沅麻盆地降雨型滑坡灾害逻辑回归预测模型①

张敏[1], 渠红霞[2], 贺建清[3], 王津[3]
(1.海南职业技术学院, 海南 海口 570216; 2.浙江省自然资源集团空间信息有限公司, 浙江 金华 312000; 3.湖南科技大学, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 以沅麻盆地典型区域(麻阳、泸溪、沅陵 3 县)为研究区,基于 2013—2022 年地质灾害详查数据库,筛选具有完整降雨记录的滑坡事件作为研究对象。采用逻辑回归方法,对影响滑坡发生的降雨因子(包括滑坡当日及滑坡前 4 日降雨量、滑坡当日最大小时降雨量)进行了显著性筛选,构建沅麻盆地降雨诱发滑坡的逻辑回归预测模型,并选取典型滑坡事件进行实例检验。结果表明,沅麻盆地降雨型滑坡的发生与滑坡当日及滑坡前 4 天的降雨量呈显著相关性,滑坡当日及滑坡前 4 天是沅麻盆地滑坡预警的关键降雨期。由 R_0(滑坡当日降雨量)、R_1(滑坡前 1 日降雨量)、R_2(滑坡前 2 日降雨量)和 R_h(滑坡当日最大小时降雨量)构成的降雨因子组合具有最优的统计显著性。经实例验证,基于该组合构建的逻辑回归模型,判对率达到 83%,具有较高的预测精度和实用价值。

关键词: 沅麻盆地; 地质灾害; 滑坡; 降雨阈值; 逻辑回归; 滑坡预警; 预测模型
中图分类号: P642 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.006
文章编号: 0253-6099(2025)06-0033-06

Logistic Regression Prediction Model for Rainfall-Induced Landslide Disasters in Yuanma Basin

ZHANG Min[1], QU Hongxia[2], HE Jianqing[3], WANG Jin[3]
(1.*Hainan Vocational University*, *Haikou* 570216, *Hainan*, *China*; 2.*Space Information Co.*, *Ltd.*, *Zhejiang Natural Resources Group*, *Jinhua* 312000, *Zhejiang*, *China*; 3.*Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411201, *Hunan*, *China*)

Abstract: The typical region of the Yuanma Basin (covering Mayang, Luxi and Yuanling counties) was taken in the research of landslide disaster. Based on the database of detailed survey of geological disasters from 2013 to 2022, landslide events with complete rainfall records were selected for research. Then, significant rainfall factors for landslide, including rainfall on the day of landslide occurrence and during those four days prior to it, and maximum rainfall rate on the occurrence day were selected out by adopting logistic regression analysis, and a logistic regression prediction model for rainfall-induced landslides in the Yuanma Basin was developed and validated by studying representative landslide cases. The research results indicate that the rainfall-induced landslides in the Yuanma Basin is significantly correlated with rainfall on the occurrence day and during those 4 days prior to the occurrence. This confirms that the period including the occurrence day and those 4 days prior to the occurrence is critical for early warning of landslide in this region. A combined rainfall factors, consisting of R_0(daily rainfall on the occurrence day), R_1(rainfall of 1 day before occurrence), R_2(rainfall of 2 days before occurrence) and R_h(maximum rainfall rate on the occurrence day), present optimal significance in statistical analysis. The practical cases have validated that this logistic regression model constructed based on this factor combination has a prediction accuracy of 83%. It is concluded that this model can give a prediction with high precision and is of practical value.

