青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价

王占巍，赵发睿，谢文苹，路 睿
（青海省地质调查局，青海 西宁 810000）

摘 要：[目的] 评价青海省高家湾滑坡稳定性，为其灾害防治提供一定指导。[方法] 在对高家湾滑坡基本特征分析基础上，先开展其形成条件研究；其次，利用传递系数法和瑞典圆弧法实现其稳定性现状评价，并进一步采用长短时记忆神经网络构建其变形预测模型，实现其稳定性预测评价。结合稳定现状评价结果，实现其稳定性的综合研究。[结果] 高家湾滑坡具有滑坡形成的基本条件，且具有复合多期巨型规模特征，对其防治应具有综合性；同时，滑坡现状处于稳定状态，但局部次级滑坡存在失稳可能，且在不利工况条件下，稳定性将会进一步减弱；另外，据变形预测研究结果，得出其平均相对误差均小于 2%，进而验证了本文优化 LSTM 模型的有效性，且通过外推预测，得出高家湾滑坡变形仍将继续增加，且无收敛迹象。[结论] 高家湾滑坡稳定性还会进一步减弱，趋于不利方向发展，应尽快采取必要措施切实保证滑坡稳定。

关键词：高家湾滑坡；形成条件；稳定性评价；长短时记忆神经网络；变形预测

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)03-0081-07 **中图分类号**：P642.22

文献参数：王占巍，赵发睿，谢文苹，等. 青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价[J]. 水土保持通报，2020，40(3)：81-87. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.012；Wang Zhanwei，Zhao Farui，Xie Wenping，et al. Formation condition analysis and stability evaluation of Gaojiawan landslide in Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(3)：81-87.

Formation Condition Analysis and Stability Evaluation of Gaojiawan Landslide in Qinghai Province

Wang Zhanwei，Zhao Farui，Xie Wenping，Lu Rui
(*Qinghai Geological Survey*，*Xi'ning*，*Qinghai* 810000，*China*)

Abstract：[Objective] The stability of the Gaojiawan landslide in Qinghai Province was evaluated to provide insights for disaster prevention and control. [Methods] Based on the analysis of the basic characteristics of the landslide，the formation conditions were studied initially. Afterwards，the stability status quo was evaluated by using the transfer coefficient method and the Swedish arc method，and the deformation prediction model was constructed using the long-term and short-term memory neural network to obtain the stability prediction evaluation. Subsequently，comprehensive research on the stability was performed by combining the stability status quo evaluation results. [Results] The Gaojiawan landslide had the basic conditions for the formation of landslides，and it had the characteristics of a multistage giant scale，and hence prevention and control should be comprehensive. Simultaneously，the present scenario of the landslide was stable，but a local secondary landslide might cause loosing stability，and that stability could be further weakened under adverse conditions. In addition，according to the deformation prediction research results，the average relative error was less than 2%. The results showed that the deformation of the Gaojiawan landslide would continue to increase，and there was no sign of convergence. [Conclusion] The stability of the Gaojiawan landslide could further weaken and tend to develop in a disadvantageous direction. Necessary measures should be taken as soon as possible to ensure stability.

Keywords：**Gaojiawan landslide；formation condition；stability evaluation；long-term and short-term memory neural network；deformation prediction**

收稿日期：2020-02-04 **修回日期**：2020-03-23
资助项目：国家自然科学基金项目“复杂环境条件下链生滑坡灾害研究”(51718054)
第一作者：王占巍(1985—)，男(土族)，青海省互助县人，本科，工程师，主要从事水工环地质工作。Email：1077943206@qq.com。

滑坡是中国常见的地质灾害之一，造成了巨大的经济损失，严重威胁区内群众的生命财产安全，对其研究已成为现在的热点课题之一，且由于滑坡研究领域的涉及范围较广，对其研究应具有侧重性。其中，滑坡形成条件分析有助于掌握滑坡成因，而稳定性评价可为其防治提供重要的参考依据，因此，针对性的开展滑坡形成条件及其稳定性评价具有重要意义[1-4]。

在滑坡形成条件研究方面，曾润强等[5]、曾宇桐等[6]分别对铁三小滑坡和报恩寺滑坡开展了形成条件研究，而李卓骏等[7]则以三峡库区典型靠椅状滑坡为基础，开展其形成条件研究，两者均取得一定成果。但上述研究多是对具体滑坡开展的形成条件研究，限于区域地质条件差异，仍有必要结合具体滑坡开展针对性研究。

