

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.010

珠江口海岛孤石发育特征及韧性防治设计： 以珠海市万山区为例

赖波¹, 曾新雄², 吴舒天², 刘佳², 江金进¹, 江山¹, 赵风顺¹, 陈桂丽¹

LAI Bo¹, ZENG Xin-Xiong², WU Shu-Tian², LIU Jia², JIANG Jin-Jin¹,
JIANG Shan¹, ZHAO Feng-Shun¹, CHEN Gui-Li¹

1. 广东省珠海工程勘察院, 广东 珠海 519000; 2. 广东省地质局珠海地质调查中心, 广东 珠海 519000

1. Engineering Survey Institute of Zhuhai, Guangdong Province, Zhuhai 519000, Guangdong, China;

2. Zhuhai Geological Survey Center of Guangdong Provincial Geological Bureau, Zhuhai 519000, Guangdong, China

摘要: 珠江口海岛上孤石遍布, 在强降雨或台风时期, 严重威胁海岛地区人民生命财产安全。本文通过实地调查、遥感和GIS技术, 查清了珠海市万山区海岛孤石的发育特征、形成机理和失稳模式, 并针对性地进行了防治设计。研究表明: 海岛孤石的发育与坡度、高程、坡向有关, 并以外伶仃岛为例, 查明了迎风坡孤石分布密集、裸露明显、埋深浅, 以孤石群为主, 背风坡孤石分布稀疏、隐蔽性好、埋深较深、零星分布的特点。总结了孤石的形成主要受地形地貌、风化作用、构造运动和外力侵蚀因素影响。基于研究结果, 设计了针对万山区海岛孤石灾害的“空间管控-生态固石-分级响应”三位一体韧性防治体系, 为政府建设海洋强国、持续实施海岛旅游开发建设和建立健全地质灾害防灾减灾监测预警体系提供借鉴。

关键词: 孤石; 海岛; 地质灾害; 韧性防治设计; 珠海市

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0350-12

Lai B, Zeng X X, Wu S T, Liu J, Jiang J J, Jiang S, Zhao F S and Chen G L. 2025. Development Characteristics of Isolated Rocks on the Islands in the Pearl River Estuary and the Resilient Design of Prevention and Control: A Case Study of Wanshan District, Zhuhai City. *South China Geology*, 41(2): 350-361.

Abstract: The islands at the mouth of the Pearl River are loaded with isolated rocks, which pose a serious threat to people's lives and property in the island areas when heavy rainfall or typhoons are raging. This article, through field surveys, remote sensing, and GIS technology, clarifies the development characteristics, formation mechanisms, and instability patterns of isolated rocks on the islands in the Wanshan District, Zhuhai City, and carries out targeted prevention and control design. The research shows that the development of isolated rocks on the islands is related to slope, elevation, and slope orientation. Taking the outer Lingding Island as an example, it reveals that the windward slope has dense distribution of isolated rocks with obvious exposure and shallow burial depth, and is dominated by isolated rock clusters. The isolated rocks on leeward slope are sparse and sporadic distributed with good concealment and deeper burial depth. The formation of

收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-04-01

基金项目: 珠海市城市地质调查(含信息化)项目(MZCD-2201-008)、中央-自然灾害防治体系建设补助资金项目(H202402009)

第一作者: 赖波(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作, E-mail: 410271798@qq.com

isolated rocks is mainly influenced by topography, weathering, tectonic movement, and external erosion . Based on the research results, a three-in-one resilience prevention and control system for isolated rock disasters on the islands in the Wanshan District, namely "spatial management-ecological rock stabilization-graded response," has been designed. This provides a reference for the government to build a strong maritime power, continuously implement island tourism development and construction, and establish a sound geological disaster prevention and mitigation monitoring and early warning system.

Key words: isolated rocks; island; geological disasters; resilient design; Zhuhai

珠江口海岛分布密集,共有大小海岛 147 个(唐玲等, 2020),其中珠海市万山区占 105 个,主要岛屿包括大万山岛、东澳岛、桂山岛、外伶仃岛和担杆岛等(图 1)。

由于不稳定孤石引发的地质灾害严重影响海岛居民生活及旅游业的健康发展,因此引起政府部门及施工单位的高度重视,国内一些学者(江山和廖海斌, 2021; 杨光, 2021; 江金进等, 2022; 冯龙飞和张堪培, 2024)采用地表实地调查的方式,分析了地表孤石(群)的分布规律及对坡脚居民区、步道和隧道口的影响;曹权等(2013)、施有志等(2019)采用钻孔勘察的方式,查明了地下孤石的分布规律及对地下工程施工的影响;庄明水(2021)采用三维激光扫描与无人机倾斜摄影相结合的方法,并结合现场勘测手段对厦门岛云顶岩南侧某山体孤(滚)石发育规律及失稳模式进行了调查和分析。针对孤石的防治方法及措施,一些学者(江贵荣等, 2019; 魏辉球和詹振阳, 2021; 张梅梅和温兴平, 2022; Xiao Y L et al., 2022; Zhou J

X et al., 2022; Wu C W et al., 2024; Luo X et al., 2025)建议采用加固(支挡加固、锚索加固)、柔性防护网(主动防护网、被动防护网)、静态爆破清除、监测预警、生态绿化修复等治理方式。

综上所述,在孤石发育特征上,国内学者主要基于实地调查和工程勘察对孤石分布进行分析,少量采用三维激光扫描与无人机倾斜摄影方法;在孤石防治工程措施上,主要采用常规治理方法。

万山区为了抓住中国式现代化发展机遇,培育壮大海洋新质生产力,利用海洋经济产业发展上的独特优势,大力发展海洋产业和海岛旅游资源,如开发建设度假酒店、石景公园、环岛旅游路及滨海栈道等,一系列人类工程活动不免对生态既敏感又脆弱的海岛环境造成破坏。由于岛内地表孤石遍布,在强降雨或台风时期,常常引发地质灾害,因此形成了“孤石灾害链”,包括孤石形成-风化迁移-灾害触发-次生效应,严重影响山脚居民、游客、建筑物及其他旅游设施的安全等(陈元芳和蔡岸锋, 2021; 杨光, 2021)。基于此,本文采