Key words: Yuanma Basin; geological disaster; landslide; rainfall threshold; logistic regression; early warning of landslide; prediction model

① **收稿日期**: 2025-06-30
基金项目: 国家自然科学基金(52279100);湖南省自然资源厅科技计划项目(20230143DZ);湖南省教育厅科学研究项目(23C0528);海南省教育厅资助项目(Hnky2025ZC-28)
作者简介: 张敏(1990—),女,湖南岳阳人,硕士,讲师,主要从事土木工程设计与施工方向的科研与教学工作。E-mail:1182519156@qq.com
通信作者: 贺建清(1964—),男,湖南湘乡人,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事土力学与地基基础方面的科研与教学工作。E-mail:hjqing2000@163.com

沅麻盆地位于湖南省西部,是典型的白垩系红层盆地,其地层主要由白垩纪陆相沉积的红色碎屑岩系构成,岩性以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与钙质砂岩互层为特征,呈现显著的软硬岩相间结构。这种特殊的岩性组合导致层间结合力较弱,加之岩体结构面发育,形成了典型的易滑地质结构[1-2]。沅麻盆地处于中亚热带季风湿润气候区,年均降水量达1 400~1 600 mm,降水集中期(4~9月)降水量占全年总量的70%以上,最大日降雨量可达200 mm,是湖南省暴雨高频中心之一[3-4]。充沛的降水特征与盆地内易滑的地质结构,使该地区成为了降雨型滑坡灾害高发地区。基于沅麻盆地沅陵、麻阳、泸溪3县2000—2022年地质灾害调查数据,研究区共记录滑坡灾害661起,其中降雨型滑坡占比超过90%,降雨与盆地内滑坡灾害发生具有显著相关性[5]。

基于区域降雨特征与滑坡灾害发育机制的内在关联性分析,构建降雨型滑坡预警模型是实现灾害主动防控的重要途径,主要有两种方法:一是统计分析研究区域历年的滑坡和降雨数据,建立滑坡发生概率与降雨参数之间的经验关系,进而确定降雨阈值[6];二是基于极限平衡理论或有限元数值模拟,结合非饱和土力学理论和降雨入渗过程的水文耦合分析,通过求解斜坡稳定性系数与降雨参数的关系来确定降雨阈值。鉴于物理力学模型对岩土参数的高度依赖性和实际获取难度[7],目前区域降雨型滑坡预警仍以经验统计模型为主导方法[8-12]。近年来,逻辑回归方法因其在处理非线性关系和概率预测方面的优势,在降雨阈值模型构建中展现出良好的适用性[13-16]。但目前大部分关于逻辑回归方法在滑坡概率预测模型中的应用研究在模型假设以及变量选择中存在不足之处,主要表现在逻辑回归假设自变量与logit概率呈线性关系,但降雨因子的影响可能呈现阈值效应(如累计降雨量超过临界值后滑坡风险骤增),导致模型无法捕捉非线性特征,另外由于大部分模型只重点考虑了降雨因子,忽略了非降雨因素,如边坡地质条件、地形等因素,可能导致遗漏变量偏差。

本文以沅麻盆地典型区域(麻阳、泸溪、沅陵3县)为研究区,基于2013—2022年地质灾害详查数据库,选取具有完整降雨记录的滑坡事件作为研究对象。采用逻辑回归方法,系统分析滑坡发生概率与关键降雨因子(包括日降雨量、滑坡当日最大小时降雨量)的相关性,构建区域降雨型滑坡概率预测模型,并选取典型滑坡事件进行实例检验。研究成果可为沅麻盆地及周边地区降雨型滑坡灾害的风险评估和预警预报提供科学依据和技术支撑,对提升区域地质灾害防控能力具有重要的实践意义。

1 滑坡与前期累计降雨量的相关性

考虑到湖南省气象局区域气象观测站点自2010年起逐步建设,至2013年实现稳定运行,为使其观测数据的空间分辨率、时间连续性和测量精度能够满足滑坡灾害与降雨参数的高精度匹配需求,选取2013—2022年作为研究时段。采用空间聚类分析方法,将同一天、同一气象站点影响范围内发生的多起滑坡事件合并记为1例滑坡事件,共获得有效滑坡事件样本111例。同时,按照相同空间规则,在研究区内选取地质环境相似但未发生滑坡的区域作为对照,获得未滑坡事件样本52例。最终构建包含163例样本的完整数据集,其中每例样本均精确匹配对应的降雨序列数据。

