

张国平. 2014. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型. 气象, 40(7): 886-890.

有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型^{* 1}

张国平

中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

提 要: 针对我国西北至东南的带状区域, 将其划分为 6 个区划单元: 黄土高原西部、秦岭山区、大巴山区、大别山区、罗霄山区和浙闽沿海。通过提取并分析滑坡泥石流灾害发生频次和雨量信息, 发现对于任何一个区划单元, 并不存在一个临界雨量, 诱发地质灾害的有效降水处于一个比较大的区间, 对于给定的有效降水, 滑坡泥石流灾害只是存在一个发生的可能性。进一步研究了 6 个区划单元内有效雨量和滑坡泥石流灾害的概率关系。相关系数检验表明了本文计算的降水因子与滑坡泥石流灾害发生的频次服从高斯分布, 可以利用密度函数曲线来定量计算有效降水为某一值情况下滑坡泥石流灾害发生的概率。研究还表明我国由西北至东南, 诱发滑坡泥石流灾害的雨量值增大, 增大的幅度可以通过 6 个区划单元降水因子与滑坡泥石流灾害高斯分布的参数来定量描述。

关键词: 滑坡泥石流, 有效雨量, 概率模型, 易发程度评价, 区划

中图分类号: P429, P333

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 07. 013

Study on the Relation Between Effective Precipitation and Landslide/Debris-Flow with Probabilistic Model

ZHANG Guoping

Public Weather Service Centre of CMA, Beijing 100081

Abstract: Based on the assessment of susceptibility degree, the geology circumstance, geographic background and climatic factors, the zonation of the landslide and debris flow is carried out. And the research area is divided into 6 sub-regions: the western part of Loess Plateau, Qinling Mountains, Daba Mountains, Dabie Mountains, Luoxiao Mountains, and Zhejiang-Fujian coast. The plotting of effective precipitation and landslide/debris-flow shows that effective precipitation is among a certain range instead of a critical value. The probabilistic model is adopted to describe the probabilistic relations between effective precipitation and landslide/debris-flow. Correlation coefficient is calculated to evaluate the model. The result shows that effective precipitation and frequency of landslide/debris-flow are normally distributed. The parameters of probabilistic model can be estimated and probability density function can be plotted. The precipitation model indicates that for each region the effective precipitation is quantitatively corresponding to the frequency of landslide/debris-flow hazard. Moreover, the plotting shows that the effective precipitation increases from northwest to south east of China.

Key words: landslide/debris-flow, effective precipitation, probabilistic model, assessment of susceptibility degree, zonation

* 国家自然科学基金项目(40971016)资助

2013 年 5 月 2 日收稿; 2014 年 5 月 6 日收修定稿

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

引言

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,区域内并不一定大量发生泥石流(张国平等,2010;谭炳炎等,1995;谭万沛等,1992;2000;崔鹏等,2003;姚学祥等,2005)。这说明确定性模型有一定的缺陷,实际上模型的建立存在许多不确定的因素,需要在确定性模型的基础上引入概率模型,将确定性模型分析的结果转化为概率进行表述。目前开展降水与滑坡泥石流可能性关系的模型主要有可拓模型和 Logistic 模型(韦方强等,2004;丛威青等,2006;侯圣山等,2007;薛建军等,2005;阮沈勇等,2006;徐晶等,2007)。

可拓模型是将降水与滑坡泥石流的关系定义为一种可能性的关系,在没有考虑极端降水等因素下,模型输出的泥石流发生最高等级的可能条件容易达到,利用此模型建立的关系预报泥石流时,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和4级的区域面积会偏小(韦方强等,2004;丛威青等,2006;侯圣山等,2007;薛建军等,2005)。

对于 Logistic 模型,从目前的实际效果评判看,在国家级预报业务中应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%,大量研究也揭示了相似情况,这与该模型的适用条件有关,环境因子的作用、前期雨量衰减系数和极端降水分布等因素在该模型中考虑得不够深入(阮沈勇等,2006;徐晶等,2007)。

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滑坡泥石流的可能性大小,需要利用概率论方法对其做进一步的校正,并给出其分布的置信区间。

总的来看,用一个临界雨量来描述区域内滑坡泥石流灾害发生的做法缺少理论基础,现有描述降水与滑坡泥石流可能性关系的模型还不是严格的概率模型。一些工作分析了滑坡泥石流影响环境背景因素的概率分布,表明大量因子在空间分布上本身存在一个概率分布的特征(徐刚,2005;赵忠海等,2010;张洪江等,2011),但就降水与滑坡泥石流的概

