

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

冷湖赛什腾山天文台工程地质选址评价

周 保,孙 皓,魏赛拉加,张 睿,张俊才,王 栋,严慧,隋 嘉 Site selection evaluation of engineering geology of the Lenghu Saishiteng Mountain Observatory

ZHOU Bao, SUN Hao, WEI Sailajia , ZHANG Rui, ZHANG Juncai, WANG Dong, YAN Huijun, and SUI Jia

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104075

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

陈德茂, 沈志平, 姜鹏, 付君宜, 刘慧 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 116-123

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan–Tibet Railway 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112–119

从核心期刊评价指标分析如何提升期刊影响力——以《水文地质工程地质》为例

An analysis on the evaluation indexes of core journal and its improving effect on journal influence: a case study of Hydrogeology & Engineering Geology

汪美华, 范宏喜, 张若琳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 169-169

珠江口地区岩土层工程地质特征及物理力学性质研究

A study of the engineering geological characteristics and physico-mechanical property of rock and soil layers in the Pearl River mouth area

么玉鹏,姚坚毅,唐世雄 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 64-70

川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策

Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway 铁永波, 徐伟, 梁京涛, 蒙明辉, 李富, 赵聪 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 129-136

郑州地下水均衡试验场的改建工程——试验介质的选择与试验土柱建造

Reconstruction project of groundwater balance experiment site of Zhengzhou: selection of test media and construction of test soil columns 宋高举, 王帅, 李俊亭, 黄继超, 张公, 王继华, 王琳 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 19-25



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104075

周保,孙皓,魏赛拉加,等. 冷湖赛什腾山天文台工程地质选址评价 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 165-174. ZHOU Bao, SUN Hao, WEI Sailajia, *et al.* Site selection evaluation of engineering geology of the Lenghu Saishiteng Mountain Observatory[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 165-174.

冷湖赛什腾山天文台工程地质选址评价

周 保¹,孙 皓¹,魏赛拉加¹,张 寄¹,张俊才¹,王 栋²,严慧珺¹,隋 嘉¹ (1. 青海省地质环境监测总站,青海 西宁 810000;2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈 科学国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 青海省冷湖赛什腾山具有国际一流的光学天文观测条件,是我国光学天文发展的宝贵战略资源。围绕冷湖赛什腾 山天文台建设面临的工程地质选址问题,在收集前人已开展的地质调查成果的基础上,利用遥感影像、无人机航拍、数值 模拟和人工地面调查相结合的方法进行工程地质选址评价。为了确保赛什腾山已经确定的2处已建平台和2处空置平台 的工程地质稳定性,首先进行了人工地面踏勘、采取岩石样品和模拟地震作用下已建平台的边坡三维响应研究,以确定平 台的稳定性;在重点工作区使用 InSAR 监测分析地形形变,确定重点工作区工程地质稳定性;最后使用 BP 神经网络模型算 法对赛什腾山地区进行区域工程地质稳定性评价。评价结果表明:2处已建平台虽有断层分布但对工程建设的影响较小; 2处空置平台场地内及周边未发现断层破碎带及断裂构造通过。基于分析结果,建议尽量减少在填方区布设工程及重要设 备,保证填方边坡坡度小于自然休止角,对于人工开挖或填筑形成的碎石土边坡应进行适当工程处理以确保工程安全及设 备正常使用,并基于不同层次的评价结果推荐出4300m与4050m2个平台。

关键词:工程地质条件;区域稳定性;天文台选址;智能算法;赛什腾山

中图分类号: P112 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2022)04-0165-10

Site selection evaluation of engineering geology of the Lenghu Saishiteng Mountain Observatory

ZHOU Bao¹, SUN Hao¹, WEI Sailajia¹, ZHANG Rui¹, ZHANG Juncai¹, WANG Dong², YAN Huijun¹, SUI Jia¹

(1. Qinghai Institute of Geological Environment Monitoring, Xining, Qinghai 810000, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The Lenghu Saishiteng Mountain in Qinghai Province has the international first-class optical astronomy observation conditions. It creates a major opportunity for the development of optical astronomy in China and provides a valuable strategic resource for international optical astronomy development. Closely focusing on the engineering and geological site selection problem facing the construction of the Lenghu Saishiteng Mountain Observatory, the engineering and geological site selection evaluation is carried out on the basis of extensive collection of the geological survey results obtained by previous authors, by using a combination of remote sensing

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-11-23 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 青海省重大科技专项(2019-ZJ-A10); 青海省地质环境信息化综合平台资质项目(2021-ZJ-T08)