表1为沅麻盆地部分降雨诱发滑坡数据,其中R_0为滑坡发生当日的降雨量,R_1为滑坡前1日的日降雨量,R_2为滑坡前2日的日降雨量,以此类推,R_n表示滑坡发生前n日的日降雨量,R_h为滑坡当日最大小时降雨量,则前期累计降雨量P_n为:

$$P_n = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{1}$$

式中R_i为滑坡i日前日降雨量,mm。

表1 沅麻盆地部分降雨诱发滑坡数据

Table1 Data of some rainfall-induced landslides in Yuanma Basin

观测站点	滑坡日期	降雨量/mm						滑坡次数/次	滑坡概率
		R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_h		
P1297	2022-06-03	181.7	44.7	80.7	0.3	5.4	71.9	10	1
P4063	2022-06-03	57.0	87.4	31.7	0.6	0.7	55.9	1	1
P3755	2022-06-02	16.2	253.7	3.1	1.1	7.3	55.3	3	1
P3759	2021-07-02	3.3	97.7	84.6	45.1	3.1	19.0	1	1
P3759	2021-07-01	97.7	84.6	45.1	3.1	0.1	19.4	2	1
P1333	2021-07-01	133.6	160.5	69.0	20.0	2.1	37.8	1	1
P4083	2020-07-09	3.5	36.2	30.8	0.7	0	14.0	1	1
P3767	2020-06-09	6.4	5.0	70.8	0	0	19.2	1	1
P1304	2020-06-12	0	0.2	6.2	21.3	12.5	0	0	0
P4082	2019-02-02	0	0.1	0.1	11.4	3.8	0	0	0
P3767	2018-07-13	21.5	9.4	0	0	0.3	16.4	1	1
P3719	2018-06-30	123.3	0	0	0	0	61.5	1	1
P4076	2018-05-04	0	0	0	6.4	17.6	0	0	0
P4197	2018-05-30	16.5	4.1	0.1	0	18.9	9.7	1	1

基于滑坡事件发生频率与前期累计降雨量的定量关系,基于SPSS软件的双变量相关分析方法,采用Pearson相关系数模型分析滑坡因子与降雨因子的相关关系,分析结果如表2所示。

表 2　滑坡与前期累计降雨量相关性分析结果

Table 2　Correlation analysis of landslide and cumulative rainfall before landslide

累计降雨量	相关系数 r	累计降雨量	相关系数 r
P_0	0.597 * *	P_8	0.513 * *
P_1	0.632 * *	P_9	0.510 *
P_2	0.609 * *	P_{10}	0.507 * *
P_3	0.590 * *	P_{11}	0.490 * *
P_4	0.591 * *	P_{12}	0.495 * *
P_5	0.557 * *	P_{13}	0.484 * *
P_6	0.526 * *	P_{14}	0.483 * *
P_7	0.529 * *	P_{15}	0.490 * *

注:* * 表示在 0.01 水平下(双尾)相关性显著;* 表示在 0.05 水平下相关性显著。

由表 2 可知,Pearson 相关系数 r 呈现明显的单峰分布特征:相关系数 r 值随前期天数增加呈现先上升后下降的趋势,其中滑坡前 1 日累计降雨量(P_1)与滑坡事件的相关系数达到峰值。值得注意的是,滑坡当日(P_0)至滑坡前 4 日(P_4)的累计降雨量与滑坡事件的相关系数均保持在 0.590 以上,且在 0.01 显著性水平下呈现显著相关[17]。随着前期天数增加,相关系数 r 值呈现非线性衰减特征:滑坡前 4 日以前的相关系数衰减速率较快,而滑坡前 8 日以后逐渐趋于平缓。上述分析结果表明,沅麻盆地因降雨诱发滑坡受滑坡当日及滑坡前 4 日降雨量的影响显著,滑坡当日及滑坡前 4 日为沅麻盆地滑坡预警的降雨关键期。

