

基于MACD指标的渐变型滑坡临滑预报模型研究

王家柱, 巴仁基, 葛 华, 铁永波, 高延超

Research on early-warning prediction model of critical slide of creep landslide based on the MACD index

WANG Jiazhu, BA Renji, GE Hua, TIE Yongbo, and GAO Yanchao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187

基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间预测

A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model

方汕澳, 许强, 修德皓, 赵宽耀, 李志刚, 蒲枫 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 169-179

地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43-50

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 180-186

典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137-143



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202110002

王家柱, 巴仁基, 葛华, 等. 基于 *MACD* 指标的渐变型滑坡临滑预报模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 133-140.
WANG Jiazhu, BA Renji, GE Hua, *et al.* Research on early-warning prediction model of critical slide of creep landslide based on the *MACD* index[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 133-140.

基于 *MACD* 指标的渐变型滑坡临滑预报模型研究

王家柱^{1,2}, 巴仁基¹, 葛 华¹, 铁永波¹, 高延超¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 滑坡的临滑预警预报研究一直以来都是热点也是难点。速度倒数模型是目前广泛使用的临滑预报模型, 选择恰当的拟合曲线起始点将提高预报模型的精度。利用经济学上非常成熟的平滑异同平均线指标(*MACD*)快速寻找速度倒数模型拟合曲线的起始点, 也就是滑坡临滑加速变形阶段开始加速(Onset of Acceleration, OOA)点, 并以云南省会泽县的区布嘎滑坡为例, 使用该指标对滑坡体进行临滑预报, 并对该模型准确性进行了评估。结果表明: 当变形速度的 *MACD* 值在 $-1 \sim 1$ 的区间时, 代表滑坡变形速度虽然有所增加, 但变形趋势并未整体改变; 当 *MACD* 值超过 $-1 \sim 1$ 的区间, 代表滑坡变形趋势整体发生改变, 可将此阶段短期平均线上穿长期平均线的点(同时也是 *MACD* 值由负转正的点), 作为滑坡 OOA 点。利用 *MACD* 指标能够快速有效的寻找拟合曲线起始点, 利用指数平滑函数(ESF)处理的监测数据, 拟合曲线的确定系数最高, 误差率最低, 误差率低于 2%, 模型预测结果随着数据的更新, 将不断逼近真实结果, 具有较高的准确率。

关键词: 临滑预警预报; *MACD* 指标; 渐变型滑坡; 速度倒数法; GNSS 监测

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0133-08

Research on early-warning prediction model of critical slide of creep landslide based on the *MACD* index

WANG Jiazhu^{1,2}, BA Renji¹, GE Hua¹, TIE Yongbo¹, GAO Yanchao¹

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Station Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The forecast of landslide's early-warning prediction is always a hot and difficult issue. The inverse velocity method is widely used for the landslide forecast, while the accuracy of the prediction is directly affected by the appropriate starting point of the fitting curve. This paper introduces the moving average convergence divergence (*MACD*) index, which is a mature forecasting method in the financial field, to quickly search the start point of fitting curve (that is, onset of acceleration during the stage of accelerated deformation). The accuracy of the model is evaluated by the case of the Qubuga landslide in Huize County, Yunnan Province. The study results show that when the *MACD* index of deformation rate is in the range of -1 to 1 , the deformation trend of landslide does not change. When the *MACD* index exceeds the range of -1 to 1 , the deformation tendency radically changes and the point at which the short-term average line crosses the long-term average line and the *MACD* index changes

收稿日期: 2021-10-04; 修订日期: 2021-12-05

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地调项目(DD20190640); 国家自然科学基金项目(41702374)

第一作者: 王家柱(1992-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事地质灾害机理分析与监测预警工作。E-mail: 383001693@qq.com

通讯作者: 高延超(1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查和风险评价工作。E-mail: 19574058@qq.com

from negative to positive can be regarded as the onset of acceleration. The starting point of the fitting curve is quickly and effectively found by the *MACD* index, and the monitoring data processed by the exponential smoothing function (ESF) has a higher certainty coefficient and lower rate of deviation, less than 2%. With the update of the data, the prediction results of the model approach the actual time of failure and has higher accuracy.