第一作者:周保(1982-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事工程地质、地质灾害等研究。E-mail:zhb820322@163.com

images, unmanned aerial photography, numerical simulation and manual ground survey. At this stage, two constructed platforms and two vacant platforms have been identified in Mount Saishiteng. In order to ensure the stability of engineering geological conditions of the constructed platforms and vacant platforms, firstly, manual ground investigation, rock samples and 3D response of slopes of constructed platforms under simulated seismic effects are conducted to determine the stability of platforms. InSAR monitoring and analysis of terrain deformation is then used in the key working area to determine the engineering geological stability of the key working area, and the BP neural network model algorithm is finally used to evaluate the regional engineering and geological stability of the Saishiteng Mountain area. The evaluation results show that although there are faults in the two constructed platforms, the impact on the construction is relatively small; no fault fragmentation zones and fracture structures are found in and around the two vacant platforms. Suggestions are made for the construction of the observatory to minimize the placement of engineering works and important equipment in the filling area, to ensure that the slope of the filling side slope is less than the natural rest angle, and to carry out appropriate engineering treatment for the rubble soil side slopes formed by manual excavation or filling ensure engineering safety and normal use of equipment. At the same time, two recommended platforms of 4 300 m and 4 050 m are recommended based on the evaluation results of different levels.

Keywords: engineering geological conditions; regional stability; observatory site selection; intelligent algorithm; Saishiteng mountain

天文台选址决定了观测的质量,国际公认能达到 下一代望远镜建造和运行要求的优良天文观测台址 都在西半球,如智利北部山区^[1]、美国夏威夷莫纳卡 亚峰和南极内陆冰穹地区^[2]。自1996年起中国科学 院开展天文台台址调研,提出了优质台址普查、定点 勘测的工作建议^[3-4]。20世纪初,我国相继建设了紫 金山天文台、兴隆观测基地、贵州 FAST 射电望远镜 等,一大批重要的天文设备陆续投入使用且获得了大 量科研成果^[5-8]。为了打破我国光学天文观测发展的 瓶颈,选址团队克服重重困难,在我国青海省海西州 冷湖地区也找到了与西半球具有同等优良观测条件 的地区^[9]。冷湖天文台填补了东半球光学观测的缺 失,可以形成一个 24 h 的监测网络。冷湖新台址的发 现,不仅为我国光学天文发展创造了重大机遇,也是 国际光学天文发展的宝贵资源^[10]。

为了确保天文观测设备良好平稳运行,必须进行 不同层次的工程场址评价。工程场址评价在我国经 历了定性到定量、单因素到多因素的发展过程^[11-12]。 地质基础理论、软弱结构面控制理论、岩体结构动态 控制观、安全岛理论^[13]等都在工程选址及场址评价 中得到广泛应用^[14-17]。本研究通过智能算法确定区 域工程地质条件稳定性,通过InSAR监测重点工作区 的地形形变,模拟地震作用下的边坡三维响应,结合 人工地面调查评价平台稳定性并推荐优势平台。

1 研究区工程地质背景

1.1 地质环境特征

赛什腾山是祁连山系支脉,位于柴达木盆地北部 内侧、冷湖镇东部,隔苏干湖与安南坝山湖相望;南为 德宗马海湖沉积平原,西部在丁字口附近倾没,东部 在嗷唠河与马海大阪分界。山峰高且陡峭,主峰海拔 4576 m。赛什腾山年均气温3℃,终年寒冷多风,年 均降水仅42 mm,晴夜数多,视宁度高,十分适合天文 台项目建设。

新生代印度洋板块与欧亚大陆的碰撞与随后的 持续会聚改变了高原内部及周边的岩石圈构造和应 力展布,导致了青藏高原的大规模隆升,昆仑山、阿尔 金山、祁连山进一步隆褶上升,在柴达木盆地北缘出 现了一系列的相互分割的中生代断陷盆地,而赛什腾 凹陷正是此时期形成的^[18]。赛什腾山地层出露较全, 时代跨度大,古元古代至新生代地层均有不同程度的 分布^[19]。研究区南侧有区域性断裂——柴北缘断裂 带,距离重点工作区约 10 km(图 1)。

1.2 重点工作区地层岩性特征

重点工作区位于研究区中部,面积约14.5 km²,为 本次主要研究地质体,区域内以中粗粒二长花岗岩为 主、达肯大坂岩群片麻岩和晚奧陶世辉长岩次之,局 部被第四纪岩体覆盖。经实测地质剖面调查,主要发 育3组节理,其中东南向节理为主节理,另发育北东



图 1 研究区自然地质环境 Fig. 1 Natural geological environment of the study area

向和北西向的2组节理。中粗粒二长花岗岩为灰红 色,块状构造;主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母 组成。副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石。次生矿物主 要为绢云母、高岭土、绿泥石及不透明矿物。

1.3 工程概况

现阶段重点工作区内共建有 2 处场地平台,分别 为高程 3 830 m、总面积 5 861.5 m² 的 MASTA 望远镜 阵列平台和高程 4 200 m、总面积 7 465.9 m² 的 WFST 望远镜平台,称为已建平台,均由削方平整山脊形成; 2 处空置望远镜平台高程为 4 100 m和 4 000 m,称为空 置平台,目前正在进行道路建设,还未进行平台施 工。同时基于不同层次的工程场址评价结果推荐出 高程为 4 300 m 与 4 050 m 的 2 处适宜工程布设的平 台,称为推荐平台(图 2)。