在滑坡稳定性研究方面，也有学者开展了相应研究，如易庆林等[8]以点估计法为理论基础，在考虑随机变量的基础上，进行了滑坡稳定性分析；曾刚等[9]利用数值模拟软件开展了杨家沱滑坡稳定性研究；王富良等[10]利用模糊评价法实现了滑坡稳定性的定量评价。上述研究为滑坡稳定性评价提供了相应思路，但也存在一定不足，如数值模拟难以实现滑坡所处的不均匀性特征；模糊评价存在一定的主观性等，因此仍需加大滑坡稳定性的研究力度。

同时，鉴于青海高家湾滑坡的研究成果相对较少，仅孙建霖等[11]开展了高家湾滑坡的变形特征分析及演化过程研究；田中英等[12]利用物探手段开展了高家湾滑坡裂缝发育规律，且研究程度相对较低。因此，本文以高家湾滑坡为工程背景，在其形成条件分析的基础上，对其稳定性现状及发展趋势进行综合评价，以期为相关滑坡防治奠定基础。

1 基本原理

本文将研究过程划分为两阶段，第一阶段是结合高家湾滑坡所处区域地质条件及其基本特征，开展其形成条件分析；第二阶段，是先以传递系数法和瑞典圆弧法为基础，实现滑坡稳定性现状研究，再以长短时记忆神经网络(long short term memory network，LSTM)构建滑坡变形预测模型，以判断滑坡稳定性的发展趋势，进而实现滑坡稳定性的综合评价。

根据上述，该文涉及的理论方法主要是第二阶段的稳定性评价方法，将其基本原理分述如下：

1.1 稳定性现状评价模型

据高家湾滑坡的勘查结果，区内共计分布有 4 个主滑坡，标记为 H_1—H_4 滑坡，其中，H_1 滑坡有 2 个次级滑坡，即 H_{1-1} 和 H_{1-2} 滑坡；H_2 滑坡也有两个次级滑坡，即 H_{2-1} 和 H_{2-2} 滑坡；H_3 和 H_4 各含有一个次级滑坡，即 H_{3-1} 滑坡和 H_{4-1} 滑坡；同时，各滑坡的滑面形态存在一定差异，其中，H_{1-1}，H_{1-2}，H_{2-1}，H_{2-2}，H_4 及 H_{4-1} 滑坡的滑动形态为折线面；而 H_1，H_2，H_3 及 H_{3-1} 滑坡的滑面形态为圆弧面，为保证稳定性现状评价的准确度，本文提出利用传递系数法和瑞典圆弧法分别实现对应滑坡的稳定性评价，两方法的特点如下[13-14]：

(1) 传递系数法。该方法是国标方法，在滑坡稳定性评价中的适用性不言而喻，其在假定是条块间合力作用方向与上一滑面平行，适用于不同类型滑坡在任意滑面上的稳定性评价。

(2) 瑞典圆弧法。该方法适用于圆弧滑面土质滑坡的稳定性计算，可有效评价本文 4 个圆弧滑面滑坡的稳定性。

同时，在稳定性计算过程中，将其计算工况设定为 3 种，即：①工况Ⅰ：自重；②工况Ⅱ：自重＋暴雨；③工况Ⅲ：自重＋地震；根据计算结果，滑坡稳定状态的划分标准按表 1 进行。

表 1 滑坡稳定状态划分标准

稳定系数取值	<1.00	[1.00,1.05]	[1.05,1.15]	>1.15
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

1.2 稳定性预测评价模型

为实现高家湾滑坡的稳定性预测，该文利用长短时记忆神经网络构建的其变形预测模型[15-16]。长短时记忆神经网络是一种新型神经网络，相较于传统神经网络模型具有明显优势，如传统神经网络多采用单向流动输出，且易出现梯度爆炸或消失等问题，而 LSTM 模型通过新增记忆单元结构及 3 层单元门，具有了计算长距离信息的能力，有效解决了上述传统神经网络问题。但是，在 LSTM 模型的应用过程中，仍存在一定问题，如隐含层数及其节点数难以确定，对模型拟合能力具有直接影响，若其值越大，会增加网络结构的复杂度，反之，又难以满足拟合要求；学习率及窗口大小无取值标准，并直接影响训练过程。上述参数多是靠使用者经验确定，随机性较强，有必要对其进行优化处理。

为保证 LSTM 模型的参数最优性，将其优化过程分述如下：

(1) 隐含层数优化。隐含层数对模型高维可视化具有重要影响，对其优化具有较强的必要性。为保证隐含层数的最优性，该文提出对 1—4 层的隐含层数进行试算处理，选取效果最优者作为该文 LSTM 模型的隐含层数。

