述雨量和泥石流发生关系的模型多为确定性模型,认为在间接前期降雨、直接前期降雨和激发雨强得到满足的情况下才会发生泥石流。实际分析发现,间接前期降雨、直接前期降雨和激发雨强远大于所设定的阈值时,区域内并没有大量发生泥石流。说明确定性模型有一定的缺陷,实际上模型的建立有许多不确定的因素存在,需要在确定性模型的基础上再引入概率模型,将确定性模型分析的结果转化为概率进行表述。

对于可拓模型,其将降水与泥石流的关系定义为一种可能性的关系,但在没有考虑极端降水等因素下,模型输出的泥石流可能发生等级为最高等级的条件较容易满足,利用此模型建立的关系进行泥石流预报时,对于大范围强降水事件,模式预报的最高等级区域(如 5 级)面积会偏大,而 3~4 级的区域面积会偏小。

对于 Logistic 模型,从目前的实际效果评判看,国家级预报业务中采用该方法时发现大量的空报情况。2006 年全年统计结果表明该方法的空报率达到了 35%^[29]。大量区域研究的例子也揭示了相似的情况。这与该模型的适用条件有关,环境因子的作用、前期雨量衰减系数、极端降水分布等因素在

该模型中考虑得不够深入。

可拓模型和 Logistic 模型不是严格意义上的概率模型,只是描述了在特定环境背景和降水条件下发生泥石流的可能性 P 的大小,需要利用概率论方法对 P 做进一步的校正,并给出 P 分布的置信区间。

3 结论和讨论

目前前期降水和泥石流发生关系研究可以归结为四点:(1)大量新资料的应用,提高了泥石流灾害所在小流域实况降水估算精度。(2)所考虑的降水因子不断丰富,由简单地考虑临界雨量发展到考虑前期间接有效雨量、前期直接有效雨量、激发雨强和历时,同时考虑了降水类型对泥石流的影响。(3)降水和泥石流的关系模型发展为两种类型,一种是以判别函数模型为代表的确定性模型,另一种是以可拓模型和 Logistic 模型为代表的泥石流发生可能性模型。(4)对环境因子的考虑更深入,一种倾向是针对环境背景数据开展更加精细的区划,针对每个区划单元所处的环境背景情况建立降水与泥石流关系模型;另一种发展趋势是利用信息量等模型将环境因子作为降水与泥石流关系模型中的变量。

现有的降水资料稀疏使得对泥石流灾害点上的降水估计发生很大偏差,从而影响了降水和泥石流关系进行分析。需要对各行各业的降水观测资料进行整理和共享,并在历史泥石流与降水关系的研究中应用起来。另一方面环境因子相关性带来的权重系数分配问题、降水和泥石流关系的概率化研究也急需开展。

参考文献

- [1] 潘懋,李铁锋. 灾害地质学[M]. 北京:北京大学出版社,2002, 112-121.
- [2] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000.
- [3] 李媛,孟晖,董颖,等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29-34.
- [4] 韦方强,汤家法,钟敦伦,等. 区域和沟谷相结合的泥石流预报及其应用[J]. 山地学报,2004, 22(3): 321-325
- [5] 谭炳炎. 暴雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报,1990, 4(4): 14-20
- [6] 谭炳炎,段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报,1995, 4(2): 43-52.

