

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.012

基于移动最小二乘法的阶跃型滑坡预警曲面模型

王伟^{1,2}, 丁聪^{1,2}, 刘世藩^{1,2}, 姜宇航^{1,2}, 陈超^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于移动最小二乘法搭建阶跃型滑坡预警曲面模型, 以三峡库区王家坡滑坡监测数据为例构建预警模型并验证了该模型用于滑坡阶跃预警的可行性。该模型通过移动最小二乘法拟合滑坡累计位移-监测期次曲线, 利用拟合曲线导数信息确定滑坡阶跃变形区间, 以区间二阶导数最大值点作为“类破坏点”获得当期降雨、前期降雨、位移速率阈值; 根据“类破坏点”监测信息, 利用移动最小二乘法建立滑坡阶跃变形发生的阈值曲面, 以位移速率作为分级标准建立 4 级预警阈值曲面模型进行预警分析。王家坡滑坡验证结果表明, 模型预警等级与滑坡实际位移情况相符, 模型具有良好的预警效果, 能实现高效准确的滑坡阶跃变形预警。

关键词: 降雨型滑坡; 阶跃变形; 预警模型; 移动最小二乘法; 王家坡滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)01-0095-08

Stepwise landslide warning surface model with moving least squares

WANG Wei^{1,2}, DING Cong^{1,2}, LIU Shifan^{1,2}, JIANG Yuhang^{1,2}, CHEN Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Engineering Research Center of Jiangsu Province, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Stepwise landslide warning surface model is presented based on moving least squares. Based on the monitoring data of the Wangjiapo landslide in Three Gorges Reservoir area, the proposed model is set up, and its ability to provide early warning of the stepwise deformation is validated. The cumulative displacement-monitoring period curve is fitted via moving least squares, and its derivative is used to determine the range of the stepwise deformation during the landslide. The maximum point of its second derivative within the deformation range is taken as the “quasi-failure point” to obtain the current rainfall, previous rainfall, and displacement rate thresholds of each stepwise deformation. The threshold surface of the stepwise deformation is constructed with the monitoring information of the “quasi-failure point” by using moving least squares. A four-level warning threshold surface model is established with the displacement rate as the classification standard for early warning analysis. The validation results of the Wangjiapo landslide show that the warning level is consistent with the actual displacement of the landslide. The model has good early warning effect and enables warning of landslide stepwise deformation.

Key words: rainfall-triggered landslide; stepwise deformation; early warning model; moving least squares; the Wangjiapo landslide

滑坡是我国仅次于地震的第二大自然灾害, 每年因滑坡造成的伤亡人数众多、经济损失巨大^[1-2]。降雨型滑坡是滑坡中的典型代表^[3]。目前对于降雨型滑坡预警预测的主要手段包括^[4-12]: ①根据滑坡所处区域的降水量建立降雨强度-持续时间阈值曲线。此方法依据经验进行判断, 其计算方式简便, 但由于监测指标单一, 准确性与适用性不高。②根据试验或数值计算结果确定滑坡所处阶段以判断是否失稳。此方法的有效与否依赖于模型以及所选参数的准确程度。③优化监测方式、引入改进预警指标, 结合统计学方法根据历史监测数据确定监测指标阈值来判断滑坡是否发生阶跃或失稳。此方法目前在滑坡预警中有较多应用。例如: 许强等^[10]根据滑坡变形特征, 使用将位移除以速度的方法将位移-时间曲线的纵坐标变换为与横坐标相

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072102)

作者简介: 王伟(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事滑坡风险评估和预警研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn

引用本文: 王伟, 丁聪, 刘世藩, 等. 基于移动最小二乘法的阶跃型滑坡预警曲面模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 95-102.

WANG Wei, DING Cong, LIU Shifan, et al. Stepwise landslide warning surface model with moving least squares[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 95-102.

同的时间量纲,利用改进切线角对滑坡失稳变形进行预警;黄晓虎等^[11]引入“一个降雨过程”概念,利用普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)确定滑坡进入阶跃期的速率阈值,以当期降雨、前期降雨与位移速率为指标建立预警系统;杨攀等^[12]利用数值分析方法研究了分段降雨与平均降雨对滑坡稳定性的影响,将在降雨强度-持续时间阈值曲线中引入前期降雨,使用日均降雨强度-持续时间-前期降雨阈值曲面作为滑坡预警模型。尽管该方法应用广泛,但对于历史监测数据的使用与处理仍需进一步研究。

现有监测数据的曲线多由离散点构成^[13-14],曲线不具备可导性,无法进行变化趋势研究。为使曲线具备可导性常采用 OLS 拟合监测数据,以确定滑坡阶跃变形时的斜率阈值^[11-13]。采用 OLS 拟合数据的最大缺点是采用低阶拟合会导致拟合函数精度较低,采用高阶拟合可能出现病态方程^[15],而如果采用分段 OLS 拟合会导致拟合曲线或曲面的连续性与光滑性受影响^[16]。阶跃是降雨型滑坡的常见变形方式^[17],是指因降雨入渗导致滑坡在等速变形阶段位移量大幅增长进入加速变形阶段^[18],降雨停止后随孔隙水压力消散、抗剪强度提高滑坡又会进入等速变形阶段的现象。阶跃型滑坡中降雨是变形失稳的主要因素,位移是变形的直接表现。大多数预警系统以降雨与位移同时作为预警指标,但存在以下问题:①前期降雨的计算日期指定不明;②处理监测数据所使用的数理统计方法对曲线的拟合效果较差;③将滑坡阶跃变形时的降水量、位移阈值分开考虑,导致误报漏报。