2　基于逻辑回归的滑坡概率预测模型

2.1　逻辑回归模型

在多元回归分析中,因变量通常为连续性变量,而降雨滑坡中的变量是非连续的二元变量。若直接运用常规的多元回归方法进行分析,与模型基本假设相违背,会导致回归结果估计出现显著偏差,从而使得假设检验失去可靠性。为此,本研究采用双元逻辑回归模型[18],对特定降雨条件下滑坡发生的概率进行深入分析与探讨。

首先,将滑坡发生赋值为 1,滑坡未发生赋值为 0,将滑坡是否发生的概率临界值设为 50%,若预测概率大于 50%时则滑坡发生;反之,预测概率小于 50%时滑坡不会发生。其次,假设 p 为发生滑坡概率预测值,其取值范围为(0,1),1−p 则代表不发生滑坡的概率预测值,$p/(1-p)$ 为滑坡逻辑回归值,对其取自然对数,得到逻辑回归方程:

$$\ln\frac{p}{p-1}=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_kx_k \quad (2)$$

式中:$\beta_1,\beta_2,\beta_3,\cdots,\beta_k$ 均为回归系数;$x_1,x_2,\cdots,x_k$ 均为自变量,即与滑坡相关的不同因子。

由式(2)可得:

$$\ln\frac{p}{p-1}=-2.336+0.148R_0+0.107R_1 \quad (3)$$

利用式(3)能够对降雨条件下滑坡灾害的发生概率进行定量预测。

2.2　逻辑回归预测模型构建

根据滑坡与前期累计降雨量的相关性分析,发现滑坡当日及滑坡前 4 日为沅麻盆地滑坡预警的降雨关键期。因此,优先选取滑坡当日至 4 天前这一时间段内降雨量 R_0、R_1、R_2、R_3、R_4 共 5 个降雨因子,R_0、R_1、R_2、R_3、R_4 分别对应 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5,滑坡是否发生(定义 1 为发生,0 为不发生)为因变量,导入 SPSS 软件建立逻辑回归模型进行滑坡预测,得到相关统计量,如表 3 所示。

表 3　逻辑回归模型相关统计

Table 3　Correlation analysis with logistic regression model

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著水平	期望值
R_0	0.142 * *	0.040	12.993	1	0	1.153
R_1	0.102 * *	0.033	9.459	1	0.002	1.108
R_2	0.023	0.014	2.585	1	0.108	1.023
R_3	0.004	0.016	0.076	1	0.783	1.004
R_4	0.03	0.021	2.097	1	0.148	1.030
常数项	−2.93	0.645	20.631	1	0	0.053

注:* * 表示在 0.01 水平下相关性显著。

由表 3 可知,回归系数最大值出现在 R_0,表示降雨当日最容易引发滑坡[19];另外 R_0、R_1、R_2、R_3、R_4 回归系数呈现递减趋势。R_3 的回归系数小于 0.005,认为 R_3 及更远日期之前的降雨对滑坡的影响可以忽略不计。由显著性水平可知,R_0 和 R_1 均在 0.01 显著性水平下呈现显著相关。除显著性水平之外,Wald 检验值可用于评估各降雨因子对滑坡触发的影响程度,其作用类似于线性回归中的 t 检验。该检验统计量服从 χ^2 分布,当显著性水平设为 5%时,对应的 χ^2 临界值为 3.84。若 Wald 检验值超过该阈值,则表明降雨因子对滑坡发生具有显著影响,从而拒绝原假设。

根据首次回归结果,剔除对模型结果不显著的变量,针对自变量 R_0、R_1 再次进行回归,得到相关统计量,见表 4。

结合表 3 和表 4 可知,R_0、R_1 对滑坡发生具有显著影响,得到逻辑回归模型为:

$$\ln\frac{p}{p-1}=-2.336+0.148R_0+0.107R_1 \quad (4)$$

表4 R_0、R_1 组合逻辑回归模型相关统计

Table 4 Correlation analysis with logistic regression model with a combination of R_0 and R_1