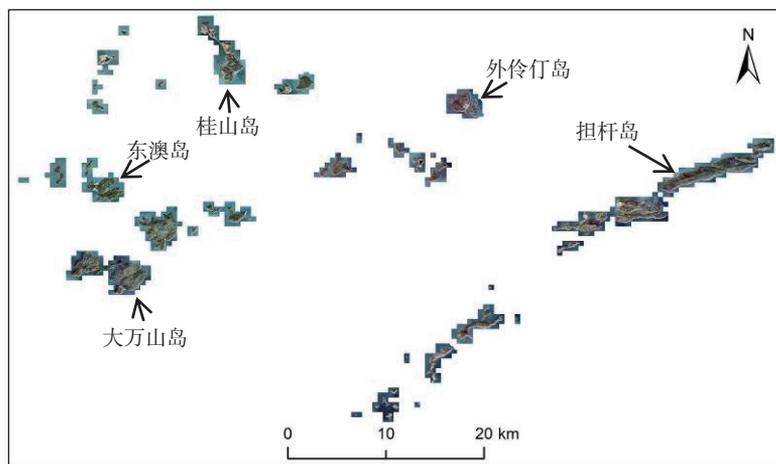


图 1 万山区主要海岛分布图

Fig. 1 The distribution map of main islands in the Wanshan District

用实地调查、遥感和GIS技术,研究分析了万山区海岛孤石的发育特征、形成机理和失稳模式,结合万山区旅游开发建设,设计了针对海岛孤石灾害的“空间管控-生态固石-分级响应”三位一体韧性防治体系,旨在降低孤石灾害风险,保障海岛地区生态安全,维护旅游业可持续健康发展,为政府建设海洋强国、持续实施海岛旅游开发建设和建立健全地质灾害防灾减灾监测预警体系提供借鉴。

1 万山区海岛概况

万山区位于珠江口南部,由105座岛屿组成,地貌以丘陵为主,主要呈北东、北西走向,受后期构造抬升和侵蚀切割,有较明显的山鞍,峰顶多呈穹隆状,较平缓圆滑,坡度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,局部有陡崖展布;山腰和山脚部位坡度稍大,达 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$;沟谷中等切割,多呈“V”字形。万山区气候属亚热带海洋性季风气候,年降雨量约2000 mm,主要集中在4—10月,受季风影响明显,每年1月、11月和12月以偏北风为主,4—10月以东南风为主。汛期受西太平洋和南海台风影响,易出现暴雨、大风

天气。

区内的海岛地形地势高差较大,基本为基岩岛,地表广泛出露晚侏罗世花岗岩,局部出露早白垩世和晚白垩世花岗岩。岩体受自然风化、雨水侵蚀及地质构造的共同作用,形成了大量类似球状和不规则状的中-微风化体(孤石)(施有志等,2019),孤石主要成群或孤立于海岛斜坡带上,其次分布在山顶及山脊处,直径在1~5 m之间,部分达5 m以上,卫星影像图(图2)上可清晰看到,尤其以外伶仃岛(图3)最为明显。区内各岛屿在长期物理风化、化学风化、生物风化、侵蚀作用及地质构造共同作用下,地表形成了大量的孤石,根据赖波等(2021a, 2021b, 2023)研究,万山区海岛公路沿线及山脚居民区一带位于地质灾害高易发区,在强降雨、持续性降雨或台风条件下,易发生崩塌地质灾害(图4)。

2 孤石发育特征

从遥感影像图(图3)上可见:外伶仃岛孤石分布最密集,也是孤石分布最多的岛屿,而桂山岛

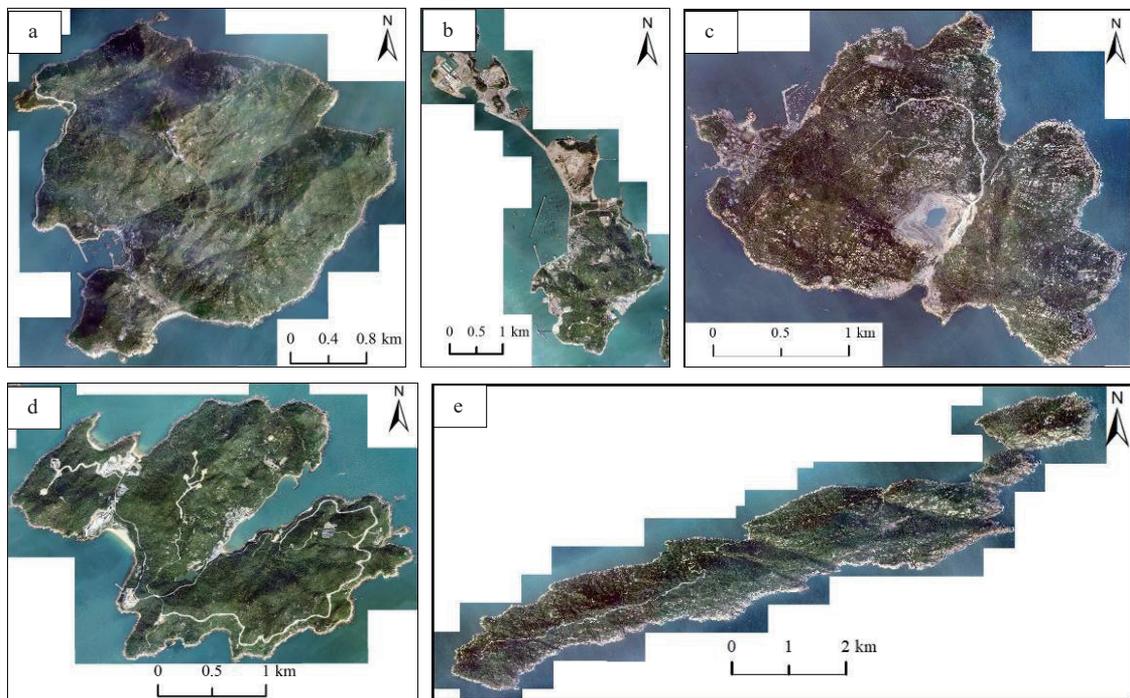


图2 万山区主要海岛孤石分布图

Fig. 2 Distribution map of isolated rocks on the main islands in the Wanshan District

a.大万山岛; b.桂山岛; c.外伶仃岛; d.东澳岛; e.担杆岛

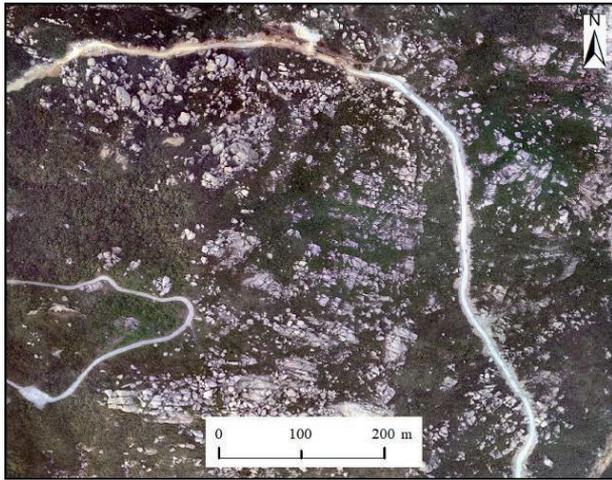


图 3 万山区外伶仃岛局部孤石分布图

Fig. 3 Distribution Map of Local Isolated Rocks on Wailingding Island, Wanshan District

是分布最稀疏, 也是最少的岛屿。本次主要实地调查了大万山岛、东澳岛、桂山岛、外伶仃岛和担杆岛山脚居民区以上第一斜坡地带, 共发现有孤石(群)424 个, 总方量约 122203.33 m³, 其中大万山岛孤石(群)90 个、东澳岛孤石(群)104 个、桂