本文旨在寻找一种合理考虑前期降雨的方式,基于移动最小二乘法(moving least squares, MLS)拟合监测曲线,建立考虑当期降雨、前期降雨、位移速率的综合阈值曲面,构建分级预警阈值曲面模型,从而实现高效准确的滑坡阶跃变形监测预警。

1 阈值曲面模型与 MLS

1.1 阈值曲面模型建立判据

阶跃型滑坡中降雨与位移是监测的主要内容^[19-20]。降雨入渗导致土体基质吸力降低、岩土体物理力学性能下降、孔隙水压力增大^[21-23],因此阶跃现象会随着降雨不断发生。

降雨型滑坡失稳前会经历阶跃阶段,该类滑坡预警的主要工作是判断滑坡是否进入阶跃阶段。考虑降雨型滑坡诱发因素与直接表现形状,可知建立预警系统必须考虑位移与降雨两因素。传统降雨强度-持续时间阈值曲线仅考虑了滑坡发生时的降雨,忽略了未发生明显阶跃变形时滑坡在降雨作用下的变形特征,而每个滑坡由于所处位置、植被覆盖、岩土成分不同有其自己独特的变形特征,这种过分强调共性的预警方式难以保证预警准确率;而只考虑位移因素的预警方式忽略了降雨这一主要诱因。降雨入渗需要时间,滑坡岩土体力学性能对降雨的响应存在滞后现象,即伴随着强降雨的发生滑坡已经有失稳危险,但需经过一定响应期位移才会有较大变化,因此这种预警方式会导致预警不及时。

降雨与位移是建立预警系统的两个主要指标,因降雨对土体力学性能影响存在滞后现象,应考虑前期降雨对滑坡当次阶跃影响,依据时间将降雨分为当期降雨与前期降雨^[24-26]。预警系统模型从考虑降雨、位移两因素的二维层面转换为考虑位移、当期降雨、前期降雨三因素的三维层面。鉴于滑坡在等速变形阶段累计位移也可能发生较大变化,采用位移速率这一位移维度相关指标进行阈值曲面的构建,据此建立位移速率-当期降雨-前期降雨阈值曲面。黄晓虎等^[11]采用降雨(当期降雨与前期降雨)、速率等 3 个维度组成的坐标系进行边坡预警,但在实际使用中,其预警阈值曲面通过整个监测区间监测指标的最小值直接建立,忽视了各次阶跃发生时不同监测指标变化规律与特性,本文在考虑整个监测区间所有阶跃变形监测指标的基础上建立预警阈值曲面,该曲面能够反映发生不同阶跃变形时监测指标所对应物理量的变化规律与趋势,提升了数据利用率,提高了边坡阶跃变形预警的准确性。

1.2 MLS

MLS 是基于 OLS 发展而来的,两者的显著区别在于 MLS 引入了权函数与紧支域(覆盖域),与加权最小二乘法(weight least squares, WLS)中权函数不同的是 MLS 中权函数作用区域随待拟合点变化,认为待拟合点的值只与领域的节点有关^[27]。相比于 OLS,MLS 不用特意寻找复杂多项式或其他函数作为基函数来提高拟合精度,依靠其权函数与紧支域,即使使用线性基也能获得高精度拟合结果。在保证精度的基础上,MLS 拟合曲线或曲面还具备光滑与连续特性^[16],拥有求取导数的能力。MLS 具有的高精度、连续性、光滑性等是 OLS 所不易具备的。Lancaster 等^[27]在曲面拟合中首次应用了 MLS,取得了较好的拟合效果。

2 当期降雨、前期降雨、位移速率阈值计算

2.1 位移速率阈值

降雨型滑坡进入阶跃时位移速率会显著增大^[28],即位移-时间曲线($s-t$ 曲线)斜率会陡增,可通过 $s-t$ 曲线的斜率变化趋势判断滑坡是否进入阶跃期。 $s-t$ 曲线由离散点组成,仅依靠其自身获得的曲线不具有光滑性,因而不能通过 $s-t$ 曲线直接计算曲线相关斜率。如前所述,通过 MLS 拟合的曲线具有光滑、连续、精度高等特征,可选用 MLS 对 $s-t$ 曲线进行拟合后计算拟合曲线斜率。应当注意的是,仅获得拟合曲线的一阶导数(即斜率)不能判断出斜率变化趋势,需借助二阶导数判断曲线凹凸性。

计算出 $s-t$ 曲线上各离散点的一阶导数与二阶导数后,寻找二阶导数为正值的区间,并将由等速变形阶段发生阶跃进入加速变形阶段位移所在点称为“类破坏点”^[29]。

