

# 海南台地地貌典型区域地质特征分析

张小飞<sup>1</sup>, 谢文武<sup>1</sup>, 李彪<sup>1</sup>, 谷冠思<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁八局集团有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

收稿日期: 2024年12月6日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月17日

## 摘要

昌江县位于海南岛西北沿海区域, 是典型的滨海台地地貌区, 地质条件复杂多样, 包括海成地貌、台地地貌及其过渡性微地貌单元。区域地层由人工填土层、第四纪海积层和燕山期侵入岩组成, 各层岩性特征显著, 对工程建设影响深远。海成地貌包括现代海岸带地貌和海岸平原, 表现出典型的沉积和侵蚀特征, 其中潮间带和水下岸坡地貌受海洋动力作用影响显著, 对沿海基础设施的稳定性产生直接影响。台地地貌以缓坡低丘为主, 地形较为平缓, 为工程建设提供了良好的基础条件, 但局部区域仍需关注滑坡和水土流失风险。人工填土层稳定性较差, 需强化地基加固。第四纪海积层由于渗透性强、稳定性较差, 对地下水渗透、软化和沉降问题需采取专项措施。燕山期侵入岩层具有较高的承载力, 是核电工程的重要基础, 但需关注局部风化和裂隙带对岩体性能的影响。本研究通过分析昌江县复杂的地质特征, 总结了工程中潜在的地质灾害及其对隧洞、沉管施工和基础设计的影响, 提出了针对性防治策略, 为核电厂的工程设计、施工及长期运营提供科学依据, 确保项目的稳定性和可持续发展。

## 关键词

海南省, 地质特征, 滨海台地, 地质灾害

# Analysis of Geological Characteristics of Typical Terrace Geomorphological Regions in Hainan

Xiaofei Zhang<sup>1</sup>, Wenwu Xie<sup>1</sup>, Biao Li<sup>1</sup>, Guansi Gu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Railway No. 8 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 17<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Changjiang County is located in the northwestern coastal region of Hainan Island and represents a

typical coastal terrace geomorphological area with diverse and complex geological conditions. These include marine, terrace, and transitional micro-geomorphic units. The regional stratigraphy comprises artificial fill, Quaternary marine deposits, and Yanshanian intrusive rocks, each with distinct lithological characteristics that significantly influence engineering construction. The marine geomorphology includes modern coastal and coastal plain features, characterized by typical sedimentary and erosional processes. Notably, the intertidal zones and underwater slopes are strongly influenced by marine dynamics, directly impacting the stability of coastal infrastructure. The terrace geomorphology mainly features gentle slopes and low hills, offering favorable foundational conditions for engineering projects. However, localized risks of landslides and soil erosion require attention. The artificial fill exhibits poor stability, necessitating enhanced ground reinforcement measures. The Quaternary marine deposits, with their high permeability and low stability, require specific measures to address groundwater seepage, softening, and settlement issues. The Yanshanian intrusive rocks, with their high bearing capacity, provide a crucial foundation for nuclear power engineering. However, localized weathering and fracture zones demand attention due to their potential impact on rock mass performance. This study analyzes the complex geological characteristics of Changjiang County, identifying potential geological hazards and their implications for tunnel construction, immersed tube installation, and foundation design. It proposes targeted prevention and mitigation strategies, providing a scientific basis for the engineering design, construction, and long-term operation of nuclear power plants. These efforts aim to ensure project stability and sustainable development.

## Keywords

Hainan Province, Geological Features, Coastal Plateau, Geological Hazards

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

昌江县位于海南岛的西北沿海区域，地处典型的滨海台地地貌区，拥有独特的地质特征和复杂的地质环境(见图 1)。该区域的地质条件对工程建设，尤其是核电厂建设项目的稳定性与安全性具有重要影响。昌江县的地形地貌呈东南高、西北低的倾斜状态，主要由海成地貌和台地地貌两大类地貌单元构成。海成地貌表现出典型的潮间带和水下岸坡特征，具有高渗透性和沉积不稳定性，对基础施工和防水设计提出较高要求[1]，台地地貌则以缓坡低丘为主，地质条件较为稳定，但局部坡地仍需关注滑坡及水土流失风险[2]。

本区域的海成地貌受海洋动力作用影响，形成了潮间带和水下岸坡等特殊地貌单元，对隧道和基础设施的稳定性产生了影响。同时，海岸平原的沙丘与洼地地形，具备较好的渗透性，给地基处理和排水设计提出了挑战[3]。台地地貌则由于构造作用与风化侵蚀共同作用，形成了典型的缓坡低丘地形，虽然地势平坦，适宜开发建设，但部分陡坡地区的滑坡与崩塌风险依然不可忽视。