2 选址评价方法

为了确保已建平台和空置平台的稳定性,进行了 平台、重点工作区和区域3个层次的工程地质条件稳 定性分析。首先进行人工地面踏勘,获取平台附近地质 剖面,分析断层节理、构造分布状况,采取岩石样品, 用 FLAC^{3D}模拟地震作用下已建平台的边坡三维响应 确定平台稳定性;随后在重点工作区使用 InSAR 监测 分析地形形变,确定重点工作区工程地质稳定性;最 后使用智能算法对赛什腾山地区进行区域工程地质 稳定性评级,(8,10]分为适宜、(6,8]分为较适宜、(4,6]



图 2 重点工作区 Fig. 2 Key working areas

分为中等、(2,4]分为较不适宜、(0,2]分为不适宜,按 得分确定地理及区域地质环境条件的适宜性。

- 2.1 工程地质稳定性评价方法
- 2.1.1 评价因子选择与处理过程

前人研究中^[20-23]选择过地质构造、岩土体强度、 工程地质类型、风化程度、不良地质灾害、基础自然 环境、土地覆被、地形坡度、道路分布密度、等级公路 距离、水域分布密度等评价因子。综合前人研究和实 地情况对评价因子进行了优选,共选取9个评价因 子,涉及自然地理条件和地质条件2个方面:自然地 理环境方面包括高程、地表高差、坡度、多年平均降水量;地质环境方面包括动峰值、地震活动核密度、 岩土体强度、断层稳定性,把节理发育状况和坡向 2个参数组合成节理稳定性。为了使分类获得较好的 效果,对评价因子的影响方式进行矢量统一,将正指 标和逆指标按照式(1)(2)进行处理。

对于正指标:

$$y_{ij} = \frac{1}{e - 1} \left[\exp\left(\frac{x_{ij} - \inf(m)}{\sup(m) - \inf(m)}\right) - 1 \right]$$
(1)

对于逆指标:

$$y_{ij} = \frac{1}{e-1} \left[\exp\left(\frac{\sup(m) - x_{ij}}{\sup(m) - \inf(m)}\right) - 1 \right]$$
(2)

式中:e——自然对数的底数;

 x_{ij} — 第 i 个区划单元的第 j 个指标实际值;

 y_{ij} — 评价指标规范化值;

 sup (m) — 评价指标危险等级取值的上确界;

inf(m)——评价指标危险等级取值的下确界。

高程数据分辨率为 12.5 m, 下载自 NASA(https:// earthdata.nasa.gov/)ALOS 12.5 m DEM 数据集。坡度和 坡向数据由海拔高度计算得出, 分辨率同样为 12.5 m。 地表高差数据同样提取自 DEM 数据集。降水数据下 载自资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)。 动峰值加速度矢量化自《中国地震动峰值加速度区划 图》青海部分。矢量化后使用 FLAC^{3D} 对动峰值放大 效应进行模拟, 通过放大效应的模拟结果结合海拔获 得动峰值评价因子。通过研究区周边历史地震数据 的震级计算地震核密度评价因子。

通过实地调查,将该地区的断层分为4个等级^[24]: 1级为柴北缘断裂带,2级为研究区主导断裂构造, 3级为研究区次级断裂构造且断裂长度大于2000m, 4级为研究区次级断裂构造且断裂长度小于2000m, 使用缓冲区分析分别进行赋值,赋值距离与赋值结果 见表1,然后将赋值结果进行叠加求和得出研究区断 层稳定性,赋值结果越高表示断层稳定性越差,越不 适合工程建设。

表 1 断层赋值表 Table 1 Fault assignment table

	-		-							
断层等级	缓冲区1		缓冲区2		缓冲区3		缓冲区4		缓冲区5	
	距离/m	赋值	距离/m	赋值	距离/m	赋值	距离/m	赋值	距离/m	赋值
1级断层	1 000	20	2000	16	3 000	12	4 000	8	5 000	4
2级断层	300	15	600	12	900	9	1 200	6	1 500	3
3级断层	100	10	200	8	300	6	400	4	500	2
4级断层	30	5	60	4	90	3	120	2	150	1

岩土体强度数据来自青海省工程地质图。辅以 青海省大柴旦行委苏干湖南地区1:5万地质矿产图 对岩土体强度进行了细化,然后根据不同岩性强度进 行赋值,如表2所示。

表 2 岩体、土体强度状况赋值表 Table 2 Assignment of rock mass and soil condition

岩体、土体	赋值结果
晚二叠世坚硬块状侵入岩岩组	10
晚奥陶世坚硬块状侵入岩岩组	9
坚硬、较坚硬的片状熔岩岩组	8
早古生代火山岩岩组	7
较坚硬片状砾、砂、板、千枚岩岩组	6
软硬相间层-薄层状变质砾、砂岩及页岩岩组;软硬相	
间层-薄层状变质岩或碎屑岩夹碳酸盐岩岩组;软硬	5
相间层-薄层状碳酸盐岩与变质岩或碎屑岩岩组	
晚奥陶世石英闪长花岗岩	4
软弱层状-薄层状砂泥岩岩组	3
软弱层状砂、泥(灰)岩岩组	2
黏性土、盐渍土、砂类土、卵砾类土	1
苏干湖	0