按照“类破坏点”的定义,正值区间开始的点即为“类破坏点”,与之对应的位移速率即为该次阶跃变形的位移速率阈值,但鉴于位移速率计算的效率与可行性,滑坡阶跃变形预警的阈值曲面建立与使用时不宜通过拟合曲线斜率计算位移速率,而仍应以原数据求取位移速率。受 MLS 计算方法影响,拟合曲线二阶导数开始出现正值时滑坡通常仍在等速变形阶段,使用此时的位移速率会导致位移速率阈值偏小,增加误报可能性。拟合曲线二阶导数正值区间的最大值表示此时曲线斜率变化速率达最大,即此时滑坡处于阶跃阶段,由于 MLS 的计算特性,滑坡阶跃变形通常从最大值点对应的原数据开始体现,因此选用拟合曲线二阶导数中正值区间最大值点作为“类破坏点”,此时“类破坏点”对应的位移速率即为该次阶跃变形发生的位移速率阈值。

2.2 当期降雨与前期降雨阈值

当期降雨与前期降雨的划分标准是降雨的时间,对于降雨引起的阶跃型滑坡来说,当期降雨说明的是阶跃发生时的降雨强度,前期降雨表明的是阶跃发生前的累计降水量。当期降雨强度阈值相对容易确定,即 $s-t$ 曲线“类破坏点”监测期次对应的当日降雨强度。现阶段前期降雨的计算方法尚未达成共识^[27,30-33],但前期降雨计算公式的形式通常如下:

$$R_t = \sum_{i=1}^d \alpha^i R_i \tag{1}$$

式中: R_t 为前期累计降水量; α 为经验系数,用来描述入渗土体的降雨随时间蒸发流失的速度; R_i 为阶跃前第 i 天的降水量; d 为前期降雨的有效计算天数。

对 α 与 d 的取值仍存在争议。滑坡监测中 α 与 d 解释为:①前期降雨对当次阶跃的影响程度;②前期降雨计算天数。通常将 d 取定值($d = 5、10、15$ 等),即每次阶跃时取固定前 d 天作为前期降雨计算天数,固定前 d 天作为前期降雨计算天数的方法对此现象考虑不足:前第 $d+1$ 天或更早时间出现较大降雨强度,是否将此次降雨考虑加入前期降雨。本文认为应该考虑,尽管滑坡地理位置、渗入滑坡土体雨水的蒸发流失速度、边坡坡体性质等不同,但考虑降雨是否为前期降雨的实质是考虑阶跃前入渗到土体的降雨是否推动阶跃的发生,如推动阶跃发生则应将此次降雨考虑为前期降雨,不产生推动作用则忽略此次降雨。前第 $d+1$ 天的降雨强度大,此次降雨入渗土体的深度相对较大,渗入土体的降雨消散通常需要更长的时间,但此次降雨对滑坡的影响随时间增长是会逐渐降低的,当此次降雨与阶跃相距时间较长时可不考虑此次降雨的影响。本文认为前期降雨的有效计算天数是变化的,具体计算方式为:以阶跃发生时刻为起点,以此计算前 $d-1$ 天与前 d 天的前期累计降水量(R_t)的比值,当该比值持续大于某个值(本文按照赵衡等^[34]的研究取 0.9)时停止计算,取持续大于该值的区间起点(第 $d-1$ 天)为该阶跃前期降雨的有效计算天数。

α 受多因素影响,根据已有研究^[35-37]将其设为 0.8。有研究^[38]表明,地区降雨衰减系数不确定的情况下,采用经验系数也具有预报能力。

根据上述方法可计算获取各“类破坏点”的当期降雨、前期降雨、位移速率阈值,然后使用 MLS 拟合三维阈值信息点可建立阈值曲面,后续根据分级预警需要可基于阈值曲面搭建分级预警阈值曲面模型。构建阈值曲面模型的流程如图 1 所示。

3 模型构建与验证

本文以三峡库区王家坡滑坡^[13]为例建立阈值曲面,王家坡滑坡为典型的由降雨引起的阶跃变形滑坡,

由 3 个监测点组成实时 GPS 地表位移监测网络,其中 W-2 监测点位于滑坡前部地表,监测数据最为全面。本文选取 W-2 监测点作为研究对象,统计 2017 年 7 月 8 日至 2017 年 10 月 24 日共 109 天的监测数据,每一天的监测数据对应一个监测期次,相关监测数据如图 2 所示。

3.1 阶跃变形发生阈值曲面的构建

通过获取“类破坏点”计算出对应的位移速率、当期降雨和前期降雨阈值,利用 MLS 对 $s-t$ 曲线进行拟合。拟合前需先选取权函数,权函数应满足非负性、紧支性与单调性^[39],考虑到计算精度与计算效率,选择三次样条函数作为权函数,拟合曲线如图 3 所示。获取“类破坏点”需计算拟合曲线二阶导数,线性基不能满足要求,选择平方基作为基函数。影响区域半径设置时应注意保持局部近似性与求解效率,故影响区域半径不宜设置过大与过小,同时影响区域内节点数应使 MLS 的矩阵可逆。已知监测数据间隔为 1 单位长度,为确保矩阵可逆以及考虑求解效率与减小个别突出数据对曲线趋势的影响,对比分析不同影响区域半径的拟合结果,结果表明 7 单位长度为满足要求的最佳影响区域半径,因此将影响区域半径设置为 7 单位长度。