昌江县场地的岩土层由人工填土层、第四纪海积层以及燕山期侵入岩层组成，各地层的力学特性和水文地质条件对核电厂工程建设有深远影响。例如，人工填土层松散不稳，需特别注意地基加固；而海积层中存在较强的地下水渗透问题，可能引发土层软化、沉降等现象[4]；燕山期的侵入岩层则稳定性较高，但在局部区域仍需防范岩体风化和裂隙影响[5]。

本研究通过现场勘察、钻探数据分析等方法，对昌江县核电厂场地的主要地质单元进行了力学特性

和稳定性评估,并结合工程需求,分析不良地质作用(如地下水渗透、滑坡及地震液化)对隧道施工、沉管安装和基础设计的潜在影响。研究成果为核电厂的地基加固、防渗处理及滑坡防控提供科学依据,确保工程的安全性和可持续发展。此外,本研究对滨海台地环境下的工程建设具有重要参考价值。



**Figure 1.** Changjiang county geological survey area  
**图 1.** 昌江县地质勘察区

## 2. 昌江县滨海台地地貌区域地质条件

昌江县所辖沿海区域属于典型的滨海台地地貌,场地的海拔最高为 42 米,地势总体呈东南高、西北低的倾斜态势。根据地貌成因及工程相关性,可将本区域地貌划分为海成地貌和台地地貌两大类,各类地貌特征对核电厂的工程建设具有不同影响。根据地貌成因,该区域的地形可划分为以下两大类地貌单元:海成地貌和台地地貌,各类地貌特征对核电厂的工程建设具有不同影响。

其中,海成地貌包括现代海岸带地貌和海岸平原[6]。现代海岸带地貌细分为海滩地貌和水下岸坡地貌。海滩地貌是高潮时被淹没、低潮时露出水面的潮间带区域,主要分布在靠近陆域的地段[7]。水下岸坡地貌位于潮线以下,是波浪作用明显的水下坡地,分布于远离陆域的区域,海拔高程在-21.15 米至 0.5 米之间。

海岸平原地貌形成于多次海退过程中砂堤的逐步扩展。该地貌总体地势平坦,缓缓向大海倾斜,常有砂丘和洼地的波状地形,高程约 5 至 10 米,主要分布在勘察区的陆域西北部(见图 2)。



(a) 潮间带 - 海岸线



(b) 台地



**Figure 2.** Photos of site topography and landforms  
**图 2.** 场地地形地貌照片

### 2.1. 海成地貌

海成地貌类型丰富多样，包括现代海岸带地貌和海岸平原，是海洋动力作用与地质过程长期相互作用的结果，展现了区域地貌演化的典型特征。现代海岸带地貌主要由海滩地貌和水下岸坡地貌组成，体现了海洋与陆地交互作用的直接表现。

海滩地貌位于潮间带，是高潮时被海水淹没、低潮时露出水面的区域，主要分布在靠近陆域的地带。它由海浪、潮汐和沿岸流共同作用形成，沉积物以细砂和贝壳碎屑为主。海滩的宽度、坡度和沉积物颗粒大小随季节和海洋动力变化而变化，不仅具有重要的生态功能，为湿地生物提供栖息地，同时也是海岸防护系统的重要组成部分。

潮间带区域高程在 $-2\text{ m}$ 至 $0.5\text{ m}$ ，沉积物以细砂和贝壳碎屑为主，渗透系数约为 $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{ cm/s}$ ，具有高渗透性和低稳定性。这种特性可能引发地基沉降和地下水渗漏问题，特别是在沿海基础施工和隧道防水设计中需特别关注。水下岸坡的坡度范围为 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ，沉积层厚度可达 $15\text{ m}$ ，主要分布于核电厂沿海区域。该地貌区沉积物松散，在海底隧道和沉管施工中易因波浪作用或施工扰动引发土体流动性问题，需采取加强支护和沉积层加固措施。

海成地貌在区域发展中不仅具有重要的工程价值，还承载着丰富的生态功能。现代海岸带地貌作为天然的波浪缓冲区，对沿海建筑物和基础设施起到保护作用；海岸平原地貌则提供了相对平坦的建设用地，但需妥善处理软土特性和潜在积水问题。此外，这些地貌类型蕴藏着丰富的生态系统资源，是保护海岸生物多样性的重要空间，同时为区域发展和生态保护提供了科学依据。