(2) 隐层节点数优化。隐层节点数对 LSTM 模型的网络结构复杂度具有重要影响,在传统神经网络的应用过程中,多是采用公式(1)求解隐层节点数的经验值,即:

$$y=\sqrt{m+n}+10 \tag{1}$$

式中:m,n 分别为输入层、输出层节点数,但限于 LSTM 模型的理论发展,上式的经验公式求解已难以满足精度要求,为保证预测结果的最优性,本文提出以上式求解得到的经验值为中心,对其进行适当扩展,确定其取值区间,并对区间内的隐层节点数均进行预测效果试算,以其效果最佳者作为该文 LSTM 模型的隐含节点数。

(3) 学习率及窗口大小优化。学习率与窗口大小参数对 LSTM 模型的训练过程具有较大影响,且其取值具有明显范围特征,难以采用上述试算法确定最优参数值,进而本文提出利用粒子群算法优化学习率及窗口大小参数。由于粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)的全局优化能力较强,已被广泛应用于各类模型的参数优化中,因此,利用其优化 LSTM 模型的学习率及窗口大小参数具有较强的可行性,但在传统 PSO 算法的应用过程中,采用线性递减策略来实现其惯性权值调整,难以兼顾全局与局部的优化能力,为保证局部与全局的合理优化,避免陷入局部极值,IPSO 算法应运而生,该方法采用的是非线性的动态权值调整,能有效协调全局与局部的优化能力,进而利用其实现学习率与窗口大小参数优化。

通过优化 LSTM 模型的变形预测结果可实现高家湾滑坡的稳定性预测评价,即当预测结果得出其变形仍呈增加趋势,且无收敛迹象时,说明高家湾滑坡的稳定性还会进一步减弱,趋于不利方向发展;反之,其变形预测结果得出其变形具收敛迹象时,则说明其稳定性将会维持现状。

2　实例分析

2.1　工程概况

高家湾滑坡位于青海省海东市乐都区,自 2012 年以来,出现了不同程度的变形破坏,对其前缘高家湾村 173 户 650 人及重要道路、通讯设施造成严重威胁,因此,对其研究意义重大。据现场调查成果,滑坡区地处乐都盆地中部,总体地势呈南高北低,最高高程约 2 466 m,最低高程约 1 903 m,相对高差 563 m,地形起伏较大;同时,区内河谷、斜坡、冲沟交错,地貌类型复杂多样,大致可划分为侵蚀堆积河谷平原及侵蚀剥蚀丘陵两类,其地形地貌详见图 1。



图 1　高家湾滑坡地形地貌现状

据钻孔及勘查成果,滑坡区内地层可分为古近系地层和第四系地层,两者具体特征如下:

(1) 古近系地层是区内丘陵区主体岩层,岩性为内陆沉积的砂、泥岩互层,呈棕红、暗红色,产状为 175°∠5°,具 3～20 m 的强风化层,分布厚度大于 500 m。

(2) 第四系地层以地表松散堆积层为主,主要包括冲洪积层、滑坡堆积层及风积层,结构多松散,岩性多以碎块石土及黄土为主,分布差异明显,是区内地质灾害的主要物源组成。

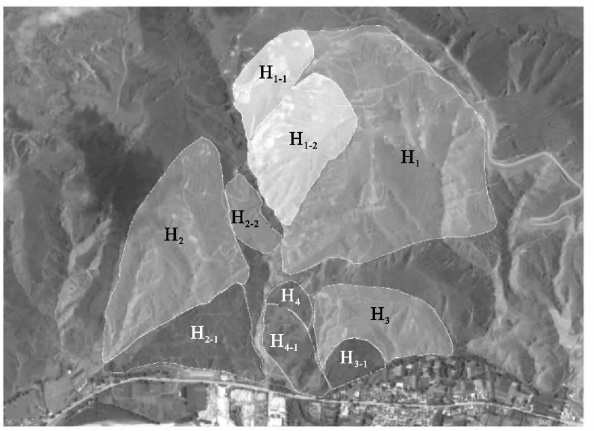
滑坡区地处青藏高原、黄土高原交接地带,其地形地貌形成与区内构造运动关系密切,其中,断裂构造尤为发育,以东西向及南北向发育为主,其中,滑坡前缘发育有一断层距山体前缘约 800 m,断层错断岩层及黄土,产状为 200°∠75°,走向 110°,长约 2 000 m,对区内滑坡形成具有重要影响。