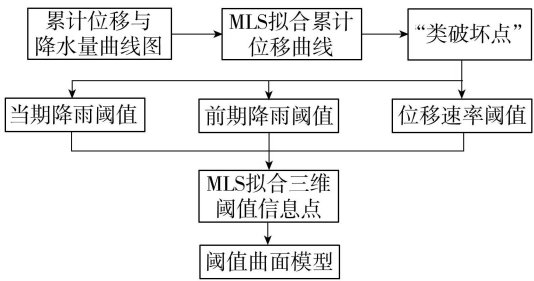


图 1 阈值曲面模型构建流程
Fig. 1 Construction flowchart of threshold surface model

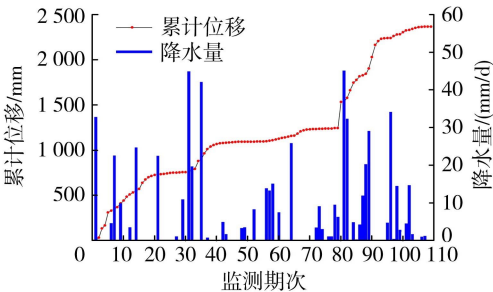


图 2 累计位移与降雨量曲线

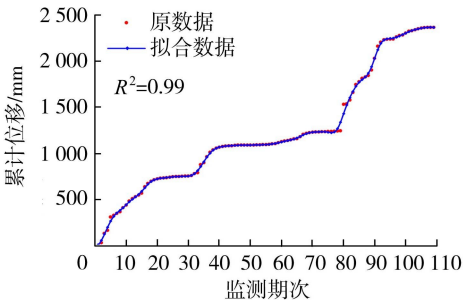


图 3 MLS 拟合的 $s-t$ 曲线

Fig. 2 Curve of cumulative displacement and rainfall

Fig. 3 $s-t$ curve fitted by MLS

采用 MLS 拟合得到的曲线决定系数 R^2 为 0.99,拟合值与实际值差异较小,对原数据解释程度高,表明 MLS 拟合效果优良,能够以高水平进行数据拟合。

进一步地,计算拟合曲线各点的一阶导数与二阶导数,如图 4 和图 5 所示。

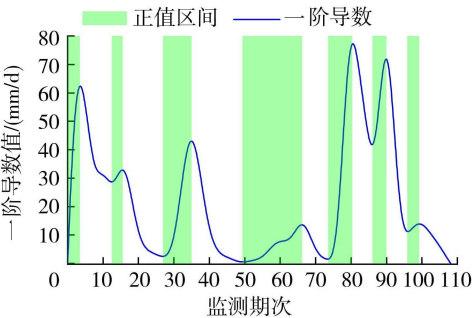


图 4 拟合曲线的一阶导数

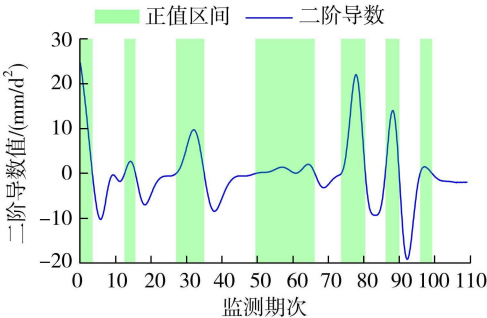


图 5 拟合曲线的二阶导数

Fig. 4 First-order derivative of the fitting curve

Fig. 5 Second-order derivative of the fitting curve

二阶导数正值区间对应滑坡的每次阶跃,由图 5 可知,从 2017 年 7 月 8 日至 2017 年 10 月 24 日共发生 7 次阶跃,因 $d=0\sim3$ 监测区间属于初始监测阶段,缺少前期降雨信息,将此正值区间剔除,其余正值区间分别为第 12~15、27~34、49~66、73~80、86~89、95~99 天,各正值区间对应此次边坡阶跃变形发生时间,由图 3 可知,强降雨发生时间与各正值区间一致,符合降雨诱发滑坡阶跃变形现象。对比文献[13]的结果,本文方法所得阶跃次数多 2 次,分别为第 49~66 天和第 95~99 天监测区间,观察原 $s-t$ 曲线,这两个监测区间位移变化较小,但将曲线趋势放大发现在监测区间前段位移量逐渐变大,监测区间中段该值取得极值,随后位

移又逐渐减小,符合阶跃变形特征,应计入阶跃变形次数;本文方法得到的“类破坏点”所在监测期次比文献[13]提前,这是因为本文模型考虑了岩土体对降雨响应存在的滞后现象,获得的“类破坏点”所在监测期次往往先于阶跃变形发生时位移速率极值所在监测期次。对比可知,本文方法能够捕捉不易察觉的阶跃变形以及考虑岩土体对降雨响应的滞后现象,得到较为全面与准确的阶跃信息和阶跃变形发生时的位移速率阈值。文献[13]在监测区间内得到的“类破坏点”分别为第 17、37、80、91 天,本文方法得到的阶跃变形区间与相关阈值信息如表 1 所示。