- [7] 钟敦伦,谢洪,王爱英. 四川境内成昆铁路泥石流预测预报参数[J]. 山地研究, 1990, 8(2): 82-88.
- [8] 刘成,徐刚,黄彦,等. 激发坡面泥石流形成的降水因素探讨——以重庆北碚地区为例[J]. 水土保持通报,2007, 27(1): 51-54.
- [9] 谭万沛,韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. 灾害学,1992, 7(2): 37-42
- [10] 段旭,陶云,刘建宇,等. 云南省不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系[J]. 气象,2007, 33(9): 33-39.
- [11] 姚学祥,徐晶,薛建军,等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005, 16(4): 97-102.
- [12] 陈栋,郁淑华,江玉华. 青藏高原东部泥石流滑坡的雷达监测研究[J]. 高原气象,2004, 23(增): 130-133.
- [13] 张京红,韦方强,邓波,等. 区域泥石流短时临预报及其应用——基于多普勒天气雷达技术的预报系统[J]. 自然灾害学报,2008, 17(2): 71-77.
- [14] 杜惠良,钮学新,殷坤龙,等. 浙江省滑坡、泥石流多发区气象预警研究[J]. 高原气象,2006, 25(1): 151-158.
- [15] 冯锦明,赵天保,张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究,2004, 9(2): 261-277.
- [16] 李建通,杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J]. 大气科学,2000, 24(2): 263-270
- [17] 赵登忠,张万昌,刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究[J]. 地理科学,2004, 24(2): 205-211.
- [18] 林之光,彭开秀,焦仪珍. 我国降水时数时空分布[J]. 地理学报,1983, 38(4): 382-396.
- [19] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报,1992, 47(4): 302-314.
- [20] 江玉红,韦方强,徐晶,等. 泥石流区域预报中的预报降水处理[J]. 山地学报,2004, 26(3): 376-382.
- [21] 卢乃锰,吴蓉璋. 强对流降水云团的云图特征分析[J]. 应用气象学报,1997, 8(3): 269-275.
- [22] 谭炳炎. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 中国铁道科学,1994, 15(4): 67-78.
- [23] 崔鹏,杨坤,陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献:以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学,2003, 1(1): 11-15.
- [24] 田冰,王裕宜,洪勇. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系[J]. 水土保持通报,2008, 28(2): 71-75.
- [25] 韦方强,胡凯衡,陈杰. 泥石流预报中前期有效降水量的确定[J]. 山地学报,2005, 23(4): 53-57.
- [26] Senoo, K et al. Rainfall indexes for debris flow warning evacuating program[J]. Shin-Sabo,1985, 38 (2): 16-21.
- [27] 陈景武, 蒋家沟暴雨泥石流预报研究[C]. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 197-213.
- [28] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 坡地地质灾害的减灾策略——以降雨预警基准为例[J]. 水科学进展,2006, 17(4): 490-495
- [29] 彭贵芬. 云南气象地质灾害危险等级 PP-ES 预报方法[J]. 气象科技,2006, 34(6): 745-749.
- [30] 丛成青,潘懋,李铁锋,等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增): 2808-2812
- [31] 侯圣山,李昂,周平根. 四川雅安市雨城区地质灾害预警系统

- 研究[J]. 地学前缘 2007, 14(6): 160-165.
- [32] 薛建军, 徐晶, 张芳华, 等. 区域性地质灾害气象预报方法研究[J]. 气象, 2005, 31(10): 24-27.
- [33] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Hu Kaiheng. Method of debris flow prediction based on numerical weather forecast and its application[C]. In "Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows", ed., G. Lorenzini, C. A. Brebbia & D. E. Emmanouloudis. Southampton: WIT Press, 2006: 37-46.
- [34] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Jiang Yuhong, et al. GIS-based prediction of debris flows and landslides in Southwestern China [C]. Debris flow hazards mitigation: mechanic, prediction and assessment, 2007, Mill Press.
- [35] 阮沈勇, 刘希林, 郭洁. 四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 19-23.
- [36] 徐晶, 张国平, 张芳华, 等. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J]. 气象, 2007, 33(12): 3-8.
- [37] 谢洪, 钟敦伦, 韦方强, 等. 北京山区泥石流的分类与类型[J]. 山地学报, 20014, 22(2): 212-219.
- [38] 钟敦伦, 谢洪, 王士革, 等. 北京山区泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2004, 304.
- [39] 韦方强, 胡凯衡, Lopez J L, 等. 泥石流危险性动量分区方法与应用[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 298-301.
- [40] 白利平, 孙佳丽, 张亮, 等. 基于 GIS 的北京地区泥石流危险度区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 12-15.
- [41] 张国平, 徐晶, 毕宝贵. 滑坡和泥石流灾害与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 653-658.
- [42] 唐川, 朱静. 云南滑坡泥石流研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2003, 47-75.
- [43] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 303-309.
- [44] 谭万沛. 中国灾害暴雨泥石流预报分区研究[J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 48-53.
- [45] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. 地质力学学报, 2003, 9(2): 143-153.
- [46] 张春山, 张业成, 马寅生, 等. 区域地质灾害风险评价要素权值计算方法及应用—以黄河上游地区地质灾害风险评价为例[J]. 水文地质工程地质, 2006 6, 84-88.
- [47] 柳源. 中国地质灾害(以崩、滑、流为主)危险性分析与区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 95-99.
- [48] 褚洪斌, 母海东, 王金哲. 层次分析法在太行山区地质灾害危险性分区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 125-129.
- [49] 鲁光银, 韩旭里, 朱自强, 等. 地质灾害综合评估与区划模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005b, 36(5): 877-881.
- [50] 向喜琼, 黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 23-27.
- [51] 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 52-56.
- [52] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 89-92.