### 2.2. 台地地貌

台地地貌位于场地的东南部，是典型的构造-剥蚀地貌单元，由长期的地壳构造运动与外力侵蚀作用共同塑造而成。该台地区域地形相对平缓，主要由一系列不同标高的缓坡低丘构成，整体呈东北向分布，体现了地貌发育过程中的构造控制特征。

台地的海拔高度在 $13\text{ m}$ 至 $32\text{ m}$ 之间，地势相对较低但起伏和缓，坡度范围为 $5^{\circ}$ 至 $25^{\circ}$ 。较小的坡度说明其地形平坦程度较高，这使得区域内地貌特征适合于植被覆盖，形成了相对稳定的生态环境。同时，台地的平缓特性为地表径流的汇集提供了条件，对地下水的补给和径流特性产生了重要影响。

地形发育受区域地质构造控制，台地边界常沿着断裂或褶皱线分布，这些构造线对剥蚀和堆积作用

起到了主导作用。此外,该台地的缓坡低丘由构造抬升后经长期风化、侵蚀及搬运作用改造形成,剥蚀强度与岩性和坡度密切相关。岩石类型较硬的部分形成残留丘陵,较软的部分则被进一步侵蚀为坡地或洼地。

缓坡区域地质条件较为稳定,适宜工程建设,但局部陡坡区的滑坡潜势较高。根据现场调查,部分陡坡区在暴雨条件下可能发生滑坡或土壤侵蚀现象,需结合实际地形采取削坡减载、植被覆盖或锚杆支护等措施。此外,台地地貌的地表排水较差,需设计完善的排水系统以防止积水和地表沉降对地基稳定性的影响。

### 2.3. 工程建议

根据昌江县滨海台地的地质特点及核电厂建设需求,为有效应对不同地貌区域的潜在风险,确保施工安全性和项目的长期稳定性,建议从以下几个方面着手:

在潮间带和 underwater 岸坡区域,这些区域的高渗透性和松散沉积特性对基础施工和防水设计构成显著挑战。为此,建议采用帷幕注浆或隔渗墙技术,降低地下水渗透对地基的影响。同时,根据潮汐变化进行水文地质监测,并设计集中排水系统以缓解渗透水压力。在施工前,可对沉积层进行高压旋喷注浆或碎石垫层加固,以提高土体的抗剪强度和承载力,减少施工沉降风险。施工过程中,应严格控制设备振动对土层的扰动,避免因机械振动引发土体不稳定,并加强水下隧道施工的实时监测,确保支护结构的稳定性和安全性。

在台地区域,地形总体平缓,适合核电厂主体工程建设,但局部陡坡区域存在滑坡风险和排水不畅问题。针对陡坡区域,建议通过削坡减载降低坡体压力,并结合锚杆、抗滑桩或重力挡墙等工程措施增强边坡稳定性。同时,植被恢复和覆盖技术可用于减少坡体侵蚀,提升长时间的坡面稳定性。在缓坡和低洼区域,应优化地表排水设计,利用集中排水沟及渗排管道将径流有效引导,避免积水对地基稳定性的影响。在核电厂主要建筑物区,可对软弱土层采取振冲密实或动态压实处理,同时使用桩基或复合地基技术,以确保基础具备足够的承载能力和抗震性能。

为保证整个区域的施工安全性和长期稳定性,需加强综合管理措施。在设计和施工阶段,应建立实时监测系统,动态监测地下水位、土层沉降及边坡位移情况,并根据施工周期和潮汐变化制定详细的应急预案。同时,可通过数值模拟技术预测地下工程(如隧道与沉管)与地质条件的相互作用,动态调整施工方案以适应地质条件变化。此外,应关注生态保护,在潮间带等敏感区域优先采用生态恢复技术,避免破坏生物栖息地。在排水设计中,结合人工湿地或生态护坡方案,实现工程稳定性和环境保护的双重目标。

## 3. 场地岩体工程地质力学特征

昌江县场地地层呈现出典型的过渡性结构,自上而下依次由人工填土层、第四纪海积层以及燕山期侵入岩层构成。地层的分布与岩性特征为岩体的工程性质和施工稳定性提供了关键的基础数据。以下对该场地的地层与岩性特征进行详细描述与分析,探讨其对隧洞、沉管施工及基础设计的影响。