表 1 阶跃变形区间与相关阈值信息

Table 1 Step deformation interval and related threshold information

序号	阶跃变形区间	“类破坏点”所在监测期次	当期降雨/(mm/d)	前期降雨/mm	位移速率/(mm/d)
1	第 12~15 天	14	24.81	12.98	17.32
2	第 27~34 天	32	19.75	41.86	19.25
3	第 49~66 天	64	25.95	12.20	10.39
4	第 73~80 天	77	1.13	7.39	1.92
5	第 86~89 天	88	20.34	32.49	17.32
6	第 95~99 天	97	0.50	35.28	22.60

由表 1 可知,“类破坏点”的坐标分布较为均匀,可由点构建出面。其中第 73~80 天变形区间“类破坏点”的当期降雨、前期降雨、位移速率都较小,观察原数据可知,该区间位移在第 80 监测期次前位移变化均比较平稳、无上升迹象,只在第 80 监测期次时位移发生骤变,在骤变之后位移速率仍有增长趋势,但实际位移量变化较小,与阶跃变形特征不符,认为该次阶跃“类破坏点”属于异常点,剔除该次阶跃变形区间及其信息。根据表 1 信息对引起边坡阶跃的降雨趋势分析可知:①当期降雨大、前期降雨小对应着短期暴雨工况,在暴雨影响下,地表土体容重增大,抗剪强度降低,同时产生超孔隙水压力,导致地表大幅度变形,即在前期降雨较小情况下如果当期降雨足够大会引起边坡阶跃变形,对应第 1、3 次阶跃;②前期降雨大、当期降雨小对应着长历时降雨工况,由于持续时间长,降雨入渗到土体深部,引起该处土体软化、基质吸力与抗剪强度降低,导致土体深部变形,即在当期降雨较小情况下如果前期降雨足够大会引起边坡阶跃变形,对应第 2、6 次阶跃;③前期降雨与当期降雨都较大,对应着降雨历时不短且短期内出现大雨的工况,在此工况下,地表会产生一定的超孔隙水压力,同时土体深部基质吸力有一定程度的下降,双重作用下导致边坡阶跃,即前期降雨与当期降雨没有达到前两种工况限值但又都较大时同样会引起边坡阶跃变形,对应第 5 次阶跃。

如前所述,根据“类破坏点”获取该次阶跃变形对应的当期降雨、前期降雨、位移速率阈值,通过若干阈值信息点可构建出滑坡阶跃变形的阈值曲面。以(24.81 mm/d, 12.98 mm, 17.32 mm/d)、(19.75 mm/d, 41.86 mm, 19.25 mm/d)、(25.95 mm/d, 12.20 mm, 10.39 mm/d)、(20.34 mm/d, 32.49 mm, 17.32 mm/d)、(0.50 mm/d, 35.28 mm, 22.60 mm/d) 5 个三维坐标为待拟合阈值信息点,将 MLS 拓展至二维层面,利用 MLS 进行曲面拟合。其中,基函数选择线性基,权函数选择三次样条函数。影响区域内节点数应使矩阵可逆,故影响区域范围应包含足够数量的节点,根据已知节点信息设置曲面当期降雨与前期降雨变化范围分别为 0~26 mm/d、0~42 mm,影响区域半径设置为 50 单位长度,拟合的阈值曲面如图 6 所示。由图 6 可知,前期降雨保持不变,随着当期降雨的增大,引发滑坡阶跃变形的位移速率阈值不断减小,表明前期降雨作用一致时,随短时降水量的持续增大,滑坡发生阶跃变形的可能性也相应增大;当期降雨保持不变,随着前期降雨增大,引发滑坡阶跃变形的位移速率阈值变化较小,表明当期降雨一致时,前期降雨越大对滑坡土体影响程度越深,从而提高滑坡发生阶跃变形的可能性,符合降雨型滑坡阶跃变形发生规律。

3.2 基于位移速率的分级预警

现阶段,为了更加合理准确地进行滑坡失稳预警,常根据滑坡发展阶段、宏观变形程度、滑坡发生概率进行不同等级的预警^[40-42]。依据滑坡阶跃变形与失稳的可能性,本文将滑坡阶跃变形预警等级分为注意级、警示级、警戒级、警报级 4 级。

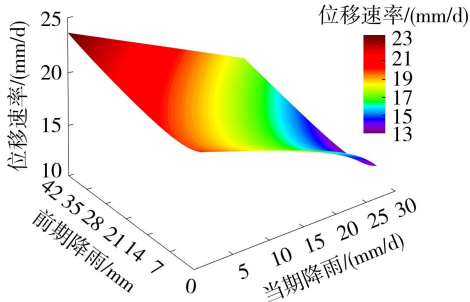


图 6 阶跃变形发生的阈值曲面

Fig. 6 Threshold surface of stepwise deformation

降雨引起的滑坡阶跃变形,位移是变形的直接表现,根据位移可判断阶跃变形是否发生,本文以位移这一结果变量作为分级依据,图 6 建立的阶跃变形发生的阈值曲面中,与位移相关的维度仅有位移速率,即预警分级的标准取决于位移速率,依据阶跃变形发生的临界曲面中的位移速率可建立不同预警等级的阈值曲面。图 6 阈值曲面中的位移速率为阶跃变形发生的临界值:低于该值表明边坡发生阶跃的可能性较小,预警等级为警示级,进一步将位移速率低于 0.5 倍临界值所在的监测期次预警等级归为注意级;超过该值表明边坡有较大可能发生阶跃变形,预警等级为警戒级,监测期次位移速率越大表明边坡发生阶跃变形的可能性越大、失稳概率越高,在此基础上取临界值的 1.5 倍进一步细化预警等级,当监测期次位移速率超过临界值的 1.5 倍时,预警等级为警报级,边坡有极大概率发生阶跃变形甚至失稳,应当立即发出警报并采取相应措施。具体分级信息如表 2 所示。