节理、劈理、千枚理发育状况同样矢量化自青海省大柴旦行委苏干湖南地区1:5万地质矿产图。 共提取351个节理发育数据,通过克里金插值法将 其插值到整个研究区,同时在插值过程中以岩性作 为障碍数据。使用坡向减去节理、劈理、千枚理发 育状况,然后将其结果求绝对值,接着将大于180°的 数据乘以-1加360°,得到节理、劈理、千枚理发育稳 定状况(图3)。通过上述方式可以得到节理、劈理、 千枚理与坡向的绝对差值,差值越大工程地质条件 越稳定。

2.1.2 训练样本获取与智能算法

本研究提出优选区结合 K-mean 非监督分类来确 定 BP 神经网络模型的训练样本。优选区是通过考量 天文台实际建设情况和数据分析难度,选取关键评价 参数作为限制条件,从研究区筛选出一个或几个潜在 重点工作区,进行天文台台址评价与筛选工作。



图 5 **卫**理稳定性 Fig. 3 Joint stability

通过 BP 神经网络模型获得所有评价因子的重要 性评价指标 Gini 系数,筛选出高程、高差、断层结构 和岩土体强度 4 个关键参数。海拔越高空气越稀薄, 大气中杂质越少,对观测一些暗星更有利,所以选择 了海拔 3 800 m 以上的区域;地表高差过大会导致施 工难度巨大及建筑失稳,所以选择 15 m 以下的区域作 为判断依据;根据活断层区建筑原则及防治对策,建 筑物场址一般应避开活动断裂带;必须在活断层地区 兴建的建筑物,应尽可能地选择相对稳定地块即"安 全岛",尽量将重大建筑物布置在断层的下盘;岩土 体强度会直接影响工程能否实施与实施后的适宜性, 需选择岩土体强度赋值在 6 分较坚硬及其以上的区 域。最后筛选出 4 块区域分别以 A、B、C、D 命名 (图 4)。4 个区域中岩性强度从大到小的排序依次为 A 大于 C, D 大于 B。



图 4 优选区 Fig. 4 Preferred areas

K-mean 是一种无监督学习,简单地说就是把相似的对象归到同一簇中,簇内的对象越相似,聚类的效果越好^[25]。首先在优选区内创建随机点1000个,抽取所有随机点上的评价因子,然后使用 K-mean 进行分类,统计4个优选区内的分类结果。如果优选区内的分类结果排序符合岩土体强度的顺序,则保留这次分类结果作为训练样本,否则重新进行 K-mean 分类,设定运行10万次。

BP 算法的基本思想是数据经过网络传播后得到输 出结果,如果实际输出与期望输出不相符,则将输出误 差以某种形式通过隐藏层向输入层逐层反向传播,并 将误差分配到各层的所有单元,从而得到所有单元的 误差信号,并以此误差信号来修正连接权值^[26-27]。BP 神经网络模型的训练过程如下: step1 网络初始化, 给各 连接权值分别赋一个区间 (-1,1) 内的随机数,设定误差 函数 e, 给定计算精度值 ε 和最大学习次数 M, 在本研 究中设定的 ε 为 10⁻³, M 为 1 万次。step2 随机选取, 随 机选取第 k 个输入样本以及对应的期望输出。step3 计 算隐含层各神经元的输入和输出。step4 利用网络期望 输出和实际输出,计算误差函数对输出层的各神经元 的偏导数。step5利用隐含层到输出层的连接权值、输 出层和隐含层的输出计算误差函数对隐含层各神经元 的偏导数。step6利用输出层各神经元的偏导数和隐含 层各神经元的输出来修正连接权值。step7利用隐含层 各神经元的偏导数和输入层各神经元的输入修正连接 权值。step8 计算全局误差 e。step9 判断网络误差是否 满足要求。当误差达到预设精度或学习次数大于设定 的最大次数,则结束算法。否则,选取下一个学习样本 及对应的期望输出,返回到 step3 进入下一轮学习。简 单而言使用训练样本通过黑箱算法模拟结果、训练网 络,通过计算精度和误差对网络进行评价反向传播误 差,最终使用训练好的网络进行模拟^[28]。

2.2 人工地面详查内容

围绕已建平台、空置平台和推荐平台进行岩土体 样品采集和地质剖面调查。人工地面详查包括以下 内容:1:2000地质灾害和地质环境条件调查7km², 地质剖面5条共8.5km,地质灾害调查点3处,地质环 境调查点47处,断层节理调查点20处,岩土体样品 21件并进行抗剪、抗压试验。

