

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.s1.092

基于当日和累计降雨量的区域降雨型滑坡预警研究*

曹洪洋 任晓莹

(河北地质大学勘查技术与工程学院 石家庄 050031)

摘要 选择合适的降雨型滑坡气象因子有利于提高预测精度,详细研究了四川省雅安市雨城区滑坡和降雨数据,利用不同组的数据进行回归分析,发现前期几日降雨量与滑坡的相关性不大,确定气象因子选取为当日降雨量和累积降雨量,讨论了累积降雨量中衰减系数的选取,确定为0.9。然后利用样本数据中的120组数据进行二元逻辑回归,得到了研究区的滑坡灾害概率预测方程。在此基础上制作了当日降雨量与累积降雨量关系散点图,得到了研究区降雨滑坡的临界表达式。最后选用5个降雨事件滑坡和5个未降雨事件滑坡进行验证,结果完全符合要求,说明此模型的准确性较高。综合表明这种以当日和累积降雨量为自变量的回归模型是一种行之有效的预测方法,可为降雨型滑坡预测提供科学依据。

关键词 降雨型滑坡 Logistic 回归模型 预警

中图分类号:P642 文献标识码:A

STUDY ON REGIONAL RAINFALL-INDUCED-LANDSLIDES PREDICTION BASED ON DAILY AND ANTECEDENT PRECIPITATION

CAO Hongyang REN Xiaoying

(College of Prospecting Techniques and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031)

Abstract Intraday and cumulative rainfalls were chosen as the meteorological factors of the prediction model through comparing the relationship between the landslides and the precipitation of the early days. The attenuation coefficient of cumulative rainfall was 0.9. The binary logistic regression prediction method is established based on 120 rainfall-induced-landslides data in the Yucheng district, Yaan city in Sichuan province. Analysis is done with the independent variables of the intraday and cumulative rainfall and probability prediction equation is achieved. On this basis, a critical expression of rainfall-induced-landslides is obtained through the scatter plot. The test samples of 5 rainfall-induced-landslides and 5 non-landslides reach up 100 percent accuracy. The predictive values of the ten tests samples are in line with requirements. The prediction of the rainfall-induced-landslides can be provided by forecast equation and critical expression.

Key words Rainfall-induced-landslides, Logistic regression model, Prediction

* 收稿日期: 2016-02-25; 收到修改稿日期: 2016-05-20.

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2015403033), 国家自然科学基金(41301015)资助.

第一作者简介: 曹洪洋(1975-)男, 博士, 副教授, 主要从事环境地质灾害和岩土工程的科研及教学工作. Email: hongyang@126.com

0 引言

近年来,对降雨型滑坡的预测预报已经成为国际灾害地质领域的一个热点课题。从目前出版的文献中可以看出,许多学者也比较重视降雨与滑坡之间的内在关系,建立了比较多的预测模型,概括起来,对降雨型滑坡的预测预报主要集中在两个方向:(1)基于工程地质类比法思想研究大量降雨型滑坡与降雨之间的统计关系,利用降雨量或降雨强度预测滑坡发生的概率或者降雨阈值(Brand et al., 1984, Fausto et al., 2004, 李铁锋等, 2006, Guzztti et al., 2007, Guzztti et al., 2008);(2)基于过程的模型,主要从降雨入渗后斜坡体内水压力引起的斜坡稳定性变化入手进行预报,此模型需要水文学和岩土力学参数(李兆平等, 2001, Jaehong et al., 2004, Guzztti et al., 2005)。第2种模型所必须的渗透系数、内聚力和内摩擦角,难以在较大范围内进行测定(Van et al., 2006, 张明等, 2009)。另外基于斜坡体的物质组成和结构在空间上的不均匀性,使得测得的数据都属于局部信息,因此此模型比较适用于单体滑坡的稳定性研究,研究区域性滑坡有一定的缺陷。

经过数十年的发展,滑坡统计学研究不断成熟和改进,已成为一种重要的降雨型滑坡灾害预测预警方法(唐红梅等, 2013),此种方法尤为适合区域性降雨滑坡的研究。国内外学者对降雨与滑坡的关系研究主要从以下两个方面开展:(1)研究引发滑坡的降雨强度阈值;(2)研究降雨时段与滑坡发生的关系,即滑坡与前期降水的关系。

譬如重庆地区发生地表侵蚀或地质灾害与日降雨量有一定的关系。对于滑坡的不同滞后现象,而潜水型和承压型斜坡失稳,往往稍滞后于峰值期,因为水头梯度的变化需要时间(李晓, 1995)。香港地区的滑坡与前期降水关系时有如下特点:不同类型的滑坡与前期降水与关系也不相同(李军等, 2002)。