山岛孤石(群)90 个、外伶仃岛孤石(群)80 个、担杆岛孤石(群)60 个(陈元芳和蔡岸锋, 2021; 表 1)。

2.1 孤石发育的斜坡坡度特征

实地调查发现孤石(群)主要分布在坡度 30°~60°的斜坡上, 共 207 个, 占 48.8%; 其次分布在 10°~30°斜坡上, 共 138 个, 占 32.5%; 60°~90°陡崖区和 0°~10°缓坡区分布最少(表 2)。

2.2 孤石发育的斜坡高程特征

实地调查发现大部分孤石(群)分布在高程 30~90 m 的斜坡上, 其中大万山岛主要分布在 80~120 m 之间, 东澳岛主要分布在 60 m 以下, 桂山岛主要分布在 50~80 m 之间, 外伶仃岛分布较为分散, 担杆岛主要分布在 50~90 m 之间。由此可知, 海岛上孤石分布和高程关系不大(表 3)。

2.3 孤石发育的坡向特征(以外伶仃岛为例)

孤石的球状风化主要与气候因素有关, 而迁移搬运主要与地形地貌相关。通过实地调查、遥感影像识别及 GIS 分析, 发现外伶仃岛孤石在迎风坡、背风坡及沟谷区域具有明显的地域分布特

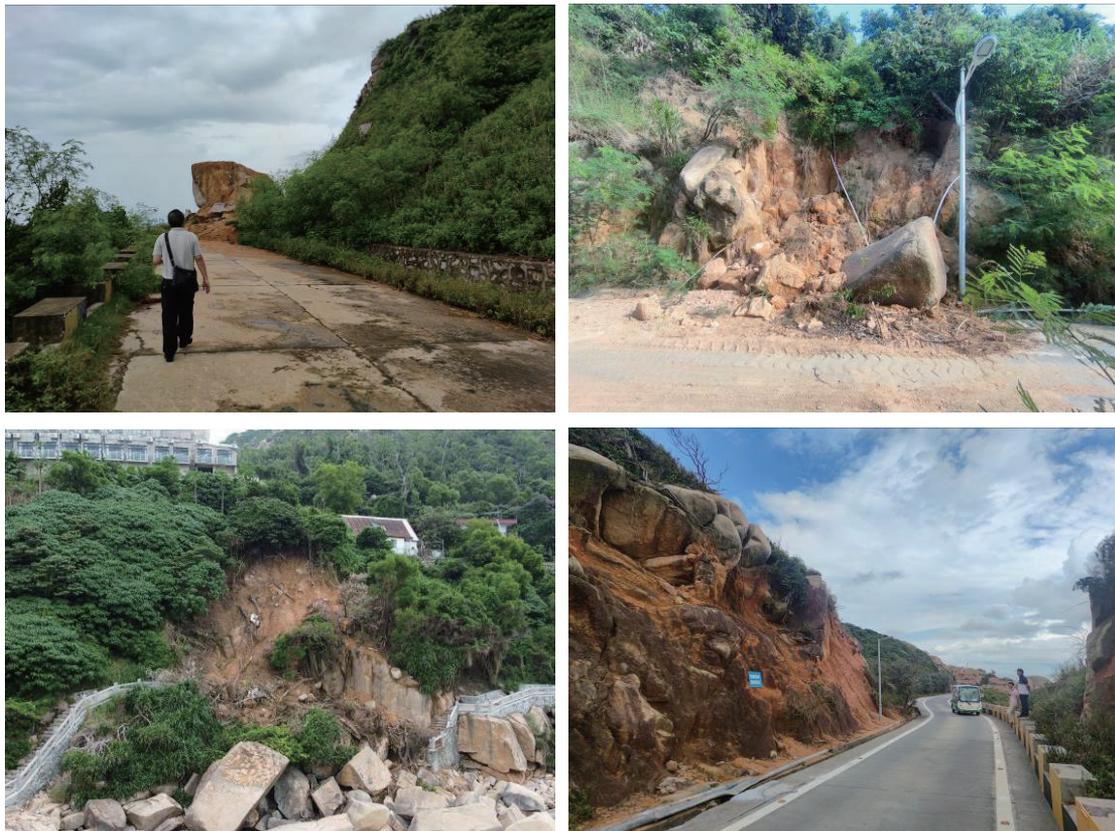


图 4 万山区海岛崩塌地质灾害

Fig. 4 Geological disasters of island collapses in the Wanshan District

表1 万山区主要海岛孤石(群)分布情况表

Table 1 Table of the distribution of isolated rocks (groups) on the main islands in the Wanshan District

岛屿	大万山岛	东澳岛	桂山岛	外伶仃岛	担杆岛	合计
孤石(群)数(个)	90	104	90	80	60	424
总方量(m ³)	17319.11	56352.15	23174.7	22974.97	2382.4	122203.33

表2 万山区主要海岛孤石(群)所处
斜坡坡度分布情况表Table 2 Table of the slope gradient distribution of
the isolated rocks (groups) on the main
islands in the Wanshan District

坡度(°)	岛屿孤石(群)数(个)					
	大万山岛	东澳岛	桂山岛	外伶仃岛	担杆岛	合计
0~10	8	14	5	3	1	31
10~30	40	32	39	16	11	138
30~60	29	40	39	52	47	207
60~90	13	18	7	9	1	48
合计	90	104	90	80	60	424

表3 万山区主要海岛孤石(群)所处斜坡高程情况表

Table 3 Table of elevation situations of the slopes where
the isolated rocks (groups) of
the main islands in the Wanshan District

高程(m)	岛屿孤石(群)数(个)					
	大万山岛	东澳岛	桂山岛	外伶仃岛	担杆岛	合计
20以下	3	14	4	10	0	31
20~30	2	14	3	8	4	31
30~40	4	20	11	9	7	51
40~50	5	16	6	7	6	40
50~60	7	21	16	10	10	64
60~70	9	7	12	9	7	44
70~80	7	9	10	7	11	44
80~90	12	3	8	4	11	38
90~100	12	0	5	12	4	33
100~120	22	0	11	4	0	37
120以上	7	0	4	0	0	11
合计	90	104	90	80	60	424

征。因此,本文收集了2011年—2023年外伶仃岛气象站有效风力数据33229个,统计主要风向(表4、图5)。

2.3.1 迎风坡孤石发育特征

通过遥感影像图及GIS分析外伶仃岛迎风坡

(山体东侧)孤石,其分布特征为:①在平面上,迎风坡山体植被稀疏,孤石裸露明显,且分布密集,以孤石群为主,孤立孤石较少见(图6a)。②受北东向和北西向构造影响,孤石节理裂隙较发育,节理裂隙面延伸方向与构造方向基本一致,孤石(群)展布亦与构造方向基本一致(图7)。③在坡度和高程方面,不同的坡度和高程均有孤石分布,且山顶至山脚地区孤石分布亦不均,因此迎风坡孤石在坡度和高程上无明显的规律可循。④在基底岩性方面,迎风坡山体植被稀疏,孤石基底岩性主要为花岗岩,埋深浅,原因是迎风坡易受季风、台风及雨水冲刷作用影响,坡面残坡积土易被迁移搬运,孤石易发生滚落或堆积成孤石群。