Keywords: early-warning prediction of critical slide; *MACD* index; creep landslide; inverse velocity; GNSS monitoring

滑坡是世界上最为常见的地质灾害之一,每年造成大量的人员伤亡和巨大的经济损失^[1-4]。据统计,2020 年我国共发生地质灾害 7 840 起,造成 139 人死亡(失踪)、58 人受伤,直接经济损失 50.2 亿元,其中 60% 以上由滑坡灾害引起。由于滑坡诱发因素及其破坏机制的复杂性,滑坡的预警预报既是热点也是难点^[5-8]。近年来,虽有不少学者从加强监测设备硬件能力和提升监测平台数据解算能力方面进行研究,但尚未形成统一认识,不同地区适用性较差^[9-11]。自 20 世纪 60 年代,日本学者 Saito^[12] 利用蠕变试验成果,首次提出滑坡预报的经验公式以后,国内外学者先后提出了数十种模型^[13-15],其中日本学者 Fukuzono^[16] 在 Saito 模型的基础上,通过分析实验室获得的滑坡位移数据,得出速度倒数与时间的曲线有凹、凸和线性 3 种关系,而大量经验数据表明,速度倒数与时间的拟合曲线以线性关系居多,因此速度倒数法成为一种广泛使用的临滑预报方法^[17],目前在矿山边坡^[18,19]、自然边坡^[20] 和室内物理模拟^[21] 上,均取得了较好的应用。速度倒数与时间的拟合曲线多呈线性关系,主要与滑坡中新生成的剪切面和裂纹发展有关^[22],在临滑阶段,速度倒数与时间关系更加接近线性。选择合适的拟合曲线起始点,即临滑加速变形阶段开始加速(Onset of Acceleration, OOA)点,将显著提高速度倒数模型的预警精度^[23-25]。

大量蠕变试验和斜坡变形监测资料表明^[26-28],在常规重力作用下,根据斜坡的变形-时间曲线特征可将滑坡分为渐变型、突发型和稳定型 3 种类型。渐变型滑坡需要经过相对较长时间的孕育和演化才能逐步形成,一般发生于松散的土质斜坡或临空条件不好、具有时效变形的岩质滑坡中。渐变型滑坡从变形到启动具有明显的 3 阶段蠕变特征,为监测预警预报的实现提供了有利条件,目前滑坡预警成功的案例均以渐变型滑坡居多^[29-31]。

平滑异同平均线(moving average convergence divergence, *MACD*)是阿佩尔于 1979 年提出的,其利用长期和短期平均线之间差离值,反应股票整体趋势的变化

情况,对股票买进和卖出时机作出研判^[32]。由于该指标能较好的反映数据趋势突变的时间点,本文引进该指标,寻找滑坡变形趋势的突变点,即滑坡 OOA 点。因此,本文以渐变型滑坡为研究对象,利用经济学上已非常成熟的 *MACD* 指标快速寻找滑坡 OOA 点,结合速度倒数模型,提出渐变型滑坡临滑时间预测模型,并结合典型实例,对该方法准确性进行评估,期望研究成果为滑坡预警预报提供一种快速而有效的手段。

1 基于 *MACD* 指标的临滑时间预测模型

1.1 速度倒数模型

如前所述,日本学者 Fukuzono^[16] 通过滑坡变形监测数据,得到速度倒数与时间的关系,如式(1)所示。当 $\alpha > 2$ 时,拟合曲线呈凸形; $\alpha < 2$ 时,拟合曲线呈凹形; $\alpha = 2$ 时,拟合曲线呈直线型(图 1)。

$$\frac{1}{v} = [A(\alpha - 1)(t_f - t)]^{\frac{1}{\alpha - 1}} \quad (1)$$

式中: v ——变形速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

α ——常量系数,是材料属性的函数,本文取 $\alpha = 2$;

A ——常量系数,是材料属性的函数;

t_f ——滑坡实际发生时间/s;

t ——时间变量/s。

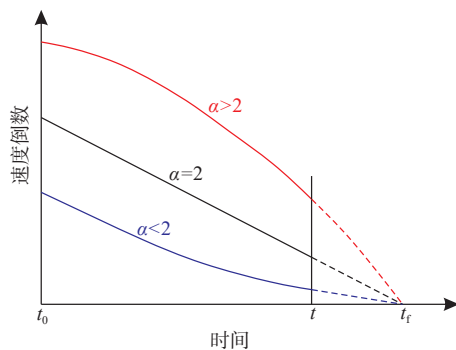


图 1 速度倒数与时间的关系曲线图

Fig. 1 Relationship between inverse velocity and time

1.2 *MACD* 模型指标构建技术方法

MACD 利用短期均线与长期均线之间的聚合与分离状况,对预测事物的高点及低点进行研判,其原

理是利用不同速度(短期与长期)的平滑移动平均线(exponential moving average, EMA)计算两者的正负差, 又称离差值(differential value, DIF), 再由 DIF 的多日平均计算离差平均值(discrete exponential average, DEA)。经过双重平滑运算, 便可较好的算出趋势的转折点; 将离差值与离差平均值画在以时间为横轴, MACD 值为纵轴的坐标轴上, 通过观察 DIF 和 DEA 的方向、绝对位置和相对位置关系, 把它们的同向、异向和交叉作为判断趋势翻转的时机。具体步骤如下:

(1) 计算短期平均线(SMA)与长期平均线(LMA):

$$\bar{v}_t = \frac{v_t + v_{t-1} + \cdots + v_{t-(n-1)}}{n} \quad (2)$$

式中: $\bar{v}_t$ —— t 时刻平均变形速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

v_t —— t 时刻变形速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

n ——平均数周期。

借鉴 Carla 等^[18]关于平均数滤波的方法, SMA 中 $n=3$, LMA 中 $n=10$ 。

(2) 计算 DIF 和 DEA:

$$DIF = SMA - LMA \quad (3)$$

$$DEA = \frac{DIF_t + DIF_{t-1} + \cdots + DIF_{t-(m-1)}}{m}$$

式中: m ——离差平均值指定期限/d。

在金融领域, m 一般取为 9 d, 因此本模型中 $m=9$ d。

(3) 计算 MACD 值:

$$MACD = DIF - DEA \quad (4)$$

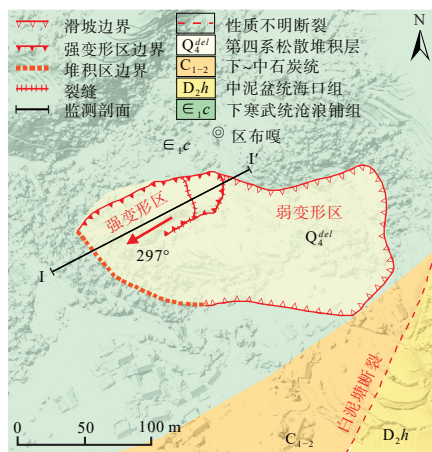
当 MACD 指标在 $-1 \sim 1$ 区间内震荡时, 为滑坡正常变形区间; $MACD > 1$ 且后续数值在短时间内急速增加, 代表速率在短期内急剧上升, 即认为滑坡进入加速变形阶段, 该点便为滑坡 OOA 点。

2 区布嘎滑坡预报模型实例研究

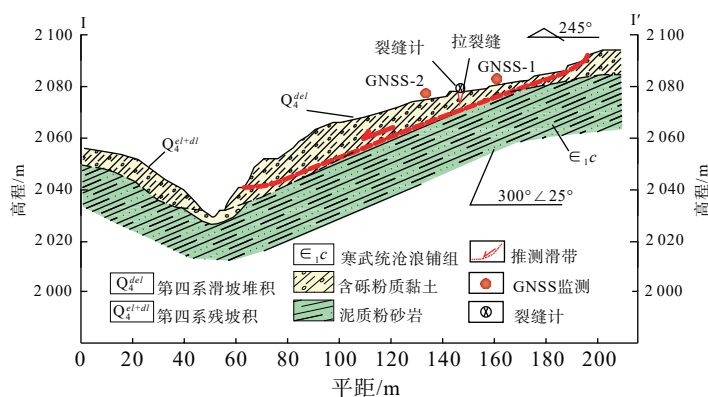
2.1 滑坡发育特征与监测设备部署

2.1.1 滑坡地质背景

区布嘎滑坡位于云南省会泽县大井镇, 平面上呈近似“舌形”, 横向宽约 120 m, 纵向长约 280 m, 平均厚约 10 m, 体积约 $33.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向 297° (图 2), 剖面上整体坡度约 25° , 前缘沟道切割较陡约 50° , 中-后缘为宽缓台地, 坡度约 15° , 为中型土质滑坡 (图 2)。滑坡边界较为明显, 后缘以斜坡陡缓交界处为界, 左右两侧以深切冲沟为界, 具有明显的双沟同源特征, 滑体三面临空。滑体北侧由于前缘临空条件良好, 局部复活, 为滑坡强变形区, 该区纵向长约 130 m, 宽约 45 m, 厚约 10 m, 体积 $5.85 \times 10^4 \text{ m}^3$; 滑体南侧为弱变形区, 目前滑坡变形特征不明显。