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著水平	期望值
R_0	0.148	0.043	11.950	1	0	1.159
R_1	0.107	0.031	10.120	1	0	1.107
常数项	−2.336	0.503	21.615	1	0	0.097

由式(4)转换为:

$$p = \frac{e^{(-2.336+0.148R_0+0.107R_1)}}{1+e^{(-2.336+0.148R_0+0.107R_1)}} \quad (5)$$

为了验证逻辑回归模型预测效果,需要对模型预测分类表进行评价。具体步骤如下:首先将逻辑回归模型中的概率阈值50%作为滑坡发生的判别标准。将降雨因子代入回归方程中,若计算得到的预测概率值超过50%,则判定该降雨条件下可能发生滑坡,反之则判定为不发生。将预测结果与实际观测数据进行对比,得到预测分类表。R_0、R_1 组合模型预测分类如表5所示。

表5 R_0、R_1 组合模型预测分类

Table 5 Classification of prediction with a combination of R_0 and R_1

实际滑坡情况	滑坡判断数量/例		判对率/%
	0	1	
0	43	7	86.0
1	12	38	76.0

由表5可知,在50例实际发生滑坡的降雨组合样本中,预测模型判断正确38例,判断错误12例,判对率76.0%。在50例未发生滑坡的降雨组合样本中,预测模型的判对率达到86.0%。模型的总判对率为81.0%,该模型在滑坡预测方面具有较高的准确性。

2.3 逻辑回归预测模型修正

在短时强降雨条件下,边坡表层土体易迅速饱和,坡体裂缝因充水而产生静水压力,从而加剧滑坡风险。因此,降雨强度与坡体裂缝发育情况成为沅麻地区滑坡预测与防治的关键因素。基于此,本文采用逻辑回归方法,将当日最大小时降雨量 R_h 作为降雨强度的指标,以更精确地评估降雨对滑坡的触发作用。

首先,构建以 R_0、R_1、R_2、R_3、R_4 和 R_h 为自变量的逻辑回归模型,模型参数见表6。根据 Wald 检验结果,R_0、R_1、R_2 的统计值超过阈值3.84,对滑坡发生具有显著影响,因此筛选出 R_0、R_1、R_2 并引入 R_h 作进一步分析。为评估 R_h 在模型中的贡献并比较不同因子组合的预测性能,分别对以下2组变量组合进行回归建模:① R_0、R_1、R_2(未引入 R_h);② R_0、R_1、R_2、R_h。经显著性检验后,2组因子对应的预测分类结果分别列于表7和表8。

表6 考虑降雨强度指标的逻辑回归模型相关参数统计

Table 6 Related statistics of logistic regression model considering rainfall intensity index

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著水平	期望值
R_0	0.117	0.056	4.378	1	0.036	1.124
R_1	0.094	0.034	7.678	1	0.006	1.098
R_2	0.020	0.015	3.864	1	0.172	1.021
R_3	0.008	0.015	0.243	1	0.622	1.008
R_4	0.031	0.021	2.268	1	0.132	1.032
R_h	0.192	0.157	1.490	1	0.222	1.211
常数项	−3.177	0.715	19.772	1	0	0.042

表7 R_0、R_1、R_2 组合逻辑回归模型预测分类

Table 7 Classification of prediction using logistic regression model with combined R_0、R_1 and R_2

实际滑坡情况	滑坡判断数量/例		判对率/%
	0	1	
0	41	9	82
1	13	37	74

表8 R_0、R_1、R_2、R_h 组合逻辑回归模型预测分类

Table 8 Classification of prediction using logistic regression model with combined R_0、R_1、R_2 and R_h

实际滑坡情况	滑坡判断数量/例		判对率/%
	0	1	
0	44	6	88
1	11	39	78

结果表明,采用 R_0、R_1、R_2 组合时,模型总判对率为78%;而引入 R_h 后,R_0、R_1、R_2、R_h 组合总判对率提升至83%。因此,最终确定采用包含 R_0、R_1、R_2 和 R_h 的因子组合构建滑坡预测模型。