### 3.1. 研究目的及方法

海南昌江核电厂 3、4 号机组海域排水工程是一项综合性复杂工程,其建设面临着岩体风化显著、节理裂隙发育及水文条件复杂等多重地质挑战。场地岩体的工程地质特性直接影响隧洞稳定性、沉管基础安全及整体施工质量,因此,本研究的主要目的是通过查明场地岩体的风化特征、节理裂隙分布以及岩体力学参数,分析其对工程建设的影响,并结合实际需求优化隧洞围岩支护设计、沉管基础方案及排水措施。本研究还旨在预测施工中可能出现的工程地质问题,例如围岩失稳、地下水渗漏等,通过数据支持制定合理的监控与防治措施,确保工程的安全性与经济性。

为实现上述目标,研究采用了系统化的方法。首先,综合利用已有的地质勘察资料,包括前期阶段

的岩土工程报告，结合设计任务书及施工反馈，梳理核电厂场地的工程地质背景，明确勘察重点与技术难点。在实际勘察中，通过钻探与取样，在隧洞与沉管沿线布置了 44 个钻孔，总进尺达到 1318.2 米，重点获取节理发育区及风化交界带的岩芯样本，用以分析岩体的层理特性及力学参数。此外，为全面了解覆盖层和基岩的物理力学性质，还开展了标准贯入试验、声波测井、单孔波速测试以及孔内电视观测等多种原位测试，直接测定岩体的密实度、完整性及裂隙分布特征。

通过这些系统性的勘察与分析，本研究为核电厂隧洞与沉管施工中的岩体稳定性问题提供了科学支持，并为类似地质条件下的工程建设提供了有价值的参考。

### 3.2. 地层与岩性

昌江核电厂场地的地层结构明显呈层状分布，且具有清晰的分界线，表现为由表及深逐渐过渡的特点(见表 1 和图 3)。每一层的岩性特征对工程施工的稳定性、基础承载力以及后续的地下工程建设都有重要影响。

**Table 1.** Main stratigraphic and sub stratigraphic characteristics and engineering recommendations

**表 1.** 主要地层与亚层特征及工程建议

主要地层	亚层	特征	工程建议
1) 人工填土层(Q4 ml)	——	人工填土层主要分布在弃土场和场道路区域，厚度较薄，顶面标高在-7.61 米至 34.21 米之间。该层岩性为松散至稍密的砂土，部分区域达到中密。填土的主要成分为粉砂和中砂，形成时间较短，通常压实程度较低，缺乏稳定性。	该层的承载力较低，尤其在震动或水流作用下容易发生软化和沉降，对结构物的基础稳定性构成潜在威胁。填土层的存在要求在设计阶段采取有效的地基加固措施，如深基坑开挖或深层加固，以提高其承载能力。
	粉砂层(层号①):	以松散至稍密的粉砂为主，主要分布于海域沉管段。	这类土层渗透性较强，容易受到地下水流动的影响，且土体的稳定性较差，需重点关注其对隧道和沉管施工的影响。
	中砂层(层号①1)	分布于陆域和海域隧洞段，砂粒较为粗大，局部地段较为密实。	该层的土体具有较好的稳定性，适合用于隧道的开挖，但仍需进行适当的加固，尤其是在水流作用较强的区域。
	2) 第四纪海积层(Q4 m/Q3 m)	粗砂层(层号①3)	主要分布于沉管地段，松散至稍密，岩性较为松软。
珊瑚礁混砂层(层号①2)		由珊瑚碎屑和砂粒混合组成，分布在陆域和海域隧洞段，松散至稍密。	该层具有较高的可塑性，易受水流和其他环境因素影响，需在施工中考虑土体的特殊性质，进行相应的加固和稳定处理。

续表

	黑云母花岗岩	主要分布在陆域隧洞段，风化程度从全风化到微风化不等。	岩体的稳定性较高，尤其是微风化至中等风化的部分，承载力较强，适合作为结构物的基础层。
3) 燕山期侵入岩	石英闪长岩	该岩层零星分布于海域沉管段和部分陆域隧洞段，风化程度较强，呈现出强风化至微风化的状态。	尽管该岩层的稳定性较差，但局部区域的岩体仍具备较好的承载能力，适宜采取局部加固措施来提高其稳定性。