(a) 平面分布图



(b) 剖面图

图 2 区布嘎滑坡平面分布图与剖面图

Fig. 2 Geological map and profile of the Qubuga landslide

根据现场调查, 老滑坡体主要以残坡积粉质黏土夹角砾为主, 基岩主要为下寒武统沧浪铺组红井峭段泥质粉砂岩, 新近滑坡体(强变形区)变形迹象明显, 中部发育横向延伸长度约 40 m 的拉张裂缝, 基本贯穿整个滑坡体。滑体两侧受滑坡变形影响, 形成错落台

坎, 高约 1 m。

2.1.2 滑坡监测设备部署

在强变形区前缘和后缘各布设 1 台 GNSS, 弱变形区中部布设 1 台 GNSS, 雨量计和 GNSS 基站均布设于滑坡影响区以外的稳定区域 (图 3)。

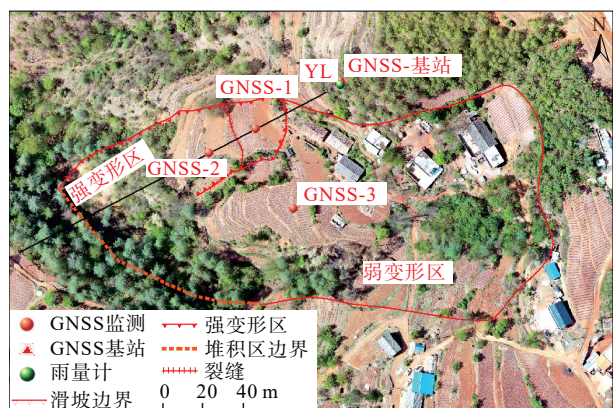


图 3 区布嘎滑坡监测设备布置图

Fig. 3 Location and distribution of the installed monitoring instruments

2.1.3 滑坡变形失稳过程

2020 年 9 月 3 日,雨量计显示,最大小时降雨量达 34 mm,单日降雨量达 68 mm(图 4)。2020 年 9 月 9 日,滑坡体开始出现变形,至 2020 年 9 月 17 日此轮强降雨结束,滑坡强变形区变形特征明显,中部形成宽约 50~80 cm 的贯通拉裂缝,后缘新增多级拉张裂缝,宽约 20~80 cm,延伸长度 5~20 m,滑坡两侧陡坎下错加剧,深度约 5~8 m,如图 5 所示。

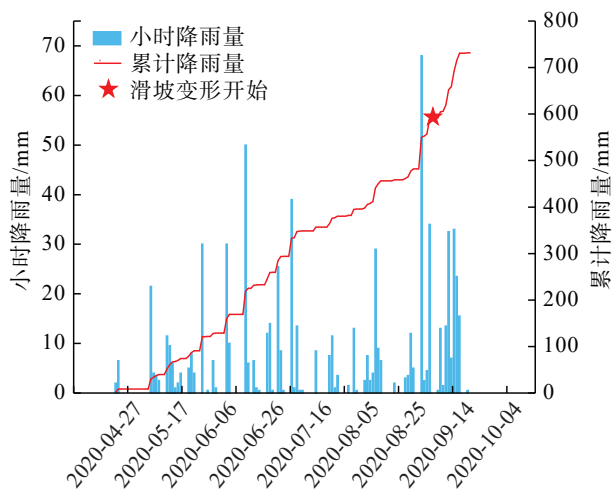


图 4 滑坡区单日降雨量与累计降雨量图

Fig. 4 Daily and cumulative rainfall of landslide area

2.2 滑坡临滑时间预报

强变形区 GNSS-1 和 GNSS-2 位移和速率数据显示,2020 年 8 月 30 日,累计位移和变化速率开始急剧上升,滑坡进入临滑阶段(图 6)。累计位移-时间曲线具有明显的初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段,基本符合渐变型滑坡的 3 阶段特征。弱变形区 GNSS-3 累计位移平稳增加,变化速率在一定范围内