区内水文条件发育条件较好,其中地表水主要以地表冲沟中的季节性流水为主,地下水以裂隙水及孔隙水为主,前者含水层岩性主要为泥岩,主要赋存于层间孔隙裂隙及表部风化裂隙中,后者含水层岩性为砂砾卵石层,主要赋存于第四系地层孔隙中。

2.2　基本特征分析

高家湾滑坡发育于湟水南岸Ⅱ级阶地的后缘低山丘陵斜坡区,平面呈舌形形态,纵向长度约 1 830 m,宽度约 1 300 m,平均面积约 2.4 km^2,平均厚约 110 m,滑体方量总计约 2.92×10^8 m^3;同时,高家湾滑坡可进一步细分为 10 个子滑坡,其分布特征如图 2 所示。

高家湾滑坡从坡顶发育至坡脚,按其由远及近的形成时代可划分为 3 期,即一期滑坡:H_1,H_2 滑坡,二期滑坡:有 H_3,H_4 滑坡,三期滑坡:$H_{1\text{-}1}$,$H_{1\text{-}2}$,$H_{2\text{-}1}$,$H_{2\text{-}2}$,$H_{3\text{-}1}$,$H_{4\text{-}1}$ 滑坡,均为次级滑坡。因此,得出高家湾滑坡属复合型多期巨型滑坡,开展其研究具有重要的理论价值。



注：H_1，H_2，H_3 及 H_4 滑坡属主滑坡；H_{1-1}，H_{1-2}，H_{2-1}，H_{2-2}，H_{3-1} 和 H_{4-1} 属其次级滑坡。

图 2 高家湾滑坡分布特征

2.2.1 滑坡空间形态及结构特征 根据滑坡勘查成果，对高家湾滑坡的所有子滑坡进行空间形态及结构特征参数统计，结果如表 2 所示。

在滑坡形态特征方面，各滑坡主滑方向多偏向于正北方向，厚度均较大，具中部、前缘厚，后缘薄的特点，属深层滑坡；规模也相对偏大，其中，4 个主滑坡包含 2 个巨型滑坡和 2 个特大型滑坡，而在 6 个次级滑坡中，含有 3 个特大型滑坡和 3 个大型滑坡，总体来说高家湾滑坡的规模类型较大，其危险性也相对较大，对其防治较为紧迫。

在结构特征方面，滑体土主要以粉土为主，局部滑体土含有一定的泥岩碎块，这与区内黄土分布相关；滑床则主要为泥岩，多呈微—强风化；滑带多以基覆界面为主，分布个数为 7 个，均属黄土滑坡，所占比例达 70%，其余 3 个滑坡均为泥岩滑坡。

根据上述，高家湾滑坡主要以大规模黄土泥质滑坡为主，并含有一定的泥岩滑坡，分析其成因与其地形起伏较陡、黄土分布较广及泥岩质软相关。

表 2 高家湾滑坡空间形态及结构特征参数

形成时代	编号	形态特征参数						结构特征参数			
		主滑方向/(°)	长度/m	宽度/m	平均厚度/m	规模/$\times10^4$ m^3	规模类型	滑体土	滑带土	滑床	滑坡类型
一期	H_1 滑坡	27	940	795	160	14 900	巨型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_2 滑坡	4	1 000	525	120	10 450	巨型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
二期	H_3 滑坡	32	360	560	60	2 160	特大型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_4 滑坡	55	530	240	110	1 710	特大型	粉土＋泥岩碎块	强风化泥岩层底部	微风化泥岩	泥岩滑坡
三期	H_{1-1}滑坡	68	420	330	100	1 390	特大型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_{1-2}滑坡	78	450	340	100	1 530	特大型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_{2-1}滑坡	2	460	760	80	2 800	特大型	粉土＋泥岩碎块	强风化泥岩层底部	微风化泥岩	泥岩滑坡
	H_{2-2}滑坡	304	150	480	30	220	大型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_{3-1}滑坡	7	170	245	30	330	大型	粉 土	粉土、泥岩分界带	强风化泥岩	黄土滑坡
	H_{4-1}滑坡	62	250	250	60	530	大型	粉土＋泥岩碎块	强风化泥岩层底部	微风化泥岩	泥岩滑坡