率关系分析方面还缺少相关深入研究。本文提取滑坡泥石流灾害发生频次和雨量信息,研究有效雨量和滑坡泥石流灾害的概率关系,以为开展滑坡泥石流灾害概率预报提供参考。

1 数据和方法

研究区域为我国西北地区东部至东南地区的带状分布区域(图1)。共收集区域内 7872 个滑坡泥石流灾害点,灾害发生的时段为 1954—2004 年,包括灾害点经纬度坐标,以及灾害发生年、月和日的信息,提取了灾害发生当日和前 15 日的逐日降水资料。

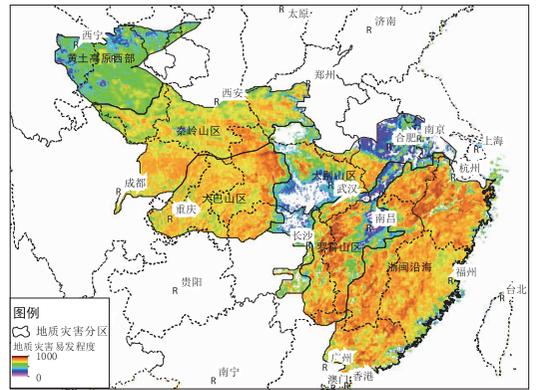


图1 研究区域、地质灾害(滑坡和泥石流)危险度及其分区

Fig.1 The study area, assessment of susceptibility degree and zonation of landslide/debris-flow

1.1 滑坡泥石流灾害区域划分方法

滑坡泥石流灾害区域划分的目的,是将大区域划分为若干个子区域,认为子区域内部地质、地理与气候环境背景是相似的,建立子区域内降水与泥石流关系时暂时不考虑环境背景条件的差异。滑坡泥石流灾害区域划分的基础是滑坡泥石流易发程度评价,其主要内容是建立因子集,本文考虑了高程、高差、坡度、岩石类型、断层密度、植被类型和汛期降水这7个因子,采用信息量方法来进行滑坡泥石流易发程度综合评价,其定义如下式(朱良峰等,2004;韦方强等,2003):

$$I = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot I_i \quad (1)$$

$$I_i = \sum_j^{m_i} \ln \left(\frac{N_{i,j}/N}{S_{i,j}/S} \right) \quad (2)$$

式中, I 为总信息量, I_i 为第 i 个因子的信息量, w_i 为第 i 个因子的权重系数, n 为因子数目, m_i 为第 i 个因子的分类数目, N 为区域内滑坡泥石流灾害点总数目, $N_{i,j}$ 为第 i 个因子的第 j 个分级上的滑坡泥石流灾害点数目, S 为研究区域栅格总目(对应于区域总面积), $S_{i,j}$ 为研究区域内第 i 个因子的第 j 个分级的栅格数目。

在滑坡泥石流易发程度综合评价的基础上, 结合区域内地质条件、地貌类型和气候背景特征等可以将区域划分为若干个环境背景相异的区域(柳源, 2003)。

1.2 有效雨量计算方法

雨量因子选取是研究降水与滑坡泥石流灾害关系的重要前提, 目前主要的因子有当日降水和有效降水这两个因子。根据相关研究, 有效雨量的内插相对于当日雨量的内插要稳定一些, 在相同的精度下有效雨量相对当日雨量对站点密度要求更低一些(张国平等, 2011)。本文选取有效雨量因子作为降水因子, 其计算方式如下(谭万沛等, 1992):

$$P_A = \sum_{i=1}^{14} 0.8^i P_i \quad (3)$$

式中, P_A 为前期有效雨量(单位: mm), P_i 为泥石流灾害发生位置的前第 i 天的降水(单位: mm)。

1.3 有效雨量的正态化处理方法

在分析降水与滑坡泥石流灾害的关系时, 实际的降水因子值一般介于 $0 \sim 300$ mm, 对于持续性强降水或者是台风降水, 计算的有效雨量值往往大于 300 mm, 甚至达到 $600 \sim 1000$ mm, 这容易导致有效雨量有很强不连续性, 需要对其进行连续性处理。考虑累积降水具有明显偏态分布特征, 对降水因子进行正态化处理是目前较常用的方式。一些工作表明对降水量序列进行开平方或开立方处理后, 降水量序列的正态性得到明显改善(王纪军等, 2010)。本文选择求立方根的方式进行降水因子正态化:

$$P_X = \sqrt[3]{P_A} \quad (4)$$

式中, P_A 为前期有效雨量(单位: mm), P_X 为经正态化处理的降水因子。

1.4 有效降水与滑坡泥石流灾害的高斯关系估计方法

通过有效雨量计算并进行正态化后, 得到了研究区域内 7872 个灾害点上的降水因子。针对图 1

中滑坡泥石流灾害的 6 个区划单元, 对于某一个区划单元, 假设其内有 m 个灾害点, m 个灾害点降水因子(P_X)值的范围为 $0 \sim P_{Xmax}$ 。本文利用直方图分类统计法, 将 P_X 平分为 50 个区间, 统计每个区间内降水因子为 P_X 时滑坡泥石流灾害发生的频次 Y (图 2)。

从图 2 中的散点分布情况可以看出, 6 个区划单元内滑坡泥石流灾害与降水因子明显服从高斯分布。对于散点图, 以降水因子值 P_X 为自变量, 以滑坡泥石流灾害发生的频次为 $f(P_X)$ 为因变量, 统计样本的均值 μ 和方差 σ , 以 $f(P_X)$ 作为降水因子为 P_X 时滑坡泥石流发生频率的估计值:

$$f(P_X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(P_X - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

已知每个区划单元内降水因子为 P_X 时滑坡泥石流灾害发生的频次统计 Y , 利用式(5)可以估计出降水因子为 P_X 时滑坡泥石流灾害发生的频率估计值 $f(P_X)$ 。图 2 中的曲线为估计的 $f(P_X)$ 分布。

对于降水因子为 P_X 时滑坡泥石流灾害发生的频次的实况统计值 Y 和估计值 $f(P_X)$, 可以计算其相关系数, 从而对估计的结果进行评价。表 1 显示了每个区划单元降水因子与滑坡泥石流高斯分布关系的相关系数。

2 结果

2.1 滑坡泥石流区划分析

图 1 显示了滑坡泥石流灾害危险度评价的结果, 整体上看, 由西北至东南方向, 滑坡泥石流灾害危险度逐渐增大。从地貌格局看, 图 1 中的带状区域从西北到东南分别为黄土高原、山地地貌和低山丘陵地貌; 从地质条件看, 研究区域自西北向东南分属鄂尔多斯地块、秦岭褶皱带和华南地块这 3 个新构造单元。综合地貌、地质和滑坡泥石流灾害危险度评价结果, 可以将图 1 所示的带状分布区域划分出 6 个区划单元: 黄土高原西部、秦岭山区、大巴山区、大别山区、罗霄山区和浙闽沿海。

从气候条件看, 西北至东南方向, 气候类型呈干旱—半干旱—半湿润—湿润带状分布, 汛期降水由西北向东南增强, 强降水频率增大。浙闽沿海主要受台风雨影响, 该区属低山丘陵地带, 坡度小、地质条件稳定且植被覆盖度好, 对诱发滑坡泥石流灾害的雨量要求较高, 但由于台风雨强度非常大, 降

水历时短,该区滑坡泥石流灾害发生较频繁。在汛期大别山区和罗霄山区主要受江淮梅雨过程影响,两个区域降水历时长且强度大,加上梅雨影响区域大,易滋生群发性滑坡泥石流灾害;秦岭山区和大巴山区主要受西南涡系统影响,该区地形起伏巨大,在山地局部地形影响下易发生局地暴雨,引发特大型滑坡泥石流灾害;黄土高原西部地区则由于土质疏松,地表植被覆盖度低,诱发滑坡泥石流灾害的降水量较低。

2.2 降水因子与滑坡泥石流灾害高斯分布关系分析

图 2 显示,对于所有 6 个区划单元,当有效降水处于某一个值时,滑坡泥石流灾害发生的频次最高,

呈明显的对称单峰型分布。对于 6 个区域,统计每个区域的均值 μ 和方差 σ ,利用式(5)估计不同降水因子下滑坡泥石流灾害发生的频率,绘制在图 2 上,图 2 显示利用式 5 估计的结果与通过滑坡泥石流灾害统计的结果有很好的 consistency。对于所有 6 个区划单元,表 1 显示相关系数均 ≥ 0.84 ,其中秦岭山区、大巴山区和浙闽沿海的相关系数均在 0.90 以上。表 1 和图 2 的结果表明本文计算的降水因子与滑坡泥石流灾害发生的频次服从高斯分布。