综合国内外学者的研究成果,在研究降雨与滑坡的关系,虽然在某些方面还有争执,但在以下方面还是达成了共识:(1)降雨强度和前期降雨量两个降雨指标与滑坡灾害有很大关系。(2)没有适用于各地的一个降雨阈值,不同地区滑坡类型不同,降雨阈值也不相同。

选择哪一时段的降雨数据作为预测的气象因

子,学者给出了不同的解释(张明, 2009)。通过前述的国内外降雨型滑坡研究现状,目前达成共识的是降雨强度和累计降雨量是基本的气象因子,区别在于降雨强度是滑坡发生前几小时或几日的降雨,累计降雨量是选择滑坡发生前几天的累计降雨量。李铁峰在研究中分别建立了前十日的逻辑回归模型和当日降雨量及累计降雨量逻辑回归模型,研究结论认为后一种模型预测精度较高(李铁锋等, 2006)。

累计有效降雨是指前期进入岩土体一直滞留,对滑坡发展有贡献的降雨量,李长江在其专著中对累计有效降雨强度公式进行了详细的说明,给出了1986aCrozier给出的有效降雨指数与日降雨量之间的指数关系(李长江等, 2008):

$$Pa_0 = KR_1 + K^2R_2 + \dots + K^nR_n, 0 < K < 1.0$$

$$Pa_0 = \sum_{i=1}^n K^i R_i \quad (3)$$

式中, Pa_0 是相对 0d 的经校正的有效前期降雨; R_1 是 0d 之前 1d 的降雨量; R_n 是 0-n 天的降雨量; K 为土层中水流量的衰减系数。

本文以四川省雅安市雨城区为研究对象,通过分析历史降雨滑坡数据,拟以降雨量、累计降雨量为因变量,运用二元逻辑回归方法建立降雨型滑坡预测模型。

1 研究区概况及资料处理

1.1 研究区概况

雅安市雨城区位于四川盆地西部,属于亚热带湿润季风气候,降雨集中。因此降雨成为本地区滑坡发生的最主要触发因素。研究区内滑坡主要分布松散土石地区为主,基岩滑坡较少。分布地层为白垩系灌口组、夹关组,侏罗系遂宁组、沙溪庙组和第四纪残积带。

本地区雅安市雨城区于 2003 年 7、8 月份发生了强降雨的过程,诱发了大量地质灾害,造成了大量的人员伤亡和财产损失。众多学者对此区域的降雨型滑坡进行了深入的研究,建立了较多的预测模型。

1.2 资料处理

在本地区建立的滑坡数据库中,滑坡点的数据库中包含了 231 个滑坡。在此数据库中选择由降雨触发引起的并且有降雨数据记录的滑坡 56 个。另外选择 56 个滑坡发生滑动以前时间段降雨作为未

发生滑坡降雨事件,共有样本数据 130 个。

降雨的基础数据来源为布置在雨城区 20 个雨量计测得的数据。以 GIS 功能的表面插值功能进行处理,创建生成降雨等值线。再通过叠加功能,将滑坡图层和等值线图层叠加在一起,可以得到某个时间段内的某个滑坡事件和未发生滑坡时间的降雨量数值。表 1 为部分地点降雨数据。

表 1 雨城区部分地点降雨数据

Table 1 Some rainfall data of Yucheng district

时间	地点	R ₀ /mm	R ₁ /mm	R ₂ /mm	R ₃ /mm	R ₄ /mm	是否发生滑坡
2003.6.30	新荣 3 组	4.78	7.44	19.57	0.28	1.73	0
2003.8.7	新荣 3 组	0.68	2.33	1.48	0.60	11.40	0
2003.8.8	新荣 3 组	133.22	0.68	2.33	1.48	0.60	1
2003.8.1	张碗 9 组	22.68	17.03	1.84	2.76	11.36	0
2003.8.7	张碗 9 组	3.18	5.02	1.83	0.14	2.30	0
2003.8.25	张碗 9 组	102.82	46.95	40.70	7.47	42.03	1
2003.8.7	三益 11 组	2.42	4.34	1.85	0.12	2.72	0
2003.8.25	三益 11 组	55.79	29.62	48.02	7.53	42.98	1

2 基于气象因子的二元逻辑回归模型的建立

回归分析本质上就是一个函数估计的问题,就是找出因变量和自变量之间的因果关系。二元逻辑回归用于二值分类问题中,因变量只有两种取值:0 和 1,在滑坡灾害预测模型中,0 和 1 分别代表无滑坡发生和有滑坡发生,模型中的自变量为降雨因子。

2.1 二元逻辑回归模型

二元逻辑回归方法的数学处理过程如下(王济川等, 2001):