2.2.2 滑坡物质组成特征 ①滑体物质组成特征：据钻孔资料，滑体土以粉土为主，多呈土黄色—褐黄色，无光泽、摇震反应，干强度、韧性低，局部含有一定量的砾石。②滑床物质组成特征：滑床均为基岩，岩性为古近系泥岩，呈褐红色，层状构造，泥质结构。③滑带物质组成特征：H_{2-1}，H_4，H_{4-1} 滑坡的滑带位于强风化泥岩层底部，滑带埋深 25～110 m，厚度为 2～5 m，属基岩滑坡，其滑带物质成分为强风化砂质泥岩碎块混杂砾石，呈红褐色—褐黄色，含砂量较高，层理面发育，遇水易软化。其余滑坡均属黄土滑坡，滑带位于基覆界面，滑带物质成分主要为粉土，底部夹杂砾石，呈土黄色，湿～潮湿，结构松散。

2.3 滑坡形成分析

高家湾滑坡的形成条件分析有助于掌握滑坡成因及其变形机理，可为其后期防治提供理论基础，进而对其研究具有重要意义。结合工程实际，将高家湾滑坡的形成条件分述为：

(1) 地形地貌条件。滑坡区最高高程约 2 466 m，最低高程约 1 903 m，相对高差 563 m，地形起伏较大；高家湾滑坡具有古滑坡特征，原始斜坡水平投影长约 1 400 m，原始斜坡坡度约 25°，具有滑坡灾害发生的地形地貌条件。同时，滑坡前缘紧邻湟水，受河道侧向侵蚀影响，前缘形成高陡临空面，为高家湾滑坡形成提供了较好的动力条件和滑移空间。另外，由于近年滑坡复活产生了大量地表变形破坏，在其后缘、两侧等均形成了规模不一的冲沟及落水洞，利于降雨汇集入渗，进而进一步促使滑坡的产生。

(2) 地层岩性条件。高家湾滑坡的滑体物质多以黄土为主，结构疏松，吸水性较强，遇水后力学强度急剧降低，具Ⅲ级自重湿陷性，易在临空面的上缘附近形成卸荷裂隙，利于降水入渗进入软弱结构面，进

而形成贯通的滑移面;同时,下覆基岩为泥岩、砂岩夹石膏层,具较强的亲水性,遇水易软化,能形成软弱结构面,不利于滑坡的稳定性保持。

(3) 地质构造条件。高家湾滑坡区地质构造较为发育,主要以断裂构造为主,其构造现状为:①构造现状 1:在 H_1 滑坡左侧壁以西 340 m 处的盘山公路内侧,出露一处断层剖面,错断一古土壤层,以该古土壤层为标志层,上盘相对下降,下盘相对上升,地层断距为 1.5 m,是正断层证据之一;②构造现状 2。在双塔沟右岸,泥岩夹含砾砂岩地层出露一处断层剖面,该点与上一构造现状点的产状一致,推断两处断层为断层面自上而下完整贯通,长度约 28 m,地层断距为 34 cm,断层裂隙被石膏填充,断层面两侧可见古近系砂砾岩岩层弯折扭曲现象,上盘岩层沉积方向在断层面附近向下弯折,下盘岩层沉积方向在断层面附近向上弯折,判断为一处高角度逆冲断层;③构造现状 3。在红沟左岸支沟内,即 H_1 滑坡右侧前缘边界处,沟底出露断层角砾岩,断层面被石膏填充,由于该断层面受 H_1 滑坡滑动的推移作用影响,该断面出露产状非原始产状。

以上 3 点构造现状点连线的方位角为 110°,是区内构造发育的重要证据,且由于区内地质构造发育,决定了现今滑坡区的地形地貌发育,也是高家湾滑坡形成的重要条件。

(4) 水文条件。水文条件是滑坡形成的必要条件之一,也是导致古滑坡复活及变形破坏的重要影响因素,高家湾滑坡的主要水文条件如下:①地表灌溉。近年来,高家湾滑坡坡体上进行了大量的植树造林活动,引水管道遍布整个坡体,但在灌溉过程中的漏水现象较为严重。②降雨及冰雪融水。夏秋季多暴雨、大雨,且降雨时间集中,黄土暗穴、落水洞为降水的汇集和快速入渗提供了通道,降水入渗在古土壤或泥岩之上形成局部上层滞水,增大了土体容重,降低了土体的抗剪强度。③地下水的不合理排泄。据调查,区内张家庄隧道内间断性地向外抽水排水,监测数据显示水量为 28 m^3/d,其径流途径经过隧道附近泥岩地层,而隧道埋深位于 H_1 滑坡滑面以下,因此基岩风化层裂隙水入渗岩体,在泥岩顶部汇集,使滑带岩体处于饱水状态,抗剪强度降低,再加上动水压力的作用,不利于滑坡保持稳定。