2.3.2 背风坡孤石发育特征

外伶仃岛背风坡(山体西侧)孤石分布相对稀疏,以零星分布为主(图6b),该区域山体植被较茂密,并且受构造、季风、西太平洋和南海台风影响小,季风及汛期雨水迁移侵蚀山体的风化作用弱,植被更易生存,植物根系固土作用更明显,孤石埋深相对较深(图8)。

外伶仃岛居民区主要位于背风坡区域山脚,根据居民区以上第一斜坡地带孤石调查结果,具体统计特征见表5、图9。

由表5和图9可知:外伶仃岛背风坡孤石分布规律如下:①在坡度上,孤石主要位于5°~20°和30°~60°之间的斜坡上,占比达91.3%(图9a),这表明背风坡孤石主要分布在陡坡地带,原因是陡崖地区孤石因重力作用易发生滚落,而缓坡地区花岗岩残坡积土较厚,孤石裸露少。山顶或山脊边缘缓坡地区孤石因雨水冲刷和风化作用后

表4 外伶仃岛2011年—2023年风向统计表

Table 4 Statistics Table of Wind Directions on Wailingding Island from 2011 to 2023

风向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
数据量(个)	2829	7339	9636	3872	2251	5539	1358	405
百分比(%)	8.51	22.09	29.00	11.65	6.77	16.67	4.09	1.22

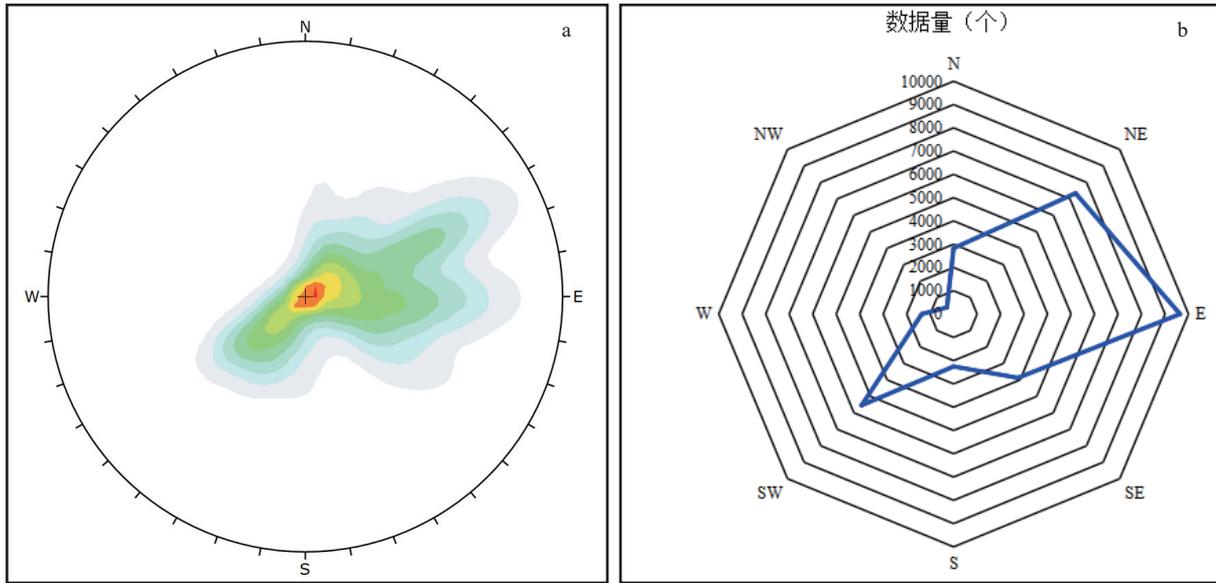


图 5 外伶仃岛 2011—2023 年风向云图 (a) 和玫瑰图 (b)

Fig. 5 Wind direction cloud diagrams and wind rose diagrams of Wailingding Island from 2011 to 2023

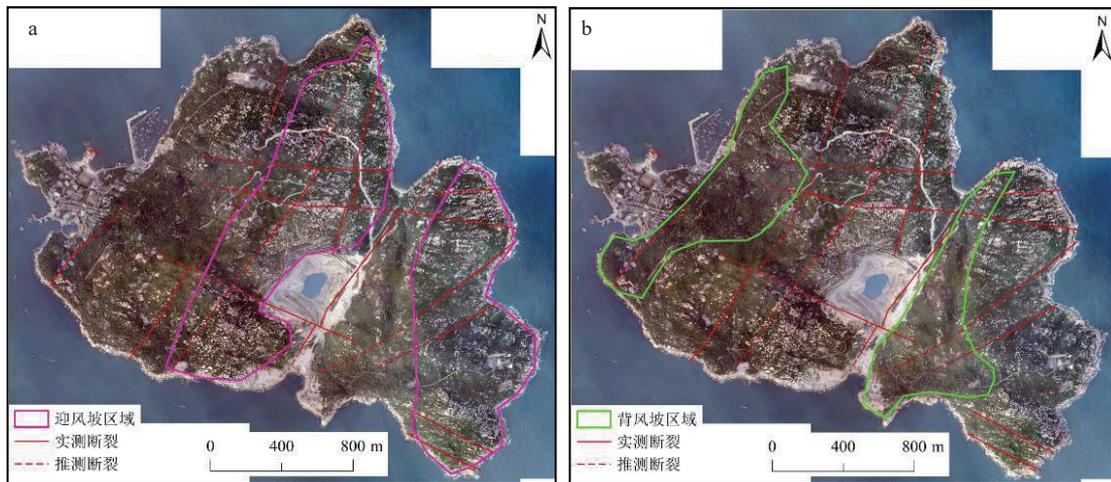


图 6 外伶仃岛迎风坡 (a) 及背风坡 (b) 区域孤石分布图

Fig. 6 Distribution Map of Isolated Rocks in the Windward Slope (a) and Leeward Slope (b) Areas of Wailingding Island

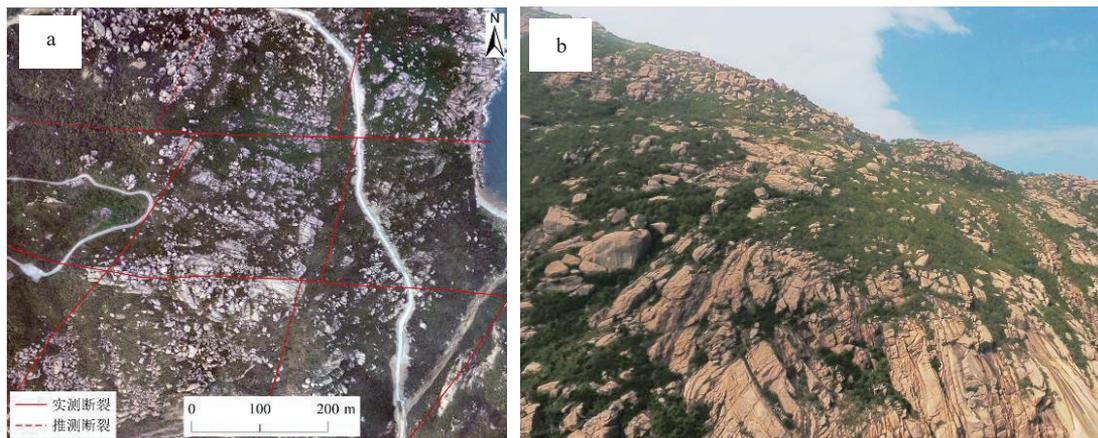


图 7 外伶仃岛典型迎风坡区域孤石 (a) 及现场 (b) 照片

Fig. 7 Photos of the isolated rock (a) and the site (b) in the typical windward slope area of Wailingding Island