设:自变量为 x_1, x_2, \dots, x_k , 因变量为 p , 则 Logistic 线性回归函数可表示为:

$$\ln \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (1)$$

式中, $\beta_i (i = 0, 1, 2, \dots, k)$ 为回归系数。

根据式(1),可得:

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)} \quad (2)$$

在本次模型建立中,重点是确定自变量即降雨数据。

2.2 气象因子的选择

作者以滑坡事件和未滑坡事件前 4 天降雨数据建立回归方程,在已有的 130 个样本的基础上另增加 57 个未滑坡事件,分别建立逻辑回归方程,相关统计量如表 2 和表 3 所示:

表 2 第一组样本相关统计量

Table 2 The correlation statistics of the first group of sample

降雨变量	回归系数	Wald 检验值	显著水平
R ₀	0.109	12.151	0.000
R ₁	-0.004	0.005	0.943
R ₂	-0.012	0.082	0.775
R ₃	-0.028	1.240	0.266
R ₄	0.116	2.592	0.107
常量	-5.201	14.463	0.000

表 3 第二组样本相关统计量

Table 3 The correlation statistics of the second group of sample

降雨变量	回归系数	Wald 检验值	显著水平
R ₀	0.021	4.194	0.041
R ₁	0.021	2.807	0.094
R ₂	0.062	6.599	0.010
R ₃	-0.013	0.589	0.443
R ₄	0.096	9.073	0.003
常量	-5.006	42.808	0.000

通过以上数据可发现,当日降雨量标准误差和 Wald 检验值及显著水平均在合理范围之内,而前几日的降雨数据不在合理范围之内,以滑坡前 5 日的降雨数据建立回归方程不符合客观实际,也就是说滑坡发生和当日降雨量有关,和前几日的降雨的每日降雨量关联不大,而和前几日的累计降雨量有关系。因此应考虑建立累计降雨量模型。

引用式(1)计算累计降雨量数据。公式中重要的是 k 系数的选取(李长江等, 2008)。为了选取较为客观的衰减系数,本文进行了不同的衰减系数的 5d 累积降雨量和滑坡的相关性分析,分析结果如表 4 所示,最后选定 K 值取 0.9

表 4 不同衰减系数下的累积降雨量和滑坡相关分析

Table 4 The correlation analysis between accumulated rainfall and landslide of different attenuation coefficient

衰减系数 K	0.9	0.84	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2
是否滑坡	0.719	0.718	0.716	0.714	0.713	0.707	0.699	0.672
	**	**	**	**	**	**	**	**

** . 置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的

2.3 预测模型的建立

本模型研究中将滑坡发生定为 1, 未发生定为 0。将概率 $P=0.5$ 作为预测降雨型滑坡发生与否的临界点, 大于 0.5 的预测值认为会发生滑坡, 小于 0.5 的数据则不发生。

利用二元逻辑回归方程, 将当日降雨量和前 5 日累计降雨量作为自变量, 滑坡发生与否作为因变量, 选择样本中的 120 组样本值建立的回归方程, 另外 10 组作为检验样本。经回归分析, 得到灾害发生的概率预测模型为:

$$P = \frac{\exp(0.095 * 1d + 0.08 * Pa_0 - 4.328)}{1 + \exp(0.095 * 1d + 0.08 * Pa_0 - 4.328)} \quad (4)$$

为了验证式(4)的准确性, 选用 5 个降雨事件和 5 个未降雨事件进行验证, 将降雨因子代入式(4)结果(表 6)。

表 5 模型预测分类表

Table 5 Classification of model prediction

已观测	已预测			百分比校正
	是否滑坡			
	0.0	1.0		
是否滑坡	0.0	74	1	98.7
	0.0	3	42	93.3
总计百分比				96.7

以概率值 0.5 作为滑坡发生与否的界限值, 10 组滑坡数据判断完全正确, 说明此概率模型准确性较高。

2.4 临界值的研究

利用滑坡发生的当日降雨量和累积降雨数值作散点图(图 1)。

临界值表达式为: $R_1 = -0.38Pa_0 + 73.3$ 公式符号同前述。

当 $R_1 < -0.38Pa_0 + 73.3$, 不发生滑坡; $R_1 \geq -0.38Pa_0 + 73.3$, 是发生滑坡。

表 6 10 组样本的预测值

Table 6 Predicted value of 10 groups of samples

滑坡序号	时间	1d	有效降雨量	是否滑坡	预测值
31	2003.8.7	0.52	14.35	0	0.041845
31	2003.8.25	116.57	74.52	1	0.999997
46	2003.8.25	141.27	91.93	1	1
46	2012.8.25	0.00	34.43	0	0.17172
37	2003.8.7	2.02	13.10	0	0.043611
37	2003.8.25	76.14	78.90	1	0.999901
51	2003.8.7	1.09	19.54	0	0.065258
51	2003.8.25	128.82	85.46	1	1
11	2003.8.7	3.88	9.52	0	0.039234
11	2003.8.25	115.29	113.06	1	1