(5) 人类工程活动。滑坡变形破坏与人类工程活动关系密切,区内的人类工程活动主要如下。①修路切坡。为满足生产及交通需要,在高家湾滑坡地表修建了大量公路,在局部改变原始地形地貌的同时,还产生了局部临空面,降低了滑坡整体稳定性;②铁路隧道开挖。2010 年铁路隧道掘进施工对坡体深部泥岩扰动剧烈,引起了滑体表部的变形破坏;同时,动车运行过程中产生振动,存在引发局部共振的可能,将对坡体施加较大的动荷载,不利于滑坡的稳定;③绿化灌溉。如前所述,灌溉是高家湾滑坡的重要水源条件,据调查访问,坡体上的灌溉活动始于 2016 年初,常年持续,对滑坡稳定性影响较大;④坡脚生产建设。为满足生产需要,通过开挖坡脚修建了大量建、构筑物,造成坡体下部抗滑力不断减小,不利于滑坡的稳定。

综合上述,高家湾滑坡的形成条件较为完备,具有滑坡发生的各项条件,对其防治应先加强诱发因素的弱化,如尽量减弱人类工程活动的影响等。

2.4　滑坡稳定现状评价

滑坡稳定性评价是其防治的重要基础,进而开展滑坡稳定性现状分析具有重要意义;同时,利用传递系数法和瑞典圆弧法分析高家湾各类子滑坡的稳定性,所得结果见表 3。

如表 3 所示,据滑坡稳定性现状评价,在“自重”工况条件下,4 个主滑坡均属稳定状态,而 6 个次级滑坡均属基本稳定状态,总体稳定性均较好;在“自重+地震”工况条件下,H_4 滑坡的稳定性相对最佳,属稳定状态。其余 3 个主滑坡属基本稳定状态,而 6 个次级滑坡均属欠稳定状态,相较于自重工况条件下,稳定性趋于减弱;在“自重+暴雨”工况条件下,4 个主滑坡均处于基本稳定状态,$H_{2\text{-}1}$ 滑坡属不稳定状态,其余次级滑坡属欠稳定状态,相较于前两种工况又有局部下降趋势。

表 3　高家湾滑坡稳定性现状评价结果

工况条件	H_1 滑坡	H_2 滑坡	H_3 滑坡	H_4 滑坡	$H_{1\text{-}1}$ 滑坡	$H_{1\text{-}2}$ 滑坡	$H_{2\text{-}1}$ 滑坡	$H_{2\text{-}2}$ 滑坡	$H_{3\text{-}1}$ 滑坡	$H_{4\text{-}1}$ 滑坡
工况Ⅰ	1.22*	1.23*	1.18*	1.25*	1.13**	1.13**	1.09**	1.15**	1.11**	1.11**
工况Ⅱ	1.11**	1.12**	1.07**	1.13**	1.03***	1.03***	0.98****	1.02***	1.01***	1.00***
工况Ⅲ	1.12**	1.13**	1.09**	1.16*	1.04***	1.04***	1.02***	1.03***	1.04***	1.04***

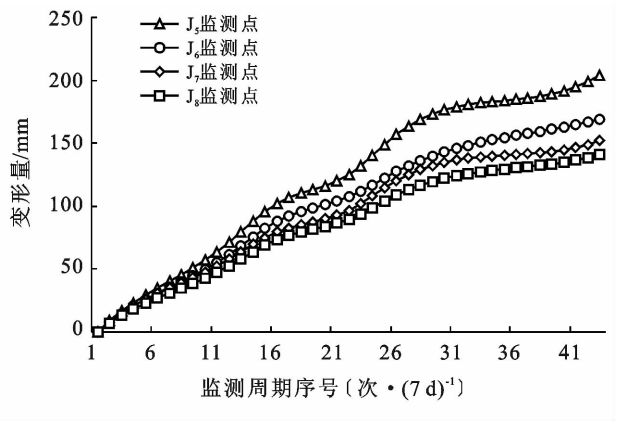
注:* 为稳定状态;* * 为基本稳定;* * * 为欠稳定状态;* * * * 为不稳定状态。

据滑坡稳定现状评价结果,得出主滑坡稳定性相对较好,次级滑坡稳定性相对较弱,且以 $H_{2\text{-}1}$ 滑坡的安全储备相对略低,因此,得出高家湾整体稳定性现状较为稳定,但局部次级滑坡存在失稳可能,且在降雨作用下,稳定性趋于减弱,需对其进行一定处防治处理。