3 评价结果与分析

3.1 区域工程地质稳定性评价结果 由区域工程地质稳定性评价结果可以看出,6分 以上较适宜的地区主要集中在"优选区"附近且6分以 上的区域仅占到全区 3.3%。

A 区域为二叠纪犬牙沟组岩浆岩坚硬块状侵入岩 岩组,硬度与稳定性最高,面积为18.3 km²,岩体坚硬 施工条件好。B 区域为寒武纪碎屑岩组变质岩较坚硬 层、砾、砂、板、千枚岩组,硬度与稳定性最差,6分以 上评级区域面积最小,面积为8.3 km²,广布灰绿色玄 武安山岩、大理岩、硅质岩。C 区域为晚奥陶世岩体, 6分以上评级面积与 B 区域相似,主要为二长花岗 岩、花岗闪长岩、石英花岗闪长岩和辉长岩。D 区域 6分以上区域面积较大但地形狭长,同样位于奥陶纪 岩体。C 区域和D 区域岩土体硬度与稳定性相同,面 积分别为 3.8 km² 和 15.5 km²(图 5)。



图 5 区域工程地质稳定性评价 Fig. 5 Evaluation of the regional engineering geological stability

根据 BP 神经网络模型的平台适宜性评价结果 (表3)可以看出 2 个已建场地中,适宜性评分较高的是 4 200 m 平台,根据研究区适宜性评价结果推荐了 2 个 平台(4 300 m 平台和 4 050 m 平台)。6 个平台的工程 建设适宜性均在较适宜范围之上。

对比A、B、C、D四区,A区域有B、C、D无法比 拟的优势。A区域开口方向面向西南方向,临近公 路,便于人工和建筑机械车辆进入,施工十分方便。 B、C、D区域都被断层包围且开口方向多面向北方,

表 3 半台上程道道	11生1半177						
Table 3 Platform engineering suitability evaluation							
平台类别	评价得分						
已建平台(3 830 m平台)	6.579 42						
已建平台(4200m平台)	7.326 86						
空置平台(4100m平台)	7.211 52						
空置平台(4000m平台)	7.412 47						
推荐平台(4300m平台)	7.622 98						
推荐平台(4050m平台)	7,132,46						

施工不便;而且 B、C 区域没有评分 7 分以上的区域。 D 区域虽然存在较为集中连片的 7 分以上评级区域, 但附近存在金矿,地磁异常较为严重^[29-30],对天文台 存在信号干扰。所以在 A 区域内划定重点工作区。 3.2 重点工作区工程地质稳定性评价结果

重点工作区采用 Sentinel-1A 数据进行稳定性评价,工作模式为 IW,极化方式为 VH,数据产品为 SLC,地面分辨率为 5~20 m,共采用了 2018 年 2 月-2020 年 10 月的 38 期数据。SBAS-InSAR 是通过给时间基线和空间基线大小设定合理的阈值,将覆盖同一地区的影像分成若干个集合。通过这种方式获得的时间基线和空间基线都是小基线集,最后利用最小二乘法或者奇异值分解法将多个小基线集联合起来求解。最后通过时间序列干涉对(图 6)来反演地表形变。



2018年2月-2020年10月重点工作区内部分区 域发生了较为明显的沉降现象,沉降区呈斑块状分布 于重点工作区中部及北部地区,整体沉降量均较小, 最大沉降量仅15mm,最大年均形变速率为7.18mm/a。 发生沉降的区域在工作区内整体呈线型展布,结合高 分2号遥感影像分析可知,沉降区与山脊走势较为吻 合。将道路与地表形变图进行叠加(图7),可见沉降 区域的分布与重点工作区内所修建的山区道路高度 一致,说明重点工作区沉降的发生与山区道路的修建 有较为密切的关系。由于山区道路的修建,坡体松散 堆积体增加,并破坏了山体原有的结构,致使该区域 风化剥蚀作用加剧,在雨水冲刷作用下坡体物质向下 运移速度增加。



Fig. 7 Map showing the surface cumulative deformation

InSAR 数据处理结果必须与光学影像相结合,为 保证结果的合理性,本项目中 InSAR 处理结果与工作 区内人类工程活动在时间及空间上都能高度吻合,并 且工作过程中使用的数据期数、DEM 精度等其他要 素都达到了精度要求。因此本次 InSAR 处理结果是 可信的,可做参考。

3.3 地震作用下已建平台边坡三维动力响应

4 200 m平台所用数值模型确定为边长 300 m 的正方形区域,竖直范围从地表(最高处高程约4 200 m) 延伸至基岩内一定深度(模型底面高程约4 090 m),单 元边长为5 m。3 830 m平台所用数值模型同样为边 长为 300 m的正方形区域(图 8),竖直范围从地表(最 高处高程约3 830 m)延伸至基岩内一定深度(模型底 面高程约3 670 m)。

数值模拟初始静力边界条件:模型前后、左右侧 面施加水平方向的约束,即其边界节点水平位移为 0。模型底部施加固定约束,即底部边界节点垂直和 水平位移也均为0。初始地应力参考实测数据和部分 修正后的理论数据。