从图 2 中还可以看出,对于任何一个区域,并不存在一个临界雨量,诱发地质灾害的有效降水是处于一个比较大的区间。对于给定的有效降水,滑坡泥石流灾害只可能存在一个发生的可能性,并不能说明一定发生或一定不发生。当有效降水较低时,

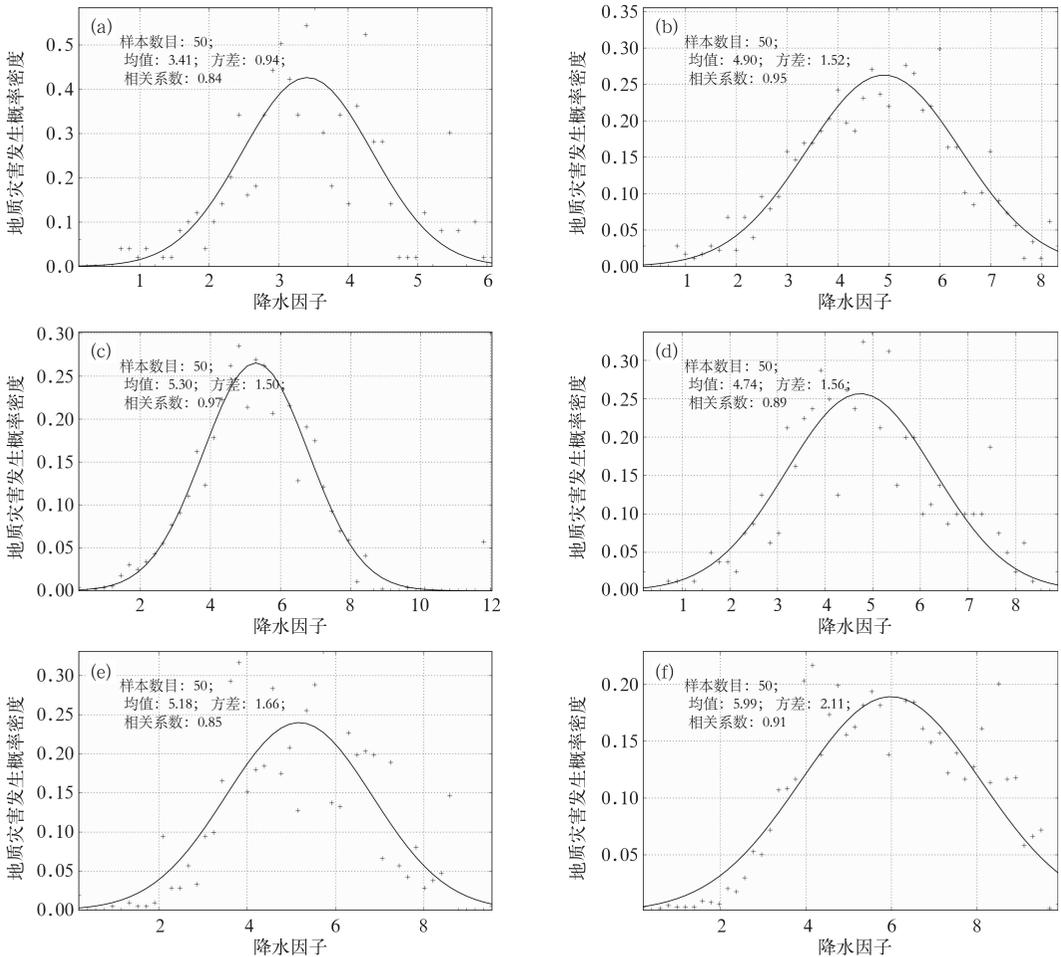


图 2 6 个区划单元内降水因子与滑坡泥石流灾害频次分布

(a) 黄土高原西部, (b) 秦岭山区, (c) 大巴山区, (d) 大别山区, (e) 罗霄山区, (f) 浙闽沿海

Fig. 2 The distribution of rainfall factors and frequencies of landslide and debris-flow in 6 division units

(a) the western part of Loess Plateau, (b) Qinling Mountains, (c) Daba Mountains, (d) Dabie Mountains, (e) Luoxiao Mountains, (f) Zhejiang-Fujian coast

表 1 降水因子与滑坡泥石流灾害高斯分布关系

Table 1 The parameters of caussian distribution between effective rainfall and frequency of debris-flow hazard