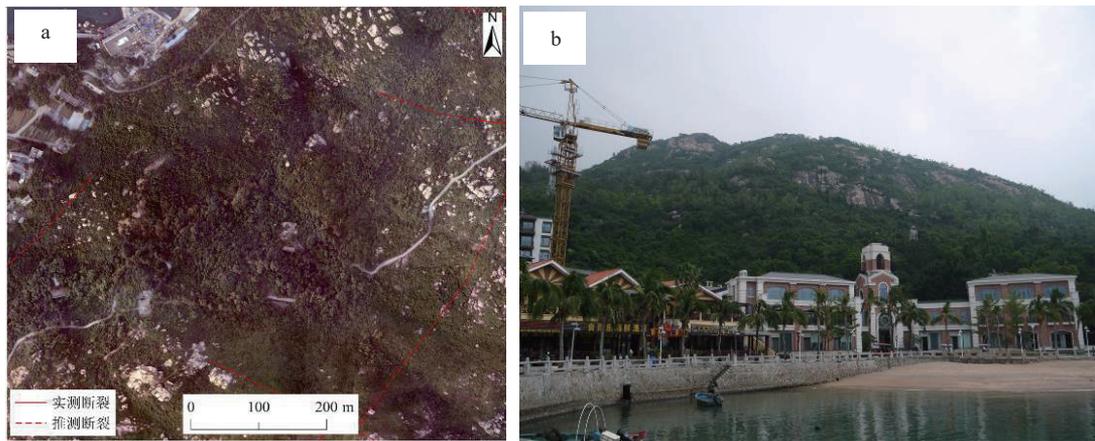


图8 外伶仃岛典型背风坡区域孤石(a)及现场(b)照片

Fig. 8 Photos of the isolated rock (a) and the site (b) in the typical leeward slope area of Wailingding Island

未受重力作用滚落而显露于地表,呈局部聚集。

②在高程上,孤石主要位于20 m~100 m之间,占比达85.0%(图9b),这一现象亦说明背风坡孤石主要分布在山体斜坡带上,山顶和山脚地区孤石分布少。③在基底岩性方面,背风坡孤石基底岩性主要为残坡积土,占比达62.5%(图9c),原因是背风坡受季风、台风及雨水冲刷作用弱,山体植被较茂密,坡面残坡积土不易被迁移搬运,孤石易保存在原地或发生滚落的概率小。④在埋深方面,孤石主要埋深在1.20 m~1.60 m之间,占比达48.8%(图9d),这一现象说明背风坡孤石基底岩性被风化剥蚀或雨水冲刷迁移搬运少,因此孤石埋深较深,易保存而不易发生滚落。

2.3.3 沟谷孤石发育特征

以外伶仃岛大东湾沟谷区域为研究对象,该区域孤石因坡面流水冲刷和重力搬运作用,主要位于沟谷区域两侧斜坡面中下部,并且以孤石群为主,平面上呈现明显的条带特征(图10),垂直方向上可见多数孤石呈堆叠状态位于斜坡面上,沟谷汇水处反而少见孤石(图11)。

3 孤石形成机理

从实地调查和遥感影像图上可见:万山区海岛孤石主要以孤石群、孤立形式发育于各岛屿斜坡带上,山顶、山脊及山脚发育相对较少。孤石直径以小于5 m为主,大于5 m的孤石较少。受区域性大断裂和风化剥蚀强度差异的影响,孤石整

体呈北东向和北西向展布,形态上主要呈长条状、椭圆状和不规则状。其形成机理主要受地形地貌、风化作用、构造运动和外力侵蚀的影响。

3.1 地形地貌

万山区海岛孤石的形成与地形地貌密切相关。因海岛地形地貌主要为丘陵地貌,地势高差较大,致使地表岩体更容易受到风化作用、重力作用及流水侵蚀搬运作用等影响。因此地形地貌为孤石的形成提供了内部条件,尤其是坡度越陡,岩体更容易暴露于地表,受外界作用加强,因此越容易形成孤石;坡度越缓,岩体受外界作用小,岩体间更紧密,分离或滚落的可能性变小,形成孤石的难度就会变大,岩体就会保存得更加完整。从海岛孤石分布来看,斜坡带地区孤石分布较为密集,坡顶及坡脚较平缓地区孤石分布相对稀疏。

3.2 风化作用

风化作用亦是孤石形成的重要因素。暴露于地表或地表浅表层且节理裂隙较发育的岩体在长期物理风化和化学风化作用下,使具有棱角的岩体表面矿物风化分层剥落,特别是花岗岩中长石、绿泥石、角闪石及黑云母等矿物在湿热环境中,极易被溶蚀变成高岭石、绢云母等,进而加剧矿物的风化程度(杨光,2021),并逐渐“磨圆化”,最终形成孤石。

3.3 构造运动

区域性大断裂及次生断裂构造运动致使岩体节理裂隙较发育,调查时测得基岩和孤石主要发

表 5 外伶仃岛背风坡区域孤石统计表

Table 5 Statistics table of isolated rocks in the leeward slope area of Wailingding Island