(a) 滑坡中部贯通拉张裂缝



(b) 滑坡后缘下错陡坎

图 5 强降雨后滑坡区变形破坏特征

Fig. 5 Deformation characteristics of landslide after heavy rainfall

波动,可见滑动变形主要发生在强变形区,后期现场复核也证实此观点。因此着重选取 GNSS-1 和 GNSS-2 监测点进行临滑时间预报。

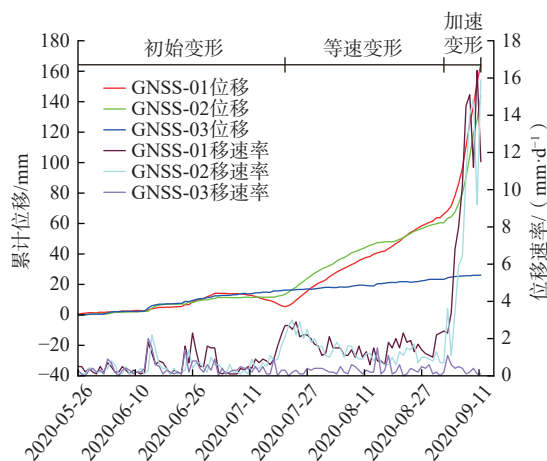


图 6 GNSS 监测累计位移与速率时效变形曲线

Fig. 6 Curve of accumulative displacement and velocity-time of GNSS

2.2.1 滑坡位移速率 MACD 指标

以监测设备安装时间即 2020 年 5 月 26 日为起点,记为 1,并以天为单位对位移速率进行解算,按前文所述步骤计算 GNSS-1 和 GNSS-2 位移速率的 MACD 指标,并以柱状图形式表达,见图 7、图 8。

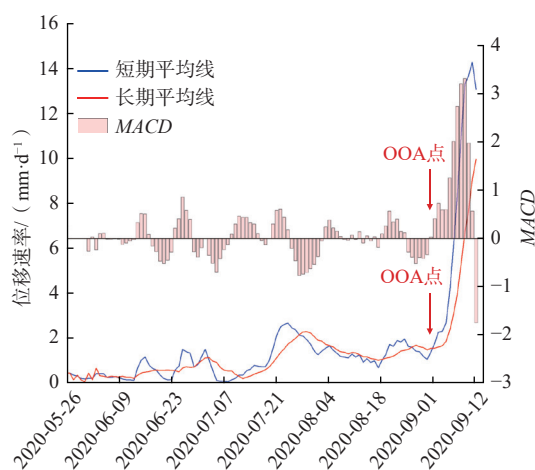


图7 GNSS-1 位移速率 MACD 柱状图

Fig. 7 MACD histogram of deformation rate of GNSS-1

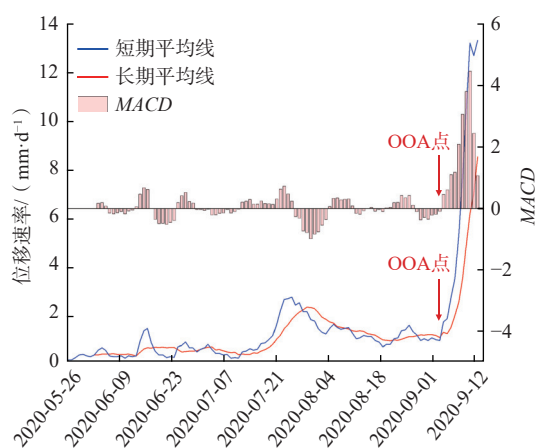


图8 GNSS-2 位移速率 MACD 柱状图

Fig. 8 MACD histogram of deformation rate of GNSS-2

2.2.2 确定滑坡 OOA 点

根据 MACD 值以及短期平均线与长期平均线交叉情况综合分析。GNSS-1 监测数据显示,在监测开始后第 98 天(即 2020 年 8 月 31 日),MACD 指标由负变为正,且随后急剧增加,最大值达 3.304;短期平均线同样在 8 月 31 日由下至上穿越长期平均线,随后与长期平均线形成较大偏离,这意味着速率在短期内急剧增加,因此判断 2020 年 8 月 31 日为 GNSS-1 监测区域(即滑坡前缘)OOA 点,也是速度倒数模型拟合曲线的开始点。

GNSS-2 监测数据表明,在监测开始后第 100 天(即 2020 年 9 月 2 日),MACD 值由负变正,且随后急剧增加至 4.486;短期平均线同样在 9 月 2 日由下至上穿越长期平均线,随后偏离长期平均线,因此 9 月 2 日为 GNSS-2 监测区域(即滑坡后缘)OOA 点。

由 2 处 GNSS 监测数据可以看出,当短期平均线

向上穿过长期平均线时,代表滑坡在短时间内速度增加较快,如果 MACD 值仍在 $-1 \sim 1$ 的区间,代表速度虽然有所增加,但变形趋势并未整体改变;一旦 MACD 值超过 $-1 \sim 1$ 的区间,代表变形趋势整体发生改变,便可将短期平均线上穿长期平均线的点,同时也是 MACD 值由负转正的点,作为滑坡 OOA 点。