2.5　滑坡稳定预测评价

为实时掌握滑坡变形特征,构建了高家湾滑坡变

形监测系统，监测点按“四横三纵”布置，共计布设 11 个监测点，其中，主滑面上由后缘至前缘布设 4 个监测点，编号为 J_5～J_8 监测点，且在监测过程中，监测频率为 1 次/7 d，共计得到 43 个监测周期的变形数据，其变形特征如图 3 所示。



注：每 7 d 监测 1 次为 1 个周期。

图 3 高家湾滑坡变形特征

利用 LSTM 模型构建高家湾滑坡变形预测模型，通过变形预测来实现滑坡稳定性预测评价。为验证各类优化方法的优化效果，本文先以 J_5 监测点为例，进行详述分析；同时，在预测过程中，以 1—37 周期为训练样本，38—43 周期为验证样本，44—47 周期为外推预测样本。

首先，对 LSTM 模型的隐含层数进行筛选，结果如表 4 所示。由表 4 可知，不同隐含层数的预测效果存在一定差异，在预测精度方面，随隐含层数增加，平均相对误差值呈先减小后增加的趋势，且在训练时间方面，也具有类似特征，且当隐含层数为 2 层时，具有相对最小的平均相对误差值和最短的训练时间，进而以 2 层隐层数的预测效果最优，因此，确定该文 LSTM 模型的隐含层数为 2 层。

表 4 LSTM 模型隐含层数筛选结果统计

项 目	隐含层数			
	1 层	2 层	3 层	4 层
平均相对误差/%	3.37	3.01	3.11	3.19
训练时间/ms	45.28	37.18	39.13	40.62

其次，通过经验公式确定 LSTM 模型的隐层节点数经验值为 12，进而确定隐层节点数的试算区间为 10～14，各隐层节点数的试算结果如表 5 所示。不同隐层节点数的预测效果存在一定差异，平均相对误差指标与训练时间指标的变化规律一致，即随隐层节点数增加，相应评价指标均呈先减小后增加的趋势，且两者均在 13 个隐层节点数时的评价指标值相对最小，进而确定该文 LSTM 模型的隐层节点数为 13 个。

表 5 LSTM 模型隐层节点数筛选结果统计

项 目	隐层节点数				
	10 个	11 个	12 个	13 个	14 个
平均相对误差/%	3.26	3.15	3.12	3.01	3.2
训练时间/ms	40.07	38.47	38.25	37.18	39.26

最后，再利用 IPSO 算法对 LSTM 模型的学习率及窗口大小参数进行优化处理，且为对比 IPSO 算法对 PSO 算法的优越性，对两种算法均进行预测结果的对比分析，结果统计如表 6 所示。在相应验证样本节点处，对比 PSO 算法和 IPSO 算法的优化结果可知，后者具有相对更小的误差值，且 IPSO-LSTM 模型的最大、最小相对误差分别为 2.15%和 1.83%，平均相对误差为 1.93%，训练时间为 23.29 ms，相较于表 5 中的预测效果，预测精度也略有提高，说明 IPSO-LSTM 模型具有较高预测精度，且 IPSO 算法能有效优化学习率及窗口大小参数；同时，J_5 监测点的外推预测结果得出其变形仍将进一步增加，并无收敛趋势。

为进一步验证该文优化 LSTM 模型的有效性及实现高家湾滑坡稳定性预测的综合评价，再对 J_6—J_8 监测进行变形预测研究，结果如表 7 所示。由表 7 可知，3 个监测点预测结果的平均相对误差间于 1.76%～1.85%之间，训练时间间于 22.17～26.38 ms 之间，预测效果相当，且与 J_5 监测点的预测效果一致，进而验证了该文优化 LSTM 模型在滑坡变形预测中的有效性；同时，3 个监测点的外推预测也得出其变形值仍将继续增加，无收敛趋势。

表 6 J_5 监测点最终优化预测结果

监测周期序号	变形值/mm	PSO-LSTM 模型		IPSO-LSTM 模型	
		预测值/mm	相对误差/%	预测值/mm	相对误差/%
38	187.13	183.05	2.18	183.37	2.01
39	188.93	185.08	2.04	185.40	1.87
40	191.37	186.79	2.39	187.67	1.93
41	194.58	190.42	2.14	190.40	2.15
42	198.74	194.19	2.29	195.18	1.79
43	204.00	198.47	2.71	200.27	1.83
44				204.18	
45				208.57	
46				212.19	
47				216.44	
平均相对误差/%			2.29		1.93
训练时间/ms			28.46		23.29