孤石(群)编号	方量(m ³)	坡度(°)	高程(m)	基底岩性	埋深(m)	孤石(群)编号	方量(m ³)	坡度(°)	高程(m)	基底岩性	埋深(m)
GS01	7.2	42.5	85	花岗岩	0	GS41	9.61	9	26.5	残坡积土	1.25
GS02	424.65	45	21	残坡积土	1.25	GS42	9.61	47.5	20	花岗岩	0.25
GS03	68.15	8	29.1	残坡积土	1.25	GS43	58.67	6.5	25.2	残坡积土	1.25
GS04	440.56	20	34	残坡积土/花岗岩	1.75	GS44	207.1	5	37	残坡积土/花岗岩	0.25
GS05	2589.13	37.5	36	残坡积土	1.25	GS45	68.21	15	51	残坡积土	1.5
GS06	39.7	32.5	46	残坡积土	1.25	GS46	80.65	10	39.5	残坡积土	1.5
GS07	627.61	32.5	57	残坡积土	1.25	GS47	113.4	12.5	31.5	残坡积土	1
GS08	865.55	32.5	62	残坡积土/花岗岩	1.25	GS48	189.5	37.5	42	残坡积土	1.25
GS09	905.35	56	54	残坡积土/花岗岩	1.25	GS49	105.07	32.5	32.5	残坡积土	1.25
GS10	45.22	40	41	残坡积土/花岗岩	0.55	GS50	153.79	32.5	44.5	残坡积土	1.25
GS11	417.28	19	52.5	残坡积土	1.5	GS51	264.85	35	56.2	残坡积土	1.15
GS12	59.36	17.5	45	残坡积土	1.75	GS52	400	37.5	67.5	残坡积土	1
GS13	113.44	37.5	57.2	残坡积土	1.25	GS53	29.7	77.5	60	残坡积土/花岗岩	0.5
GS14	51.86	5.5	58.5	残坡积土	1.25	GS54	264.85	38.5	26	残坡积土/花岗岩	0.5
GS15	178.98	11.5	66	残坡积土	1.75	GS55	10.5	17.5	75.5	残坡积土	1.25
GS16	3885	25	70	残坡积土	1.25	GS56	129.46	43	92	残坡积土/花岗岩	0.3
GS17	1106.13	35	96	残坡积土/花岗岩	1.5	GS57	178.76	40	93	残坡积土	1
GS18	188.1	37.5	94	残坡积土	1	GS58	66	45	101	残坡积土	1.25
GS19	24.57	37.5	94	残坡积土/花岗岩	0.75	GS59	9.26	70	101	残坡积土	1.75
GS20	122.2	38	93	残坡积土/花岗岩	1.5	GS60	80.59	42.5	100	残坡积土	1.25
GS21	37.8	37.5	78	残坡积土	1.75	GS61	22.78	40	96	残坡积土	1.25
GS22	292.5	7.5	78	残坡积土	1.75	GS62	64.27	37.5	99	残坡积土/花岗岩	0.5
GS23	31.2	35	20	残坡积土	1.25	GS63	12.94	35	98	残坡积土	1.25
GS24	59.05	10	22.5	残坡积土	1.25	GS64	123.61	25	97.5	残坡积土	1.5
GS25	54.14	43	32.5	残坡积土/花岗岩	0.8	GS65	290.29	50	106	花岗岩	0.25
GS26	26.39	31	28	残坡积土	1.25	GS66	45.03	45	99	花岗岩	0
GS27	174.4	35	17.5	残坡积土	1.25	GS67	2100	55	103	花岗岩	0
GS28	49.3	47.5	18	残坡积土	1.75	GS68	44.5	42.5	78.5	花岗岩	0.25
GS29	180.4	42.5	26	残坡积土/花岗岩	0.775	GS69	61.92	50	76	残坡积土/花岗岩	0.1
GS30	2424.12	42.5	41.6	花岗岩	0.8	GS70	63.95	50	89.65	花岗岩	0
GS31	208.17	38.5	48	残坡积土	1.25	GS71	60.90	50	89.65	花岗岩	0.05
GS32	67.33	10	55.5	残坡积土	1.25	GS72	297.2	65	70	花岗岩	0.25
GS33	183.81	7.5	66	残坡积土	1.25	GS73	90.21	50	64	残坡积土/花岗岩	0.1
GS34	150	58	72	残坡积土	1.25	GS74	24.39	47.5	74.5	残坡积土	0.75
GS35	327.56	40	82	残坡积土	1.25	GS75	295.67	52.5	64.5	残坡积土	0.65
GS36	7.04	47.5	34	残坡积土	1.3	GS76	87.42	37.5	62.5	残坡积土/花岗岩	0.15
GS37	134.38	17.5	37.1	残坡积土	1.25	GS77	91.6	50	59	残坡积土/花岗岩	0.15
GS38	97.21	65	14.02	残坡积土	1.25	GS78	5.63	15	14	花岗岩	0.05
GS39	23.18	35	15.5	残坡积土	1.25	GS79	15.12	52.5	9	残坡积土	0.75
GS40	43.5	40.5	26	花岗岩	0.25	GS80	17.36	40	10	残坡积土	2

育 3 组节理(节理产状① $65^{\circ}\angle 67^{\circ}$ 、② $322^{\circ}\angle 48^{\circ}$ 、③ $83^{\circ}\angle 85^{\circ}$),节理裂隙产状走向与区域性大断裂走向基本一致。构造运动导致岩体形成不同方向的节理裂隙,一方面扩大了岩体风化面,另一方面为风化剥蚀及雨水侵蚀提供了通道,加速了岩体

的风化作用。岩体节理交汇处的棱角在经过长时间的化学风化作用后,原本呈方形的棱角处岩块逐渐被风化磨蚀,变化为球状岩块。构造运动还导致脱离母体的孤石发生不同程度的迁移,为孤石的不稳定性创造了条件。

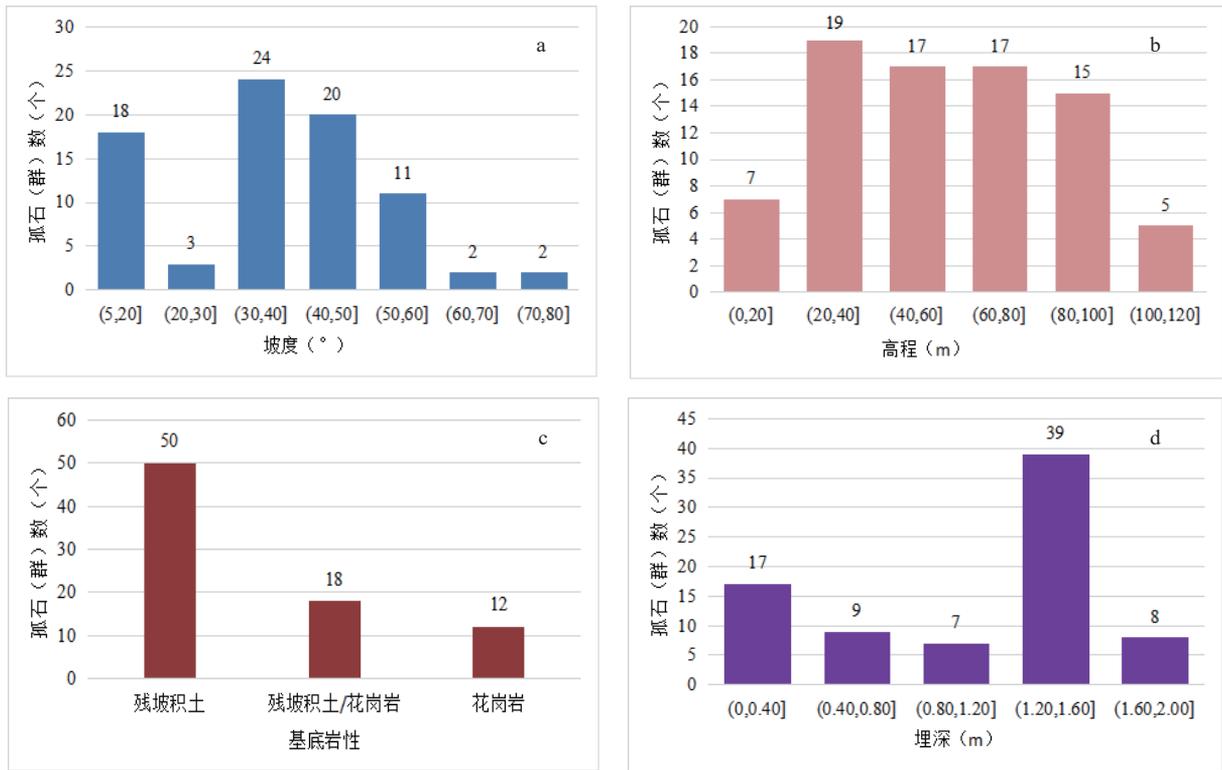


图9 外伶汀岛背风坡区域孤石统计图

Fig. 9 Statistics diagram of isolated rocks in the leeward slope area of Wailingding Island