以图 6 阈值曲面为基础,依据表 2 中划分各等级的位移速率值,构建不同预警等级阈值曲面模型如图 7 所示。

3.3 分级预警阈值曲面模型验证

根据图 7 建立的分级预警阈值曲面模型,对第 100~108 监测期次的监测信息进行预警分析,得到各监测期次降雨与位移速率信息如表 3 所示。

由图 7 和表 3 知,共有 6 次监测期次预警等级为注意级,2 次监测期次预警等级为警示级,1 次监测期次预警等级为警戒级。其中,第 100 监测期次的预警等级为警戒级,但滑坡自第 100 天后未发生阶跃,分析认为是由于第 100 监测期次在监测数据最后一次阶跃变形影响范围内,即第 100 天属于该次阶跃变形所在的加速变形阶段,因此其预警等级会达到警戒级,后续未发生阶跃是由于第 100 天属于此次阶跃变形结束段,因此位移速率仍较大,从而引起(触发)预警。第 101~108 监测期次的预警等级为注意级与警示级,各监测期次当期降雨与前期降雨引起的位移速率较小,在此情况下滑坡发生阶跃变形的概率较小,即滑坡在该监测期次后发生阶跃可能性较低,分析滑坡原数据可知,在第 102~109 天期间滑坡未发生阶跃变形,与预警信息相符。可见该预警模型具有良好的预警效果。

4 结 论

- a. 相较于 OLS 拟合,MLS 拟合的 s - t 曲线具有高精度、光滑性、连续性等特征,利用 MLS 可使 s - t 曲线具备求导能力,能够获得较为全面与准确的“类破坏点”。
- b. 根据当期降雨、前期降雨、位移速率构建的阈值曲面与传统降雨强度-持续时间阈值曲线相比,考虑因素更为全面与合理,同时根据王家坡滑坡监测数据建立的阈值曲面表明滑坡阶跃变形发生时的位移速率受当期降雨阈值影响明显。
- c. 王家坡滑坡验证结果表明,基于 MLS 构建的阶跃型滑坡预警曲面模型预警等级与滑坡实际位移情况相符,具有良好预警效果,验证了该模型用于滑坡阶跃预警的可行性。

表 2 不同预警等级信息

Table 2 Information on different warning levels

预警等级	标识颜色	阶跃变形可能性	位移速率
注意级	绿色	低	$0 \sim 0.5v_1$
警示级	黄色	较低	$>0.5v_1 \sim v_1$
警戒级	橙色	高	$>v_1 \sim 1.5v_1$
警报级	红色	很高	$>1.5v_1$

注: v_1 为滑坡阶跃变形发生的阈值曲面对应的位移速率。

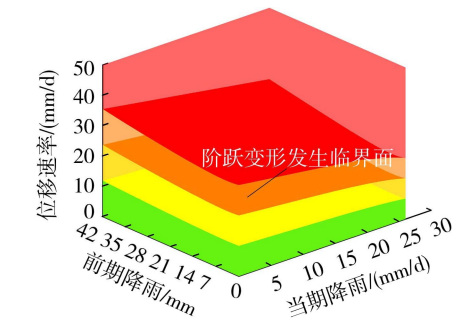


图 7 分级预警阈值曲面模型

Fig. 7 Graded warning threshold surface model

表 3 第 100~108 监测期次降雨与位移速率信息

Table 3 Rainfall and displacement rate information of 100-108 d's monitoring periods

监测期次	当期降雨/(mm/d)	前期降雨/mm	位移速率/(mm/d)
100	0	25.89	23.09
101	4.56	20.71	19.25
102	14.72	20.22	5.77
103	1.73	27.95	9.62
104	0	23.74	11.55
105	0	19.00	7.70
106	1.11	15.20	3.85
107	1.29	13.05	3.85
108	0	11.47	0

参考文献:

[1] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报,2020,28(2):360-374. (XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning:consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(2):360-374. (in Chinese))

[2] 张建伟,钱思羽,王小锯,等. EICP 与木质素联合改性粉土边坡抗雨蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):70-76. (ZHANG Jianwei,QIAN Siyu,WANG Xiaoju,et al. Experimental study on resistance of EICP and lignin joint-modified silt slope to rain erosion[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):70-76. (in Chinese))

[3] 伍宇明,兰恒星,高星,等. 台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究:以福建地区为例[J]. 工程地质学报,2014,22(2):255-262. (WU Yuming,LAN Hengxing,GAO Xing,et al. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: a case study of Fujian Province[J]. Journal of Engineering Geology,2014,22(2):255-262. (in Chinese))

[4] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska Annaler Series A: Physical Geography,1980,62(1/2):23-27.