注：每 7 d 监测 1 次为 1 个周期。下同。

表 7　优化 LSTM 模型的有效性预测结果

监测周期序号	J_6 监测点			J_7 监测点			J_8 监测点		
	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/%	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/%	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/%
38	159.55	156.94	1.64	142.25	139.57	1.88	132.50	130.26	1.69
39	161.20	157.88	2.06	143.25	140.28	2.07	133.66	131.33	1.74
40	162.92	160.10	1.73	144.61	142.24	1.64	135.01	132.08	2.17
41	164.76	161.61	1.91	146.46	144.11	1.60	136.63	133.95	1.96
42	166.76	163.96	1.68	148.88	145.74	2.11	138.58	136.27	1.67
43	168.98	166.41	1.52	152.00	149.52	1.63	140.94	138.33	1.85
44		169.58			153.14			140.28	
45		173.14			157.33			143.19	
46		177.38			160.96			147.32	
47		180.92			164.26			150.84	
平均相对误差/%			1.76			1.82			1.85
训练时间/ms			25.71			26.38			22.17

根据上述变形预测结果,得出高家湾滑坡的变形仍将继续增加,且无收敛迹象,说明其稳定性还会进一步减弱,趋于不利方向发展。

3　结 论

通过高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价研究,得出如下主要结论:

(1) 高家湾滑坡具有滑坡形成的基本条件,且较为完备,加之其具有复合多期巨型规模特征,对其前缘高家湾村 173 户 650 人及重要道路、通讯设施造成严重威胁,应加强对其进行防治。

(2) 通过稳定性现状研究,得出高家湾整体现状较为稳定,但局部次级滑坡存在失稳可能,且在降雨作用下,稳定性趋于减弱,多处于基本稳定—欠稳定状态。

(3) 通过稳定性预测研究,得出本文预测结果的平均相对误差多小于 2%,具有较高的预测精度,且滑坡变形仍将继续增加,无收敛迹象,说明其稳定性还会进一步减弱,趋于不利方向发展,需对其采取必要措施,以便切实有效的保护区内居民的生命财产安全。

[参 考 文 献]

[1] 王念秦,郭有金,刘铁铭,等. 基于支持向量机模型的滑坡危险性评价[J]. 科学技术与工程,2019,19(35):70-78.

[2] 姜程,霍艾迪,朱兴华,等. 黄土水力侵蚀—滑坡—泥流灾害链的研究现状[J]. 自然灾害学报,2019,28(1):38-43.

[3] 郑凯航,朱月琴,张和生,等. 我国地质灾害图研究现状及趋势分析[J]. 中国矿业,2016,25(S2):234-239.

[4] 亓星,许强,孙亮,等. 降雨型黄土滑坡预警研究现状综述[J]. 地质科技情报,2014,33(6):219-225.

[5] 曾润强,王思源,曾宇桐,等. 兰州市皋兰山铁三小滑坡形成条件及其稳定性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2015,51(3):339-343,350.

[6] 曾宇桐,陈冠,李松,等. 兰州市凤凰山报恩寺滑坡形成条件及稳定性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2015,51(6):797-802.

[7] 李卓骏,邓茂林,周剑,等. 靠椅状土质滑坡形成条件及时空演化特征[J]. 水土保持通报,2019,39(3):65-69.

[8] 易庆林,周瑞,许倩,等. 基于点估计理论滑坡稳定性及可靠度分析[J]. 水力发电,2019,45(12):25-30.

[9] 曾刚,王世梅,郑俊,等. 三峡库区杨家沱滑坡稳定性分析及复活判据研究[J]. 人民长江,2019,50(11):130-133.

[10] 王富良,李宗发. 基于模糊综合评价法对滑坡稳定性的分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):1016-1024.

[11] 孙建霖,马金辉,董高峰,等. 青海高家湾地区地表变形特征分析与潜在滑坡识别[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(12):99-103.

[12] 田中英,张茂省,毋远召. 综合物探在高家湾滑坡群前缘裂缝探查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(6):822-828.

[13] 许泽坤,苏爱军. 条分法中分条数对滑坡稳定性计算结果的影响[J]. 安全与环境工程,2019,26(1):133-140.

[14] 管琪,易武,崔周通,等. 基于多种评价方法的昭君村次级滑坡稳定性评价[J]. 水电能源科学,2018,36(12):125-128.

[15] 孙一清,李德营,殷坤龙,等. 三峡库区堆积层滑坡间歇性活动预测:以白水河滑坡为例[J]. 地质科技情报,2019,38(5):195-203.

[16] 冯非凡,武雪玲,牛瑞卿,等. 一种 V/S 和 LSTM 结合的滑坡变形分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(5):784-790.