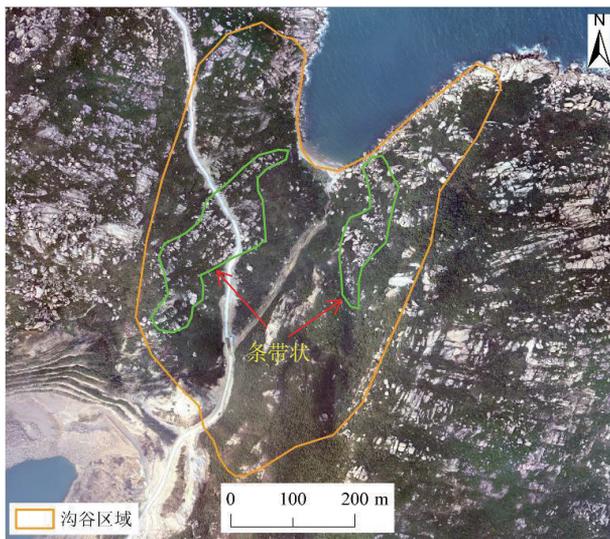


图10 外伶汀岛典型沟谷区域孤石分布图

Fig. 10 Distribution map of isolated rocks in the typical valley areas of Wailingding Island

3.4 外力侵蚀

万山区海岛位于珠江口南部,在每年的4—10月(汛期),受西太平洋和南海台风影响,易出现暴雨、大风天气。暴雨冲刷和侵蚀,致使孤石表层矿物分离,同时使孤石基底岩土体物理力学性质变弱,更容易软化,同时受到强烈的台风影响,

加速了岩体表面风化及岩土体的迁移,改变了孤石原有的平衡,亦为孤石的不稳定性创造了条件。

4 孤石失稳模式分析

根据孤石的发育特征及形成机理,可将海岛孤石的失稳模式划分为两种类型,即倾倒-滚落式、牵引-滑移式(庄明水, 2021; 吴海斌, 2024)。

4.1 倾倒-滚落式

孤石节理裂隙较发育,其基底和周边土体因雨水冲刷被掏空而呈部分悬空,暂且处于稳定状态或极限平衡状态。当孤石不利结构面或周边土体受到如暴雨形成的动水压力、地震力等外力作用时,导致不利结构面抗滑力减弱和土体流失,极有可能打破平衡而导致孤石发生倾倒或滚落崩塌(图12)。这种失稳模式与降雨、斜坡坡度、岩体风化程度、岩体完整程度、节理裂隙发育程度、结构面产状及不利组合关系、悬空状态、地震等因素有关,但主要诱发因素是降雨或地震等外力作用。

4.2 牵引-滑移式

孤石基底和周边土体结构比较松散,透水性

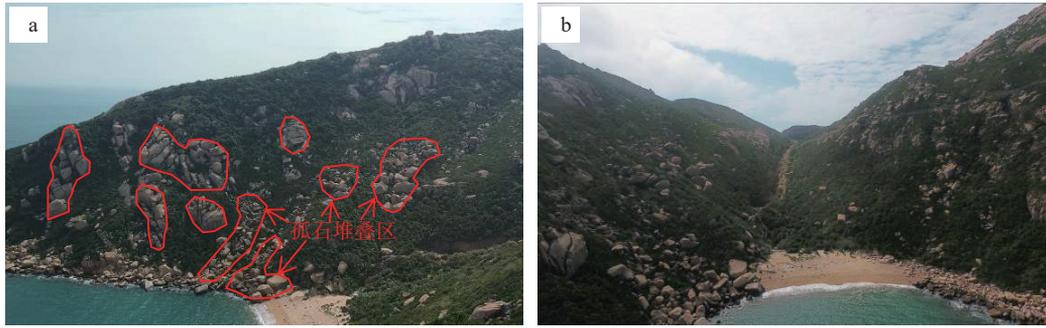


图 11 外伶仃岛典型沟谷斜坡区 (a) 及沟域孤石分布现场 (b) 照片

Fig. 11 Photos of the typical gully slope area (a) of Wailingding Island and the on-site distribution of isolated boulders in the gully area (b)



图 12 倾倒-滚落式崩塌现场照片

Fig. 12 On-site photos of the toppling-rockfall type collapse

较好, 雨水入渗后物理力学性质变化较大, 特别是抗剪强度明显降低, 在雨水冲刷和渗透下发生崩塌或滑坡从而牵引孤石沿坡面向下滑移(图 13)。这种失稳模式与降雨、斜坡坡度、孤石基底和周边岩土体特性、风化程度、坡面植被情况、汇水及排水条件等因素有关, 但主要诱发因素是降雨。

由于孤石受自然因素、地质环境条件、人类工程活动等多重因素影响, 其失稳模式不会一成

不变, 而是随着时间的推移可能发生转换。

5 孤石防治韧性设计

5.1 设计原则

设计的目的是降低万山区海岛孤石灾害风险, 始终贯彻“人民至上、生命至上”的根本原则, 保障地区生态安全, 同时兼顾旅游业可持续健康



图 13 牵引-滑移式崩塌现场照片

Fig. 13 On-site photos of the traction-sliding type collapse

发展,结合海岛国土空间规划、生态景观空间布局及孤石发育特征、形成机理和失稳模式,从适应性、冗余性和学习性三个韧性角度,设计针对万山区海岛孤石灾害的“空间管控-生态固石-分级响应”三位一体韧性防治体系,切实维系生态地质、旅游地质和民生地质和谐共生,多角度保障人类生命及财产安全。

5.2 空间防御体系

为了保障海岛地区生态健康稳定安全,可以构建安全屏障来适应和面对自然灾害(台风、暴雨、构造运动等)及人类工程活动开发建设带来的灾害风险(张赫等, 2024)。因此,对于在不同坡度、高程上及背风坡区域孤石及可能发生牵引-滑移失稳模式的孤石分布区域,从空间上建立“核心保护区-缓冲带-监测区”的防御体系:一是将人员居住和旅游活动较为密集的区域设定为核心保护区,在其周边构建防护措施,防止因孤石滚落造成不必要的人员伤亡和财产损失;二是在孤石下方斜坡区设置缓冲带,在缓冲带内种植树木或建设围挡措施阻止和降低孤石灾害风险;三是安排人员定期对孤石分布区进行实地或无人机巡查监测,以便发现安全隐患及时采取有效措施应对(图14)。