进一步分析表8可知,在50例实际发生滑坡的降雨样本中,模型正确识别出39例,误判11例,滑坡事件的预测判对率为78%。对于未发生滑坡的情形,模型预测判对率更高,达到88%。整体来看,模型的总预测判对率为83%。需要说明的是,本研究所用降雨滑坡数据覆盖沅麻盆地内的麻阳、沅陵与泸溪3县,考虑到这些区域在工程地质和气象条件上存在一定差异,当前模型的预测判对率处于可接受水平。

综上所述,降雨因子 R_0、R_1、R_2、R_h 的组合判对率更高,确定降雨因子为 R_0、R_1、R_2、R_h,得到最终相关统计量,见表9。

表 9　R_0、R_1、R_2、R_h 组合逻辑回归模型相关统计

Table 9　Related statistics of logistic regression model with combined R_0、R_1、R_2 and R_h

降雨变量	回归系数	标准误差	Wald 检验值	自由度	显著水平	期望值
R_0	0.112	0.054	4.311	1	0.038	1.118
R_1	0.096	0.032	8.790	1	0.003	1.101
R_2	0.018	0.014	1.705	1	0.192	1.019
R_h	0.156	0.146	1.139	1	0.286	1.168
常数项	−2.743	0.601	20.795	1	0	0.064

将表 9 中的回归系数以及常数项代入式(2),得到沅麻盆地降雨诱发滑坡灾害逻辑回归预测模型:

$$\ln\frac{p}{p-1} = -2.743 + 0.112R_0 + 0.096R_1 + 0.018R_2 + 0.156R_h \tag{6}$$

由式(6)转换得:

$$p = \frac{e^{(-2.743+0.112R_0+0.096R_1+0.018R_2+0.156R_h)}}{1+e^{(-2.743+0.112R_0+0.096R_1+0.018R_2+0.156R_h)}} \tag{7}$$

2.4　实例检验

为了验证回归预测模型的实用性和预报准确性,另选取 20 组降雨事件评定上述逻辑回归模型对降雨型滑坡的预测效果。

首先,设定 50%为滑坡发生临界概率。若预测值大于 50%,则判断当前降雨条件下可能发生滑坡;反之,则判断为不发生滑坡。其次,将预测模型得到的预测值与样本实际是否发生滑坡的数据进行比较,评估模型的预测效果,详见表 10,回归预测模型(未引入 R_h)及修正回归预测模型(引入 R_h)的预测结果对比见表 11。根据表 11 可以看出,修正后的回归预测模型在预测准确率方面显著优于回归预测模型。值得注意的是,修正模型的预测结果与 SPSS 回归分析中获得的总判对率具有高度一致性。相比之下,回归预测模型的判对率略低于 SPSS 回归分析结果,这一差异可能与研究样本量不足有关。具体而言,有限的样本规模可能导致回归模型在参数估计和预测性能方面出现一定程度的偏差。

对修正回归预测模型 2 个预测失败案例进行详细分析,以进一步揭示预测模型的不足。首先,2014 年 4 月 5 日的滑坡预测失败案例显示,虽然滑坡点最近的气象站点数据显示当日降雨量与另一成功预测案例(2014 年 6 月 1 日滑坡)相近,但最大小时降雨量存在显著差异。这种空间上的降雨分布不均使得预测模型难以准确捕捉滑坡点的实际降雨情况,从而导致预测失效。其次,2014 年 7 月 1 日的滑坡预测失败案例则凸显了滑坡滞后性的重要性。尽管在滑坡发生前的短时间内降雨量较少,但 2 天前存在较大的降雨量,这表明滑坡的发生不仅与即时降雨相关,还受到前期降雨的累积影响;预测模型在忽视前期降雨影响的情况下,难以准确评估滑坡风险,从而导致模型预测失败。