可以看出,利用 GNSS-1 和 GNSS-2 监测数据计算出的滑坡 OOA 点存在一定的差异,其中 GNSS-1 所在区域 OOA 点为 2020 年 8 月 31 日,而 GNSS-2 所在区域 OOA 点为 2020 年 9 月 2 日。究其原因,主要是由于滑坡体中部发育的完全贯通的长大拉张裂缝,将强变形区切割成较为独立的两部分,造成两部分滑体 OOA 点存在一定差异。

2.2.3 利用速度倒数模型进行滑坡临滑预报

为降低 GNSS 监测数据的系统误差和偶然误差,需对采集的速率数据进行预处理。Carla 等^[25]认为,指数平滑法(ESF)兼容了全期平均和移动平均所长,不舍弃过去的的数据,但是随着数据的远离,仅给予逐渐减弱的影响程度,即赋予逐渐收敛为 0 的权数,对于短期趋势预测有很好的效果,计算公式见式(5):

$$\bar{v}_t = \beta \cdot v_t + (1 - \beta) \cdot \bar{v}_{t-1} \quad (5)$$

式中: β ——平滑系数,取 $\beta=0.5$ 。

为选取最优的数据处理方法,利用短期平均($n=3$)、长期平均($n=9$)以及指数平滑法,分别对 GNSS-1 和 GNSS-2 监测数据进行线性拟合。结果显示 GNSS-1 监测点(图 9)中,原始数据和长期平均线数据(LMA)的拟合效果较差,其确定系数(R^2)低于 0.9,而利用指数平滑函数优化后的数据,其 R^2 最大为 0.981;同时就预测精度而言,LMA 预测结果最差,误差率达 8.23%,ESF 预测结果最优,误差率仅为 0.04%。GNSS-2 监测数据拟合效果(图 10)与 GNSS-1 监测数据基本一致,LMA 预测结果最差,误差率达 9.06%,其 R^2 最低,仅为 0.507,ESF 预测结果最优,误差率仅为 0.45%。综上,本文与 Carla 等^[25]研究结果基本一致,ESF 对短期趋势预测具有较好的效果。

鉴于指数平滑函数在拟合程度和预测结果上表现出的优势,本文采用指数平滑函数对 GNSS-1 和 GNSS-2 采集的位移速率数据进行处理后,利用速度倒数模型进行临滑时间预报。预测结果见表 1 与图 11。由于完成线性拟合需至少 3 个数据点,因此 GNSS-1 的第 98 与 99 天无预测数据,预测数据由第 100 天开始;GNSS-2 的第 100 与 101 天无预测数据,预测数据由第 102 天开始。