5.3 工程防治技术

针对欠稳定和不稳定的孤石,除了采用加固、防护网、爆破清除等常规工程治理措施外,还应结合海岛特殊且脆弱的生态环境,尽可能地保持海岛自然生态和环境平衡。因此,对于分布较密集的迎风坡、人员活动较密集的区域及可能发生倾倒-滚落失稳模式的孤石分布区域,可采用“生态固坡-智能监测-应急通道”的防御体系。一是山脚具有重要工程设施且孤石分布较为密集的山坡区



图14 万山区典型孤石分布区空间防御体系图

Fig. 14 Spatial defense system diagram of the typical isolated rock distribution area in the Wanshan District

域,可采取生态固坡方式,包括人工种草护坡、土工格室植草护坡、框格内填土植草护坡等。二是对于大片分布且方量较大的孤石斜坡区,设置地质灾害专业监测设备,智能监测孤石的变形位移及周边地质环境的变化,获取实时监测数据,为政府实施防灾减灾提供决策。三是对于受地质灾害威胁或孤石滚落风险的人员居住密集区、旅游设施沿线,包括公路、景观步道、滨海栈道等,在其周边安全区域建设应急避险场所及逃生路线,同时根据地质灾害易发性分区、风险分区或防御等级加强“隐患点+风险区”双控防治体系的建立。四是对于具有观赏价值的自然风化孤石,对其中稳定的孤石,保留其原始自然风貌,可作为地质遗迹供游客观赏;对于欠稳定或不稳定的孤石可采用加固或基座支撑的方式尽可能保留其原始位置,镌刻诗词,书写海洋强国光辉历史(图15)。

5.4 管理韧性提升

万山区海岛孤石遍布,对每一个孤石群或单



图15 万山区典型孤石形成的自然景观

Fig. 15 The natural landscape formed by typical isolated rocks in the Wanshan District

个孤石实施动态监测可能耗费大量的人力、物力和财力,因此可考虑基于孤石的野外实地调查分析评价结果,建立“预警系统-宣传培训-保险机制”的韧性管理防御体系。一是建立海岛孤石灾害风险管理平台(智慧防灾 APP)和应急响应机制,推动风险管理从“人防”向“技防”、“智控”转变,提升孤石灾害防御管理能力。二是加强灾害管理责任人员和海岛游客的宣传培训,提升防范灾害风险意识,在危险区醒目位置设立科普宣传栏和警示标识。三是为了提升海岛游客畅游观光体验,同时为了保障游客人身安全和财产不受损失,海岛旅游部门可主动为上岛游客购买保险,切实增强上岛游客的安全感、获得感和幸福感。

6 结论

(1)万山区海岛孤石的发育与高程关系不大,主要分布在坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 斜坡上。在坡向方面,以外伶仃岛为例,迎风坡孤石具有分布密集、裸露明显、埋深浅、以孤石群为主的特点,且受构造控制作用明显,而背风坡孤石具有分布稀疏、隐蔽性好、埋深较深、零星分布的特点。

(2)万山区海岛孤石的形成主要受地形地貌、风化作用、构造运动和外力侵蚀因素影响。

(3)万山区海岛孤石的失稳模式可分为倾倒-滚落式、牵引-滑移式两种类型。

(4)针对孤石的发育特征、形成机理和失稳模式,设计了针对万山区海岛孤石灾害的“空间管控-生态固石-分级响应”三位一体韧性防治体系。

参考文献:

- 曹权,项伟,王风华,郭龙,李清明.2013.深圳地区花岗岩球状风化体地下分布规律统计分析[J].水文地质工程地质,40(5):87-90+96.
- 陈元芳,蔡岸锋.2021.珠海市万山区山体自然边坡孤石稳定性调查[J].西部资源,(5):15-17.
- 冯龙飞,张堪培.2024.某自然边坡孤石群特征分析及防治工程实践[J].资源信息与工程,39(6):34-38.
- 江贵荣,周燕红,鲁威,耿协威.2019.珠海市孤石调查与防治对策[J].资源信息与工程,34(2):174-176+178.

- 江金进,刘佳,江山,赵风顺,江宁,赖波.2022.珠海凤凰山东南角花岗岩孤石空间分布特征及其对步道工程的影响[J].资源环境与工程,36(1):70-75.
- 江山,廖海斌.2021.花岗岩孤石的空间分布特征及对隧道工程的影响[J].冶金管理,(19):135-136.
- 赖波,刘佳,吴舒天.2021a.基于 ArcGIS 的地质灾害巡查单元划分——以珠海市为例[J].华南地质,37(1):75-82.
- 赖波,刘佳,江金进.2021b.基于 GIS 的珠海市地质灾害易发性评价[J].地质灾害与环境保护,32(1):31-36.
- 赖波,赵风顺,江金进,江山,江宁,李俊生.2023.基于 AHP-信息量法的珠海市地质灾害风险评价[J].华南地质,39(1):147-156.
- 施有志,赵花丽,黄钰琳,林树枝.2019.厦门地区孤石分布规律及对地铁工程的影响[J].地质与勘探,55(3):862-869.
- 唐玲,杨木壮,王银霞,高杨,田松,董迪.2020.粤港澳大湾区海岛空间分布特征探析[J].海洋学研究,38(2):74-80.
- 魏辉球,詹振阳.2021.山体不稳定孤石的预防和治理措施[J].西部资源,(2):95-97.
- 吴海斌.2024.珠海某高陡斜坡孤石稳定性分析评价[J].资源信息与工程,39(4):50-53.
- 杨光.2021.珠海市海岛孤石特征及防治措施[J].西部资源,(3):151-153.
- 张赫,张炜,陈思嘉,杨丹妮,田征.2024.近岸旅游型海岛韧性评价体系构建及空间要素影响机制研究[J].海洋通报,43(5):676-687.
- 张梅梅,温兴平.2022.珠海市板樟山孤石群地质灾害防治施工技术[J].建筑机械化,43(4):45-48.
- 庄明水.2021.厦门岛内孤(滚)石破坏模式及分布规律研究[J].地质灾害与环境保护,32(4):34-38+44.
- Luo X, Chen R X, Ji Y F, Li P L, Ma Z Q, Jiang X M. 2025. Mechanical Properties of Reinforcement Cage Underreamed Anchor Bolts and Their Application in Soft Rock Slope Stabilization[J]. Buildings, 15(3): 319.
- Wu C W, Han X, Li W S, Da Q, Luo J H. 2024. Slope Failure Treatment by Anchor Rod Method at Exit of Tunnel: Case Study in Nanxia Expressway[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 61: 388-395.
- Xiao Y L, Li S T. 2022. Study on Treatment Technology of Rock Slope Landslide of an Expressway in Guizhou[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2185: 012074.
- Zhou J X, Li F, Wang J A, Gao A Q, He C Y. 2022. Stability Control of Slopes in Open-Pit Mines and Resilience Methods for Disaster Prevention in Urban Areas: A Case Study of Fushun West Open Pit Mine[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 879387.