表 10　沅麻盆地滑坡降雨因子及滑坡预测值

Table 10　Rainfall factors and prediction of landslides in Yuanma Basin

滑坡日期	降雨量/mm				滑坡次数/次	预测概率/%	
	R_0	R_1	R_2	R_h		回归预测模型	修正回归预测模型
2014-04-05	15.5	0	0	3.3	1	48.95	37.90
2014-06-12	15.4	0	15.6	10.5	1	48.58	71.10
2014-06-20	0.8	189.9	70.2	0.5	5	100.00	99.90
2014-07-01	6.8	0.2	42.0	1.7	2	21.28	28.10
2014-07-15	175.1	121.3	6.3	32.4	4	100.00	100.00
2016-06-10	2.3	0	0	0.5	0	11.97	8.30
2017-06-24	114.1	121.7	63.7	36.3	3	100.00	100.00
2017-06-30	106.1	82.7	0.2	18.0	2	100.00	99.80
2018-03-17	8.7	0.2	0	0.6	0	26.37	16.00
2018-05-20	0	0	2.3	0	0	8.82	6.30
2021-07-01	133.6	160.5	69.0	24.2	2	100.00	100.00
2022-06-03	181.7	44.7	80.7	55.3	10	100.00	100.00

表 11　逻辑回归模型预测结果对比

Table 11　Comparison of prediction using logistic regression model

滑坡是否发生	数量/例	回归预测模型		修正回归预测模型	
		滑坡预测数量/例	总判对率/%	滑坡预测数量/例	总判对率/%
发生	9	6	75	7	83.3
未发生	3	3		3	

3　结论

1) 沅麻盆地降雨型滑坡的发生与滑坡当日及滑坡前 4 日的降雨量呈显著相关性,滑坡当日及滑坡前 4 日是沅麻盆地滑坡预警的关键降雨期。

2) 通过逻辑回归分析筛选出由 R_0(滑坡当日降雨量)、R_1(滑坡前 1 日降雨量)、R_2(滑坡前 2 日降雨量)和 R_h(滑坡当日最大小时降雨量)构成的降雨因子组合具有最优的统计显著性。基于该因子组合构建的逻辑回归模型,经实例验证其判对率达到 83%,具有较高的预测精度和实用价值。

3) 受限于研究区气象站点空间分布密度不足,部分滑坡点与气象站点的空间距离较远,导致统计降雨数据与实际情况存在一定偏差,预测模型在应用中仍存在局部不确定性。未来需进一步通过增加滑坡实例验证、优化降雨数据空间插值方法等手段,不断完善模型精度和适用性。

参考文献(References):

[1]　罗冠枝,陈全明,王国卫. 湖南省沅麻盆地红层区地质灾害发育特

征及成灾规律分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2017,28(3):19-24.
LUO Guanzhi, CHEN Quanming, WANG Guowei. Analysis on the characteristics of geological hazards and the law of disaster in the red bed of the Hunan provincial Yuanma Basin[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017,28(3):19-24.

[2] 刘磊磊,肖浩,王璨,等. 湖南红层地区滑坡地质灾害致灾因子敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):169-174.
LIU Leilei, XIAO Hao, WANG Can, et al. Landslide analysis based on susceptibility to factors causing geological disasters in red beds area of Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4):169-174.

[3] 许强,唐然. 红层及其地质灾害研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(1):28-50.
XU Qiang, TANG Ran. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(1): 28-50.

[4] 王津. 沅麻盆地降雨诱发滑坡机制及预警模型研究[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2024.
WANG Jin. Study on mechanism and early warning model of rainfall-induced landslide in Yuanma Basin[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2024.

[5] 胡惠华,李军伟,范文韬,等. 水岩作用下红层软岩损伤劣化特征及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2025,46(3):685-694.
HU Huihua, LI Junwei, FAN Wentao, et al. Damage and deterioration characteristics and constitutive model of red layer soft rock under the influence of water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025,46(3):685-694.