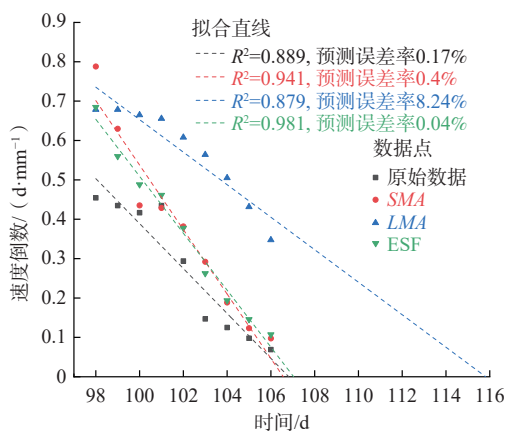


图 9 GNSS-1 速度倒数拟合曲线图

Fig. 9 Fitted curve of inverse velocity of GNSS-1

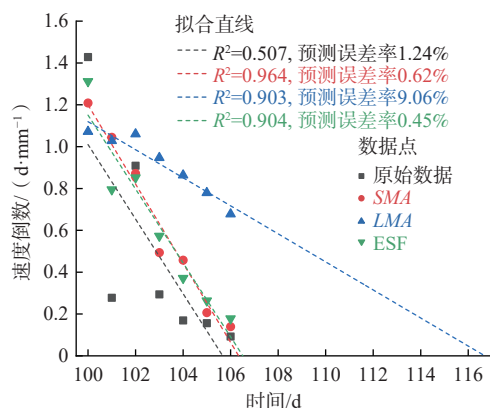


图 10 GNSS-2 速度倒数拟合曲线图

Fig. 10 Fitted curve of inverse velocity of GNSS-2

预测结果显示,通过指数平滑处理后,即便在数据量较少的情况下,预测误差率也不超过 2%。GNSS-1 预测数据显示,在 OOA 点后第 4 天,预测误差率便低于 1%,滑坡发生滑动时间在第 106.56~107.22 天之间,与实际发生滑动的第 107 天(即 2020 年 9 月 9 日)接近,模型显示出较好的预测结果。同时,随着时间推移,监测数据不断更新,预测时间在真实时间上下波动且不断逼近真实滑动时间。GNSS-2 预测数据显示,在 OOA 点后第 6 天,预测误差率低于 1%,滑坡发生滑动时间在第 106.08~106.52 天之间,预测结果在前期数据量较少的情况下,误差较大,随着监测数据不断更新,预测结果不断逼近真实滑动时间。

3 结论

(1)当 MACD 指标在 -1~1 区间内震荡时,为滑坡正常变形区间;MACD 指标由负转正且其值在短期内迅速增加时,可以认为滑坡进入了加速变形阶段,该点便为 OOA 点。

表 1 预测时间与真实滑动时间误差表

Table 1 Error rates of predicted time and real landslide time of GNSS-1 and GNSS-2

监测仪编号	监测时间 /d	预测时间 /d	滑动时间 /d	预测与滑动时间之差 /d	误差率 /%
GNSS-1	100	104.88	107	-2.12	1.98
	101	106.90	107	-0.10	0.09
	102	107.22	107	0.22	0.21
	103	106.66	107	-0.34	0.32
	104	106.56	107	-0.44	0.41
	105	106.74	107	-0.26	0.25
	106	107.04	107	0.04	0.04
GNSS-2	102	105.29	107	-1.71	1.60
	103	105.59	107	-1.41	1.32
	104	105.71	107	-1.29	1.20
	105	106.08	107	-0.92	0.86
	106	106.52	107	-0.48	0.45

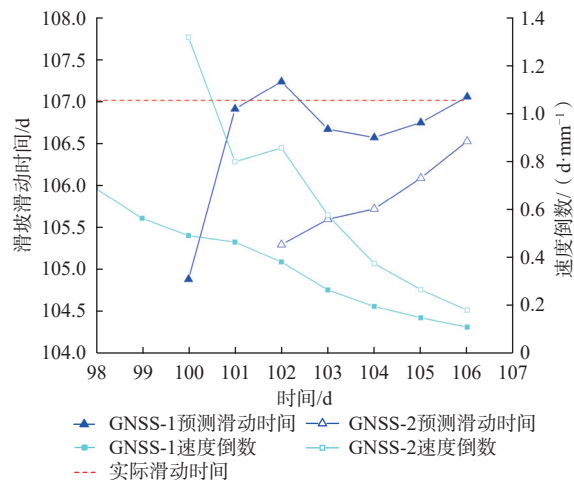


图 11 预测滑坡时间与真实滑坡时间

Fig. 11 Predicted time and real landslide time

(2)利用速度倒数模型对滑坡进行临滑预报时,需对原始数据进行处理,其中未作处理的数据和长期平均线处理的数据拟合效果较差,预测精度较低,误差率达 8% 以上;利用指数平滑函数处理的数据,拟合结果较好,误差率不超过 0.5%。

(3)预测结果显示,滑坡在进入加速变形阶段之后,随着数据的不断更新,速度倒数模型预测滑动时间将不断逼近真实滑动时间,利用指数平滑函数处理后的数据整体预测误差率不超过 2%。

参考文献 (References) :

- [1] 房浩,李媛,杨旭东,等. 2010—2015 年全国地质灾害发育分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 1-6. [FANG Hao, LI Yuan, YANG Xudong, et al. Distribution characters of geo-hazards in