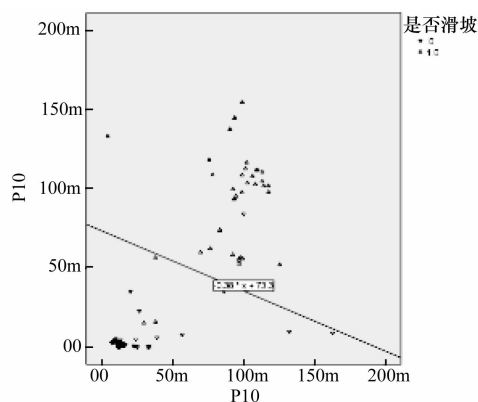


图 1 当日降雨量与累计降雨量关系散点图

Fig. 1 The scatter plot about relationship between intraday and cumulative rainfall

3 结论与建议

作者通过整理雅安市雨城区的降雨型滑坡数据, 建立了以当日降雨量和累积降雨量为自变量的二元逻辑回归方法的降雨预警模型, 预测结论较为准确。在此基础上进行了滑坡发生的临界值的研究, 给出了临界值的表达式。其成果能为降雨型滑坡的预报提供科学依据。

本研究在降雨阈值研究中没有考虑地质因子, 不同的地质因子在不同的降雨数据的触发下, 会有不同的反应, 目前的县域或区域滑坡灾害预测预报研究中, 对于整个区域给出一个降雨阈值, 也就认同所有的地区对于降雨的响应是相同的, 这显然和实际情况是有差别的, 在降雨型滑坡预报中考虑地质因子也是下一步工作需要考虑的内容。

参 考 文 献

- Brand E W, Premchitt J, Phillipson H B. 1984. Relationship between rainfall and landslide in HongKong[A]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslide[C]. Toronto, 377~384.
- Fausto Guzzetti, Mauro Cardinali, Paola Reichenbach, et al. 2004. Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy[J]. Engineering Geology, **73**: 229~245.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M. 2005. Risk-advanced weather prediction system to advise on risk events and management; Definition of critical threshold for different scenarios[R]. Action, **1**(16): 28~30.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, **98**(3/4): 239~267.
- Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update[J]. Landslides, **5**(1): 3~17.
- Jaehong Kim, Sangseom Jeong, Seong Park, Jitendra Sharma. 2004. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soil[J]. Engineering Geology, **75**: 251~262.
- Li X. 1995. Relative analysis between strong rainfall process and geological hazards Chongqing city[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, **6**(3): 39~42.
- Li Z P, Zhang M. 2001. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. China Civil Engineering Journal, **34**(5): 57~61.
- Li J, Zhou C H. 2002. Analysis of relationship between landslide volume and antecedent precipitation in Hong Kong[J]. Journal of Natural Disasters, **11**(2): 37~45.
- Li T F, Cong W Q. 2006. A method for rainfall-induced landslides prediction based on Logistic regression and effective antecedent rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, **17**(1): 33~35.
- Li C J, Ma S H, Zhu X S. 2008. The theory, method and application of rainfall-induced landslide[M]. Beijing: Geological publishing house, 97~99.
- Tang H M, Wei L, Tang Y H, et al. 2013. Correlation analysis and prediction model for rainfall-induced landslide in Chongqing area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, **24**(4): 16~22.
- Van Wwsten C J, Van Asch T W J. 2006. Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult BullEng Geol Env, **65**: 167~184.
- Wang J C, Guo Z G. 2001. Logistic regression model and its' application [M]. Beijing: Higher Education Press: 1~10.
- Zhang M, Hu R L, Tan R J, et al. 2009. State-of-the-art study on landslides due to rainfall and the prospect[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, (3): 11~17.
- 李晓. 1995. 重庆地区的强降雨过程与地质灾害的相关分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, **6**(3): 39~42.
- 李军, 周成虎. 2002. 香港地区滑坡体积与前期降水关系分析[J]. 自然灾害学报, **11**(2): 37~45.
- 李兆平, 张弥. 2001. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. 土木工程学报, **34**(5): 57~61.
- 李铁锋, 丛威青. 2006. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, **17**(1): 33~35.
- 李长江, 麻土华, 朱兴盛. 2008. 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用[M]. 北京: 地质出版社: 97~99.
- 唐红梅, 魏来, 唐云辉, 等. 2013. 重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, **24**(4): 16~22.
- 王济川, 郭志刚. 2001. Logistic 回归模型方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社: 1~10.
- 张明, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 2009. 降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. 工程勘察, (3): 11~17.