(a) 节理面泥质充填



(b) 节理面发育擦痕、阶步



(c) 节理面发育擦痕



(d) 节理面矿物重结晶

**Figure 3.** Mineral filling, scratch, and step development of drilling joint surfaces**图 3.** 钻孔节理面矿物充填及擦痕、阶步发育

### 3.3. 岩体特征

岩体的特征对地下工程的施工稳定性起着决定性作用。昌江核电厂场地的岩体完整性较高，层理清晰，整体承载力较好，但在部分地段仍存在复杂的地质条件，这些因素可能对隧道和沉管施工以及基础设计产生重要影响。因此，深入分析岩体特征，对于保障工程安全、优化施工方案具有重要意义。

在岩体特征分析中，孔内电视技术作为一种有效的地质勘探手段，能够提供清晰的钻孔壁图像，帮助分析裂隙、断层、软弱夹层等地质现象的特征。使用 JL-IDOI(C) 型号的孔内电视仪器(如图 4)，通过  $\varnothing 50$  mm 的高清探头采集图像，具备 1300 万像素分辨率，能够精确测量岩体的倾角、倾向及孔内不同层位的

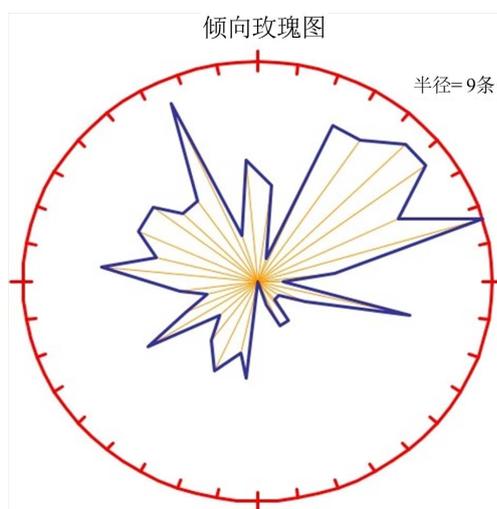
厚度。探头连接高强度抗拉电缆，确保在钻孔过程中的稳定性，配合放线器和三角架确保探头位置准确。仪器通过传输图像和数据，实时显示钻孔壁的地质信息，便于后期分析。

通过采集的图像，进一步对裂隙、断层及软弱夹层等地质现象进行定量分析。利用处理软件，对图像进行编辑并测量各地质现象的倾角、倾向及厚度等参数，结合典型的地质现象图像，为岩体特征的分析提供依据。所有采集的图像和数据经过整理和分析，为岩体稳定性评估、设计方案的制定提供了重要的地质信息支持。



**Figure 4.** JL-IDOI(C) drilling TV  
**图 4.** JL-IDOI(C)钻孔电视

根据风化程度，场地岩体可划分为全风化、强风化、中等风化和微风化四种类型。全风化岩体松散，具有较差的承载力，适合作为基础的持力层必须经过加固或更换。强风化岩体虽然稍密，但其力学性能较差，不适合直接作为施工基础；中等风化和微风化岩体保持了较好的完整性，承载力较高，可以作为建筑物的基础持力层，尤其适合隧道和沉管施工。



**Figure 5.** Joint inclination rose diagram  
**图 5.** 节理倾向玫瑰图

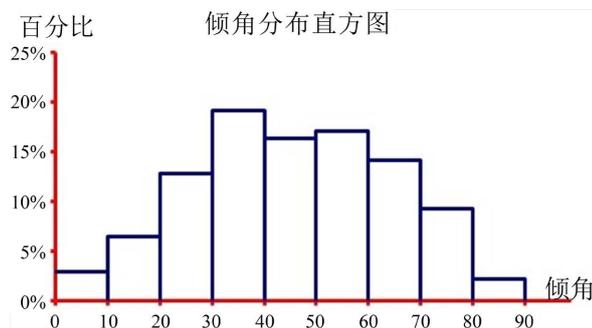


Figure 6. Histogram of joint dip angle distribution  
图 6. 节理倾角分布直方图

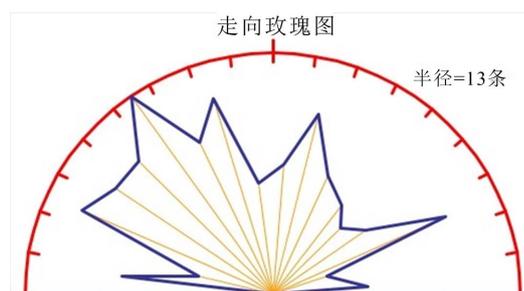


Figure 7. Rose diagram of joint orientation  
图 7. 节理走向玫瑰图

节理和裂隙是影响岩体稳定性的重要因素。昌江县场地岩体普遍存在节理，并且节理的发育程度较高，间距较小，整体呈网状分布，密集度较大(见表 2)。节理和裂隙的主要表现为垂直或倾斜状，裂隙大多数为闭合状态，局部存在充填物(如图 5~7 所示)。尽管节理和裂隙的发育可能影响岩体的整体稳定性，但通过适当的支护措施，如采用锚杆、钢支撑等，可以有效减少节理对岩体稳定性产生的负面影响，确保地下工程的安全性。