- China during the period of 2010—2015[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 375—383. [LIU Chuazheng, CHEN Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375—383. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5—13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5—13. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 184—192. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 184—192. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957—966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957—966. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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 with English abstract)]
- [7] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2161—2172. [HE Manchao, REN Shulin, TAO Zhigang. Remote monitoring and forecasting system of Newton force for landslide geological hazards and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2161—2172. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 林剑, 张奇飞, 龙万学, 等. 基于预警隶属度函数多模型融合的滑坡预警方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 477—484. [LIN Jian, ZHAN Qifei, LONG Wanxue, et al. Multi-model fusion method for landslide early warning based on early warning membership function[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 477—484. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 马娟, 张鸣之, 冯振, 等. 适用于地质灾害调查的微型无人机航线控制系统设计与实现[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 37—41. [MA Juan, ZHANG Mingzhi, FENG Zhen, et al. Design and implementation of a micro-UAV route control system for geological hazard investigation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 37—41. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张鸣之, 湛兵, 赵文祎, 等. 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 54—59. [ZHANG Mingzhi, ZHAN Bing, ZHAO WenYi, et al. Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 54—59. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 何朝阳, 许强, 巨能攀, 等. 滑坡实时监测预警模型调度算法优化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 970—982. [HE Chaoyang, XU Qiang, JU Nengpan, et al. Optimization of model scheduling algorithm in real-time monitoring and early warning of landslide[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 970—982. (in Chinese with English abstract)]
- [12] SAITO M. Forecasting the time of occurrence of a slope failure[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Oxford: Pergamon Press, 1965: 537—541.
- [13] 许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2004(3): 478—483. [XU Qiang, HUANG Runqiu, LI Xiuzhen. Research progress in time forecast and prediction of landslides[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 478—483. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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(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 with English abstract)]

- [15] 董秀军, 许强, 唐川, 等. 滑坡位移-时间曲线特征的物理模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 401 – 407. [DONG Xiujun, XU Qiang, TANG Chuan, et al. Characteristics of landslide displacement-time curve by physical simulation experiment[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 401 – 407. (in Chinese with English abstract)]
- [16] FUKUZONO T. A new method for predicting the failure time of a slope [C]//Proceedings of the 4th international conference and field workshop on landslides. Tokyo: Japan Landslide Society, 1985, 145-150.
- [17] SEGALINI A, VALLETTA A, CARRI A. Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: A generalized criterion[J]. *Engineering Geology*, 2018, 245: 72 – 80.
- [18] CARLÀ T, INTRIERI E, DI TRAGLIA F, et al. Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses[J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 517 – 534.
- [19] 马海涛, 张亦海, 于正兴. 滑坡速度倒数法预测模型加速开始点识别及临滑时间预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 355 – 364. [MA Haitao, ZHANG Yihai, YU Zhengxing. Research on the identification of acceleration starting point in inverse velocity method and the prediction of sliding time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 355 – 364. (in Chinese with English abstract)]
- [20] KILBURN C R J, PETLEY D N. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: Lessons from Vajont, Northern Italy[J]. *Geomorphology*, 2003, 54(1/2): 21 – 32.
- [21] PETLEY D N. The evolution of slope failures: mechanisms of rupture propagation[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2004, 4: 147 – 152.
- [22] PETLEY D, BULMER M, MURPHY W. Patterns of movement in rotational and translational landslides[J]. *Geology*, 2002, 30: 719 – 722.
- [23] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 308 – 320.
- [24] DICK G J, EBERHARDT E, CABREJO-LIÉVANO A G, et al. Development of an early-warning time-of-failure analysis methodology for open-pit mine slopes utilizing ground-based slope stability radar monitoring data[J]. *Can Geotech J*, 2014, 52: 515 – 529.
- [25] CARLÀ T, FARINA P, INTRIERI E, et al. On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine[J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 71 – 81.
- [26] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 145 – 151. [XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 145 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 周越, 曾昭发, 唐海燕, 等. 公路勘察中滑坡体的地球物理特征与分析——以张榆线公路勘察为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 638 – 644. [ZHOU Yue, ZENG Zhaofa, TANG Haiyan, et al. Geophysical characteristics of landslide body in highway reconnaissance: A case study in highway prospecting of Zhangyu Line[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 638 – 644.]
- [28] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制——以贵州剑河县东岭信滑坡为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 503 – 516. [TANG Junfeng, TANG Xuemei, ZHOU Ji, et al. Deformation and instability mechanism of landslide accumulation: A case study of Donglingxin landslide accumulation in Jianhe County, Guizhou Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 503 – 516. (in Chinese with English abstract)]
- [29] JU N P, HUANG J, HE C Y, et al. Landslide early warning, case studies from Southwest China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105917.
- [30] 白洁, 巨能攀, 张成强, 等. 贵州兴义滑坡特征及成功预警研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1246 – 1258. [BAI Jie, JU Nengpan, ZHANG Chengqiang, et al. Characteristics and successful early warning case of Xingyi landslide in Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1246 – 1258. (in Chinese with English abstract)]
- [31] ROBERT H. Some new pre-warning criteria for creep slope failure[J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, 54(Sup1): 210 – 220.
- [32] WANG J, KIM J. Predicting stock price trend using MACD optimized by historical volatility[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: 9280590.

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真