区划单元	降水因子均值	有效降水值/mm	降水因子方差	相关系数
黄土高原西部	3.41	39.65	0.94	0.84
秦岭山区	4.90	117.65	1.52	0.95
大巴山区	5.30	148.88	1.50	0.97
大别山区	4.74	89.55	1.56	0.89
罗霄山区	5.18	138.99	1.66	0.85
浙闽沿海	5.99	214.92	2.11	0.91

发生滑坡泥石流灾害的频率非常低,当有效降水处于某个值时(在本文中,该值为区域内所有灾害点有效降水的平均值),发生滑坡泥石流灾害的频率非常大。

2.3 降水因子与滑坡泥石流高斯分布关系的空间差异

从表 1 还可以看出,除大巴山区和大别山区外,由西北至东南方向,降水因子与滑坡泥石流灾害高斯分布的均值呈增大趋势,这表明越向东南方向,诱发滑坡泥石流灾害的雨量值越大。同时,高斯分布的方差也是由西北到东南增大。

3 结 论

根据本文提出的有效降水与滑坡泥石流灾害的概率关系模型及分析与验证结果,可以得出以下结论:

(1) 由我国西北至东南方向,滑坡泥石流灾害危险度逐渐增大,综合地质、地貌和滑坡泥石流灾害危险度评价结果,可以将研究区域划分为 6 个区划单元:黄土高原西部、秦岭山区、大巴山区、大别山区、罗霄山区和浙闽沿海。

(2) 相关系数检验表明了本文计算的降水因子与滑坡泥石流灾害发生的频次之间服从高斯分布,可以利用密度函数曲线来定量计算有效降水为某一值情况下滑坡泥石流灾害发生的频率。

(3) 对于任何一个区域,并不存在一个临界雨量,诱发地质灾害的有效降水是处于一个比较大的区间。对于给定的有效降水,滑坡泥石流灾害只是存在一个发生的可能性。

(4) 由西北至东南方向,诱发滑坡泥石流灾害的雨量值增大,增大的幅度可以通过 6 个区域降水因子与滑坡泥石流灾害高斯分布的参数来定量描述。

参考文献

- 丛威青,潘懋,李铁锋,等. 2006. 降雨型泥石流临界雨量定量分析. 岩石力学与工程学报, 25(增): 2808-2812.
- 崔鹏,杨坤,陈杰. 2003. 前期降雨对泥石流形成的贡献:以蒋家沟泥石流形成为例. 中国水土保持科学, 1(1): 11-15.
- 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.
- 柳源. 2003. 中国地质灾害(以崩、滑、流为主)危险性分析与区划. 中国地质灾害与防治学报, 14(1): 95-99.
- 阮沈勇,刘希林,郭洁. 2006. 四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨. 自然灾害学报, 15(4): 19-23.
- 谭炳炎,段爱英. 1995. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究. 自然灾害学报, 4(2): 43-52.
- 谭万沛,韩庆玉. 1992. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究. 灾害学, 7(2): 37-42.
- 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.
- 王纪军,任国玉,匡晓燕,等. 2010. 河南省月和年降水量正态性分析. 气候与环境研究, 15(4): 522-528.
- 韦方强,胡凯衡, Lopez J L, 等. 2003. 泥石流危险性动量分区方法与应用. 科学通报, 48(3): 298-301.
- 韦方强,汤家法,钟敦伦,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.
- 徐刚. 2005. 坡面泥石流流域地貌要素的概率分布. 自然灾害学报, 14(2): 70-74.
- 徐晶,张国平,张芳华,等. 2007. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型. 气象, 33(12): 3-8.
- 薛建军,徐晶,张芳华,等. 2005. 区域性地质灾害气象预报方法研究. 气象, 31(10): 24-27.
- 姚学祥,徐晶,薛建军,等. 2005. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式. 中国地质灾害与防治学报, 16(4): 97-102.
- 张国平,晁瑗,许凤雯,等. 2011. 气象站点密度对诱发泥石流灾害的前期雨量的影响特征分析. 地理研究, 30(7): 1237-1243.
- 张国平,许凤雯,赵琳娜. 2010. 中国降水型泥石流研究现状. 气象, 36(1): 94-99.
- 张洪江,郑国强,程金花,等. 2011. 不同面积小流域山洪泥石流预报模型研究一以北京市密云县为例. 灾害学, 26(1): 65-69.
- 赵忠海,朱红军. 2010. 基于 GIS 的北京山区泥石流影响因素及发生概率评价. 资源环境与工程, 24(4): 412-415.
- 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等. 2004. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究. 地球科学与环境学报, 26(3): 52-56.