[5] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):61-68. (XIE Yajun,GU Hao,SU Yuchen,et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):61-68. (in Chinese))

[6] GUZZETTI F,PERUCCACCI S,ROSSI M,et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,2007,98(3/4):239-267.

[7] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. Engineering Geology,2004,73(3/4):247-265.

[8] 黄英,石崇喜,张祖连,等. 云南红土室内滑坡可行性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(6):497-502. (HUANG Ying,SHI Chongxi,ZHANG Zulian,et al. Feasibility study of indoor test of Yunnan laterite landslide[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2014,42(6):497-502. (in Chinese))

[9] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei,WU Jian,DAI Shouye,et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):85-90. (in Chinese))

[10] 许强,曾裕平,钱江澎,等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报,2009,28(4):501-505. (XU Qiang,ZENG Yuping,QIAN Jiangpeng,et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria [J]. Geological Bulletin of China,2009,28(4):501-505. (in Chinese))

[11] 黄晓虎,雷德鑫,夏俊宝,等. 降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用[J]. 岩土力学,2019,40(9):3585-3592. (HUANG Xiaohu,LEI Dexin,XIA Junbao,et al. Forecast analysis and application of stepwise deformation of landslide induced by rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(9):3585-3592. (in Chinese))

[12] 杨攀,杨军. 考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面[J]. 岩土力学,2015,36(增刊1):169-174. (YANG Pan,YANG Jun. Rainfall threshold surface for slopes stability considering antecedent rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Sup1):169-174. (in Chinese))

[13] 雷德鑫. 三峡库区王家坡滑坡降雨阈值及预警预报研究[D]. 宜昌:三峡大学,2019.

[14] 徐峰,汪洋,杜娟,等. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):746-751. (XU Feng,WANG Yang,DU Juan,et al. Study of displacement prediction model of landslide based on time series analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(4):746-751. (in Chinese))

[15] 倪慧. 移动最小二乘数据拟合中的若干问题研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2011.

[16] 郭春贤. 移动最小二乘法的快速算法及其应用[D]. 重庆:重庆大学,2016.

[17] 黄晓虎,夏俊宝,雷德鑫. 一种基于位移监测的“降雨阶跃型”滑坡预警系统[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):68-76. (HUANG Xiaohu,XIA Junbao,LEI Dexin. An early warning system for rainfall stepwise landslide based on deformation monitoring[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2018,29(6):68-76. (in Chinese))

[18] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1104-1112. (XU Qiang,TANG Minggao,XU Kaixiang,et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(6):1104-1112. (in Chinese))

[19] 张友谊,胡卸文,朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望[J]. 自然灾害学报,2007,16(1):104-108. (ZHANG Youyi,HU Xiewen,ZHU Haiyong. Prospect of research on relationship between landslide and rainfall[J]. Journal of Natural Disasters,2007,16(1):104-108. (in Chinese))

[20] 贺可强,郭栋,张朋,等. 降雨型滑坡垂直位移方向率及其位移监测预警判据研究[J]. 岩土力学,2017,38(12):3649-3659. (HE Keqiang, GUO Dong, ZHANG Peng, et al. The direction ratio of vertical displacement for rainfall-induced landslides and its early warning criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3649-3659. (in Chinese))

[21] 林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2007,28(9):1931-1936. (LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936. (in Chinese))

[22] 徐振山,王苏东,丁宏伟,等. 基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 61-69. (XU Zhenshan, WANG Sudong, DING Hongwei, et al. Study on setup of early warning station in Chengtong tidal reach based on numerical simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 61-69. (in Chinese))

[23] 占清华,王世梅,谈云志,等. 降雨及库水作用对滑坡影响规律试验系统研究[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):32-38. (ZHAN Qinghua, WANG Shimei, TAN Yunzhi, et al. Test system for landslide caused by rainfall and reservoir water fluctuation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 32-38. (in Chinese))

[24] 陈洪凯,魏来,谭玲. 降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(5):990-996. (CHEN Hongkai, WEI Lai, TAN Ling. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-induced landslide[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(5): 990-996. (in Chinese))

[25] MA Tuhua, LI Changjiang, LU Zhiming, et al. An effective antecedent precipitation model derived from the power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level[J]. Geomorphology, 2014, 216: 187-192.

[26] 李长江,麻士华,孙乐玲,等. 降雨型滑坡预报中计算前期有效降雨量的一种新方法[J]. 山地学报,2011,29(1):81-86. (LI Changjiang, MA Tuhua, SUN Leling, et al. A new approach to calibrate antecedent precipitation for rainfall-triggering landslide forecast[J]. Mountain Research, 2011, 29(1): 81-86. (in Chinese))

[27] LANCASTER P, SALKAUSKAS K. Surfaces generated by moving least squares methods[J]. Mathematics of Computation, 1981, 37(155): 141-158.