[6] 龙长聪,李军伟,蒋鑫,等. 沅麻盆地降雨诱发滑坡阈值模型研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):22-28.
LONG Changcong, LI Junwei, JIANG Xin, et al. Threshold model for rainfall-induced landslides in Yuanma Basin[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):22-28.

[7] 刘宏,董明华,张诏飞,等. 露天矿边坡岩体抗剪强度参数取值方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):6-10.
LIU Hong, DONG Minghua, ZHANG Zhaofei, et al. Determination of shear strength parameters of slope rock mass in open-pit mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):6-10.

[8] CAMPBELL R H. Debris flows originating from soil slips during rainstorms in Southern California[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1974,7(4):339-349.

[9] CAINE N. The rainfall intensity:Duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska Annaler Series A, Physical Geography, 1980,62(1/2):23.

[10] 刘海知,徐辉,包红军,等. 区域降雨诱发滑坡阈值特征分析[J]. 自然灾害学报, 2021,30(4):181-190.
LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Characteristics analysis of rainfall-induced landslide thresholds in local regions[J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(4):181-190.

[11] 周剑,汤明高,许强,等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J]. 山地学报, 2022,40(6):847-858.
ZHOU Jian, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold[J]. Mountain Research, 2022,40(6):847-858.

[12] 刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等. 基于I-D-R阈值模型的滑坡气象预警[J]. 地球科学, 2024,49(3):1039-1051.
LIU Xiepan, YIN Kunlong, XIAO Changgui, et al. Meteorological early warning of landslide based on I-D-R threshold model[J]. Earth Science, 2024,49(3):1039-1051.

[13] 盛逸凡,李远耀,徐勇,等. 基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型[J]. 水文地质工程地质, 2019,46(1):156-162.
SHENG Yifan, LI Yuanyao, XU Yong, et al. Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019,46(1): 156-162.

[14] 唐红梅,魏来,高阳华,等. 基于逻辑回归的重庆地区降雨型滑坡预报模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013,24(3):32-37.
TANG Hongmei, WEI Lai, GAO Yanghua, et al. A prediction model for rainfall-induced landslide based on logistic regression in Chongqing area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013,24(3):32-37.

[15] 黄发明,陈佳武,范宣梅,等. 降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模[J]. 地球科学, 2022,47(12): 4609-4628.
HUANG Faming, CHEN Jiawu, FAN Xuanmei, et al. Logistic regression fitting of rainfall-induced landslide occurrence probability and continuous landslide hazard prediction modelling[J]. Earth Science, 2022,47(12):4609-4628.

[16] 李俊杰,张微. 巴中市恩阳区降雨诱发滑坡灾害预警模型[J]. 防灾减灾学报, 2024,40(3):25-30.
LI Junjie, ZHANG Wei. Early-warning model for rainfall-induced landslide disaster in Enyang district, Bazhong City[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2024,40(3):25-30.

[17] 林巍,李远耀,徐勇,等. 湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J]. 长江科学院院报, 2020,37(2):48-54.
LIN Wei, LI Yuanyao, XU Yong, et al. Rainfall thresholds of rainfall-triggered landslides in Cili County, Hunan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(2):48-54.

[18] 魏来. 降雨诱发滑坡预测模型研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
WEI Lai. Study on prediction model of rainfall-induced landslide[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.

[19] 雷鸣. 降雨对滑坡稳定性影响研究及预警预报[D]. 西安:西安工业大学, 2021.
LEI Ming. Study on the influence of rainfall on landslide stability and its early warning and prediction[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.

引用本文:张敏,渠红霞,贺建清,等. 沅麻盆地降雨型滑坡灾害逻辑回归预测模型[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):33-38.
ZHANG Min, QU Hongxia, HE Jianqing, et al. Logistic regression prediction model for rainfall-induced landslide disasters in Yuanma Basin[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):33-38.