数值模拟动力边界条件:模型边界采用 FLAC^{3D} 内置的黏滞边界和自由场边界。自由场边界为自动 生成的一维网格,参数特性继承了主网格边界的网格



和参数。自由场边界与主网格边界之间用若干黏滞 阻尼器连接,黏滞阻尼器的水平和竖直分量之间各自 独立存在。以上2种人工边界使得地震波在边界不 会产生反射效应,使得波动在截断位置满足原连续介 质中的辐射现象^[31]。

earthquake action

在 FLAC^{3D} 中选取应力符合屈服准则的区域(或称塑性区)观察潜在破坏区域的范围。塑性区标识以不同的颜色显示两种类型的破坏机制:剪切破坏(shear failure)和拉伸破坏(tensile failure)。在上述模型中,当动力计算时间为 60 s,山梁表层均未出现塑性区破坏,说明在该区域进行天文台建设较为适宜。

4200m平台和3830m平台坡顶在地震作用时均 产生显著的动力放大效应,放大系数约为基底的7~ 11倍。其中水平向(EW向)的放大系数为8.5~11.2 倍,垂向放大系数7.2~7.8倍,垂向放大系数小于水平 向放大系数。因此,需注意天文台斜坡顶部的地震波 场地放大作用影响,该放大系数在目前参数条件下可 达到基底输入地震波加速度的7~11倍,如此大的场 地放大效应易对坡顶上部结构产生影响。

3.4 评价优势及监测建议

使用 K-mean 非监督分类结合 BP 神经网络模型 的工程场址稳定性评价的优势主要体现在使用机器 学习算法可以避免人为因素对评价因子进行权重赋 值带来的评价结果误差。人工赋值具有较强的主观 性,评价结果直接取决于评价因子的准确性和评价因 子权重设定人员的专业技术水平。机器学习算法通 过大量的运算,不断试错学习,提高评价精度,其评价 结果较为真实可靠。在今后的工作中可以通过改进 算法模型和改进评价因子两个方面来提升稳定性评 价结果的精度。改进评价因子体现在两个方面:一是 修改评价因子的种类,二是通过提高评价因子的精度 来提高估算精度。

最后提出监测建议:(1)为确保工程安全及设备

正常使用,尽量减少在填方区布设工程及重要设备; (2)在填方边坡要依据岩土工程地质条件,保证边坡 坡度小于自然休止角,人工开挖或填筑形成的碎石土 边坡要做适当工程处理。

4 平台工程地质稳定性评价结果

3830 mMASTA 平台在望远镜阵列北侧有一处断 层出露。断层产状 235°∠10°, 与赛什腾山望北沟断裂 走向基本一致, 判断为望北沟断裂的次级断裂, 断层 受到 255°一75°方向的应力挤压形成, 断层破碎带宽 50~150 cm, 断层带内岩性为断层泥和花岗碎裂岩, 根据断层产状和擦痕, 野外判断该断层为逆断层。 MASTA 望远镜阵列位于断层上盘, 在平台西南侧追 溯该断层时未发现其他露头, 该断层产状较缓, 断层 两层岩体未发现明显位移, 现今较稳定, 因此该断层 对平台稳定性影响较小。研究组对平台附近不稳定 斜坡可能发生的变形破坏方式、滑坡变形量、活动频 率等进行了详细的分析, 同时根据不稳定斜坡监测规 范, 结合现场实际踏勘情况, 在 3830 m 平台安装 GNSS 测站 3 台, 基准站 1 台。

4 200 mWFST 平台场地已完成开挖平整, 在野外 开挖探槽时发现了一处断层破碎带。该断层穿过 LAMOST 望远镜基础位置, 开挖出露地层为二叠纪侵 入中粗粒二长花岗岩。探槽内 0~0.4 m 为人工填土; 0.4~2.5 m 为风化中粗粒二长花岗岩; 2.5~3.0 m 为中 粗粒二长花岗岩, 抗压强度 56.5 MPa。断层产状 350° ∠35°, 走向 260°, 破碎带厚 3.3 m, 破碎带岩性主要为 断层泥及花岗质碎裂岩, 根据野外判断为逆断层。建 议望远镜基础施工前应做详细的勘查设计, 保证在施 工完成后望远镜基座的稳定性。

4100m空置平台和4000m空置平台场地内及周 边未发现断层破碎带及断裂构造通过,初步判断在后 期工程建设中较稳定,适宜工程布设。

4300m推荐平台原始地貌为构造高山山脊,未见冲沟,坡度15°~20°。岩性为二叠纪侵入中粗粒二 长花岗岩,岩块体密度为2.54g/cm³,干燥状态下抗压 强度56.5 MPa,弹性模量3.81×10⁴ MPa,泊松比0.15。 4050m推荐平台岩性为达肯达坂群片麻岩,片麻岩颜 色灰黑色呈片理化,岩块体密度为2.63g/cm³,干燥状 态下抗压强度86 MPa,弹性模量1.23×10⁴ MPa,泊松 比0.04,黏聚力7.25 MPa,内摩擦角30.9°。现场调查 结果表明,2处推荐平台所在场地内及周边未发现断 层破碎带及断裂构造通过,岩性稳定强度高,初步判 断在后期工程建设中较稳定,适宜工程布设,平台场 地可采用削除顶部岩体方式进行场地整平。