[28] 张富灵,邓茂林,周剑,等. 长江三峡库区谭家湾滑坡基本变形特征及机理分析[J]. 长江科学院院报,2021,38(1):78-83. (ZHANG Fuling, DENG Maolin, ZHOU Jian, et al. Basic deformation characteristics and mechanism of Tanjiawan landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 78-83. (in Chinese))

[29] 陈志强,王亮清,刘顺昌. 基于斜率阈值法的滑坡预报分析[J]. 人民长江,2010,41(10):38-41. (CHEN Zhiqiang, WANG Liangqing, LIU Shunchang. Research on landslide prediction based on slope threshold of rainfall[J]. Yangtze River, 2010, 41(10): 38-41. (in Chinese))

[30] 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):453-457. (WEI Fangqiang, HU Kaiheng, CHEN Jie. Determination of effective antecedent rainfall for debris flow forecast[J]. Mountain Research, 2005, 23(4): 453-457. (in Chinese))

[31] 王礼先,于志民. 山洪及泥石流灾害预报[M]. 北京:中国林业出版社,2001.

[32] CROZIER M J. Landslides: causes, consequences and environment[M]. London: Croom Helm, 1986.

[33] GLADE T, CROZIER M, SMITH P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(6/7/8): 1059-1079.

[34] 赵衡,宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1481-1487. (ZHAO Heng, SONG Erxiang. Rainfall thresholds for regional landslides[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1481-1487. (in Chinese))

[35] 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. (in Chinese))

[36] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于WEB的浙江省降雨型滑坡预警预报系统[J]. 地球科学,2005,30(2):250-254. (ZHANG Guirong, YIN Kunlong, LIU Liling, et al. Warning system for rain induced landslides based on internet in Zhejiang Province, China[J]. Earth Science, 2005, 30(2): 250-254. (in Chinese))

[37] 谢剑明,刘礼领,殷坤龙,等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报,2003,22(4):101-105. (XIE Jianming, LIU Liling, YIN Kunlong, et al. Study on the threshold valves of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4): 101-105. (in Chinese))

intermodal transport[J]. Maritime Policy & Management,2023,50(3):390-411.

[15] 王松波. 考虑帕累托最优解的多目标优化进化算法[J]. 数学的实践与认识,2022,52(9):132-146. (WANG Songbo. Multi-objective optimization evolutionary algorithm considering Pareto optimal solution[J]. Mathematics in Practice and Theory,2022,52(9):132-146. (in Chinese))

[16] 汤岭,王海军,李致家,等. 代理模型参数率定方法在 TOPKAPI 模型中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):21-28. (TANG Ling, WANG Haijun, LI Zhijia, et al. Application of surrogate modeling parameter calibration method in TOPKAPI model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):21-28. (in Chinese))

[17] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA- II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA- II algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[18] 徐存东,翟东辉,张硕,等. 改进的 TOPSIS 综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):222-228. (XU Cundong, ZHAI Donghui, ZHANG Shuo, et al. Application of improved TOPSIS comprehensive evaluation model to optimization of river regulation schemes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(3):222-228. (in Chinese))

[19] 杨志豪,何建新,李志华,等. 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):82-88. (YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(2):82-88. (in Chinese))

[20] 彭广益,陈汨梨,朱逸凡,等. 基于改进生成系数法的西非外贸集装箱生成量测算[J]. 华东交通大学学报,2019,36(3):135-142. (PENG Guangyi, CHEN Mili, ZHU Yifan, et al. Calculation of west African foreign trade container production based on improved coefficient method[J]. Journal of East China Jiaotong University,2019,36(3):135-142. (in Chinese))

[21] BAYANE B M, QIU Yanjun, BEKHZAD Y. A review and analysis of railway transportation system in the economic community of West African States;towards the development of sustainable regional goal[J]. Global Journal of Engineering and Technology Advances,2020,2(2):11-22.

[22] The World Bank. Transport prices and costs in Africa;a review of the international corridors[EB/OL]. [2024-02-20]. <https://documents.worldbank.org>.

[23] 孙祎峥,王广生,封学军,等. 基于重力 P -中值的非洲西海岸集装箱枢纽港选择[J]. 水道港口,2023,44(4):694-700. (SUN Yizheng, WANG Guangsheng, FENG Xuejun, et al. Selection of container hub ports along west coastline of Africa based on gravity P -median model[J]. Journal of Waterway and Harbor,2023,44(4):694-700. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-06 编辑:熊水斌)

(上接第 102 页)

[38] 丛威青,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(增刊 1):2808-2812. (CONE Weiqing, PAN Mao, LI Tiefeng, et al. Quantitative analysis of critical rainfall-triggered debris flows[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(Sup1):2808-2812. (in Chinese))

[39] 娄路亮,曾攀. 影响无网格方法求解精度的因素分析[J]. 计算力学学报,2003,20(3):313-319. (LOU Luliang, ZENG Pan. Factors affecting computational precision of MLS-based meshless method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2003,20(3):313-319. (in Chinese))

[40] 刘艳辉,董力豪,黄俊宝,等. 基于 RF 和概率分级的滑坡临界降水阈值的确定方法[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(10):177-185. (LIU Yanhui, DONE Lihao, HUANG Junbao, et al. RF and probability grading-based determination method of landslide critical precipitation threshold [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (10): 177-185. (in Chinese))

[41] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (DU Ruoyu, YAO Cheng, LIU Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))

[42] 王尚庆,徐进军,罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(10):1218-1221. (WANG Shanqing, XU Jinjun, LUO Mian. Study on warning of dangerous state of Baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2009,34(10):1218-1221. (in Chinese))

(收稿日期:2023-09-22 编辑:熊水斌)