5 结论

(1)使用 K-mean 非监督分类结合 BP 神经网络模型进行区域工程地质条件稳定性分析可以避免人为因素对评价因子权重赋值带来的评价结果误差。4个存在较适宜以上的区域中,A 区域有着 B、C、D 区域无法比拟的优势。根据适宜性评价结果为赛什腾山未来的天文台建设推荐了 2 个平台。

(2)应用 InSAR 监测地形形变,分析场区稳定性, 使用 FLAC^{3D}模拟地震作用下已建平台的边坡三维动 力响应,结合人工地质剖面调查得出 3 830 m 平台与 4 200 m 平台附近存在断层,但附近岩体未发生明显位 移,说明断层对天文台建设影响不大。

(3)根据评价结果提出 4 300 m 与 4 050 m 2 处推 荐平台,根据岩体室内试验结果和现场调查结果,判 断 2 处空置平台和 2 处推荐平台所在场地内及周边未 发现断层破碎带及断裂构造通过,岩性稳定强度高较 稳定,适宜工程布设。在未来可采取消除顶部岩体的 方式进行场地整平。

参考文献(References):

- [1] MOREL S, BALLESTER P, BAUVIR B, et al. Preparing MIDI science operation at VLTI[C]//New Frontiers in Stellar Interferometry. Bellingham: SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2004, 5491: 1666 – 1677.
- MA B, SHANG Z, HU Y, et al. Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica[J].
 Nature, 2020, 583(7818): 771 – 774.
- [3] 张柏荣,于建明,谭徽松.中国第三次天文台选址高潮及对丽江高美古地区天文观测条件的初步估计[J]. 天文研究与技术,1996(增刊1):1-8.[ZHANG Bairong, YU Jianming, TAN Huisong. The third high tide of astronomical site selection in China and primary estimation of astronomical observation conditions at gaomeigu Lijiang Yunnan[J]. Astronomical Research & Technology, 1996(Sup1):1-8. (in Chinese with English abstract)]
- 【4】 戎昭金,崔峻,何飞,等.我国行星物理学的发展现状 与展望[J].中国科学院院刊,2019,34(7):760-768.
 [RONG Zhaojin, CUI Jun, HE Fei, et al. Status and prospect for Chinese planetary physics[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(7): 760 - 768.

(in Chinese with English abstract)]

- [5] REN Y, ZHANG D X, ZHOU K M, et al. 10.6 μm heterodyne receiver based on a superconducting hotelectron bolometer mixer and a quantum cascade laser[J]. AIP Advances, 2019, 9(7): 075307.
- FU Y, LI L, WANG D, et al. 28-GHz CMOS VCO with capacitive splitting and transformer feedback techniques for 5G communication[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2019, 27(9): 2088 2095.
- [7] 戴锦程,郑玉元,郭明,等.结构面赤平投影极点图的统计分形在岩体工程分类中的应用——以中科院国家天文台500米口径大射电望远镜(FAST)台址为例
 [J].贵州地质,2010,27(4):309-311. [DAI Jincheng, ZHENG Yuyuan, GUO Ming, et al. The application of statistic fractal stereographic projection point diagram of structural plane in the rock mass engineering classification: Take the FAST of science national astronomical observatories of the Chinese academy of science as the example[J]. Guizhou Geology, 2010, 27(4):309-311. (in Chinese with English abstract)]
- JIANG P, TANG N Y, HOU L G, et al. The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(5): 64.
- [9] DENG L, YANG, CHEN X, et al. Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site[J]. Nature, 2021, 596(7872): 353 - 356.
- [10] 何飞, 尧中华, 魏勇. 冷湖行星光学遥感发展与展望
 [J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(4): 361 372.
 [HE Fei, YAO Zhonghua, WEI Yong. Development and prospect of planetary optical remote sensing at Lenghu[J].
 Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2021, 52(4): 361 372. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川省北川县擂鼓盆地 地壳稳定性与城镇选址[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1758 - 1768. [ZHANG Yongshuang, LEI Weizhi, SHI Jusong, et al. Crustal stability of the leigu basin in Beichuan County, Sichuan Province and its possibility for a new town site[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(12): 1758 - 1768. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 尚彦军,李坤,王开洋.从施工地质灾害看岩体结构动态控制作用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):
 1129 1136. [SHANG Yanjun, LI Kun, WANG Kaiyang. Insights of innovation and development of rock mass structure dynamic controlling froconstruction-

triggered geohazard[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1129 – 1136. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 胡海涛. 区域地壳稳定性评价的"安全岛"理论及方法
 [J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 97 103. [HU Haitao. The theory and method of evaluation of regional crustal stability based on concept of "safe island"[J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(2): 97 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 付恒阳,张静,周渊博.陕南移民工程选址空间适宜性 评价——以陕西省西乡县为例[J].地域研究与开发, 2018, 37(5): 43 - 47. [FU Hengyang, ZHANG Jing, ZHOU Yuanbo. Spatial suitability evaluation of site selection for resettlement project in southern Shannxi: A case of Xixiang County[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(5): 43 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王学良,韩振华,张路青,等.高放废物地质处置阿拉 善预选区工程地质适宜性评价[J].工程地质学报, 2018, 26(6): 1715 - 1723. [WANG Xueliang, HAN Zhenhua, ZHANG Luqing, et al. Regional engineering geology suitability assessment for high-level radioactive waste disposal of pre-selected Alxa area[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1715 - 1723. (in Chinese with English abstract)]
- [16] RICHARDSON C P, AMANKWATIA K. GIS-based analytic hierarchy process approach to watershed vulnerability in Bernalillo County, new Mexico[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(5): 1 – 11.
- [17] 陈德茂,沈志平,姜鹏,等. 国家天文台500米口径球面 射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析[J]. 水文地 质工程地质, 2021, 48(4): 116-123. [CHEN Demao, SHEN Zhiping, JIANG Peng, et al. An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Fivehundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 116 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 卢晓航, 毛晓勇. 青海省赛什腾山地区构造特征及靶 区优选[J]. 青海国土经略, 2015(6): 65 - 67. [LU Xiaohang, MAO Xiaoyong. Structural characteristics and target optimization of Saishitengshan area, Qinghai Province[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, 2015(6): 65 - 67. (in Chinese)]
- [19] 谢涛,陆凡.青海望北沟金矿地质特征及找矿潜力分 析[J].中国金属通报,2020(16):55-56.[XIE Tao,

· 174 ·

LU Fan. Analysis of geological characteristics and mineral search potential of Qinghai Wangbegou Gold Mine[J]. China Metal Bulletin, 2020(16); 55 – 56. (in Chinese)]

- [20] 李坤,尚彦军,蒋毅,等.基于改进多因素相互作用关系矩阵的场址评价—— 以CSNS工程选址为例[J].岩土力学,2016,37(增刊1):400-408. [LIKun,SHANG Yanjun, JIANG Yi, et al. Site evaluation system based on modified multifactor interaction matrix: A case study of CSNS project site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 400 408. (in Chinese with English abstract)]
- LI K, SHANG Y, HE W, et al. An engineering site suitability index (ESSI) for the evaluation of geological situations based on a multi-factor interaction matrix [J].
 Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(1): 569 577.
- [22] MONDRAGON A E C, MASTROCINQUE E, TSAI J F, et al. An AHP and fuzzy AHP multifactor decision making approach for technology and supplier selection in the highfunctionality textile industry[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2021, 68(4): 1112 – 1125.
- [23] 姚鑫,张路青,李凌婧,等. 工程场址区域地壳稳定性 InSAR评价研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 104-115. [YAO Xin, ZHANG Luqing, LI Lingjing, et al. Insar observing the regional crustal stability of engineering sites[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 104-115. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 蔡学林,徐赣清.关于构造断层的分类命名问题[J]. 成都地质学院学报, 1982, 9(1): 25 - 36. [CAI Xuelin, XU Ganqing. On the classification and nomenclature of structural faults[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 1982, 9(1): 25 - 36. (in Chinese)]
- [25] HARTIGAN J A, WONG M A. Algorithm AS 136: A Kmeans clustering algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 1979, 28(1): 100 – 108.
- [26] HOPFIELD J J. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state

neurons[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1984, 81(10): 3088 – 3092.

- [27] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J].
 Nature, 1986, 323(6088): 533 - 536.
- [28] 李敬明, 倪志伟, 朱旭辉, 等. 基于佳点萤火虫算法 与BP神经网络并行集成学习的旱情预测模型[J]. 系 统工程理论与实践, 2018, 38(5): 1343 - 1353. [LI Jingming, NI Zhiwei, ZHU Xuhui, et al. Drought prediction model based on GPSGSO-BPNN parallel ensemble learning algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(5): 1343 - 1353. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 任文恺, 晁海德, 王生云, 等. 青海省赛什腾山地区三角顶金矿区地质、地球化学特征及找矿方向[J]. 黄金, 2018, 39(9): 13 17. [REN Wenkai, CHAO Haide, WANG Shengyun, et al. Geological, geochemical characteristics and prospecting direction of the Sanjiaoding Gold District in Saishiteng Mountain area, Qinghai Province[J]. Gold, 2018, 39(9): 13 17. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 谢海东,鲁海妍,张莹,等.青海省冷湖镇小赛什腾山 地区奥陶纪闪长岩岩石化学特征及时代探讨[J].资 源信息与工程,2019,34(6):13-16. [XIE Haidong, LU Haiyan, ZHANG Ying, et al. Petrochemical characteristics and age of Ordovician diorite in Xiaosaishitengshan area, Lenghu Town, Qinghai Province[J]. Resource Information and Engineering, 2019,34(6):13-16. (in Chinese)]
- [31] 王文沛,殷跃平,李滨,等.不同坡角斜坡动力响应频 谱特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 121-128. [WANG Wenpei, YIN Yueping, LI Bin, et al. Spectral characteristics of dynamic response of slope with different angles of inclination[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 121-128. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华 实习编辑: 刘真真