Table 2. List of rock mass structure characteristics  
表 2. 岩体结构特征一览表

风化程度	岩体结构类型	主要节理裂隙类型	结构面间距(m)	结构面特征	结构体特征
强风化	散体状或碎裂状	风化裂隙	无法统计	裂隙面起伏粗糙，充填风化次生矿物，见铁锰质浸染	被节理裂隙切割为不规则块体或碎块状，结构松散
中等风化	块状	构造节理为主，部分风化裂隙	无法统计~0.5	发育 2~3 组剪性结构面，多呈闭合~微张、平直(局部粗糙)状态；基本无充填，见铁锰质浸染，充填次生矿物，如钙质、硅质矿物等，部分充填泥质矿物，倾角大多较陡	被节理裂隙切割为不规则块体状；节理密集带部位呈碎块状
微风化	块状	构造节理为主	0.1~1.0	发育 1~2 组结构面，多呈闭合、粗糙、弯曲状态；无充填或少量方解石充填	岩体呈块状

根据前期资料和本次钻探结果，勘察区内结构面主要以节理裂隙为主，延展长度较短，大部分不超过 5 m。勘察区内节理裂隙包括原生节理、构造节理和风化裂隙。强风化岩体中以风化裂隙为主；中等风

化岩体中以构造节理为主，受主构造方向的控制，一般呈带状分布，陡倾角为主，局部呈节理密集带形式分布；微风化岩体中以构造节理为主，陡倾角居多。

根据钻探资料，中风化岩体的节理裂隙多呈微张状态，大部分为铁锰质浸染，充填硅质、钙质等次生矿物，局部充填泥质矿物，结构面的结合程度属结合一般~结合好。微风化岩体的节理裂隙多呈闭合或微张状态，无充填或少量方解石或石英充填，节理裂隙面偶见浸染，结构面的结合程度属结合好。

## 4. 不良地质作用及其影响与防治

### 4.1. 不良地质作用

在昌江县场地勘察过程中，识别并分析了几种典型的不良地质作用，这些作用可能对工程施工和运营阶段的安全性及稳定性产生不利影响。具体包括以下几个方面：

#### 1) 地下水渗透问题

地下水渗透问题，特别是在海域环境中，是昌江县场地勘察中识别的主要不良地质作用之一。由于海洋环境的潮汐、波浪作用以及海平面变化，地下水渗透在砂土层和人工填土层中表现尤为突出。这些土层的渗透性较强，容易在潮汐涨落和波浪冲击的作用下加剧渗水压力，导致土体的颗粒迁移或重新排列，进而可能导致土层软化、地基沉降和结构物变形等问题。特别是对地下结构(如隧道)的影响尤为显著，这可能引发水土压力变化，进而导致工程结构的损坏。为了有效应对地下水渗透问题，推荐采用分区防渗设计，并结合地质条件设置有效的水流控制措施(如帷幕注浆、止水墙等)，从而降低地下水渗透带来的风险。

#### 2) 滑坡与崩塌风险

尽管场地大部分位于相对平坦的海岸台地，部分区域仍存在一定坡度，特别是在坡度较大的地段，边坡稳定性较差。在暴雨期间，地表径流集中，水力侵蚀可能削弱坡体的抗剪强度；同时，地下水的渗透作用会进一步增加坡体的滑动力，导致边坡失稳并引发滑坡或崩塌现象。这类地质灾害不仅可能威胁工程的施工安全，还会对周边的环境和设施造成破坏。因此，在边坡陡峭的区域，建议采取削坡减载、坡面植被覆盖以及抗滑桩支护等工程措施，提高边坡的稳定性。

#### 3) 地震作用隐患

昌江核电厂所在区域的地震活动总体较为平缓，但极端地震事件仍不能完全排除。软土层和风化岩层在强震作用下可能发生液化现象，这种现象通常表现为土层的强度和承载力急剧降低，导致地基失稳或建筑物倾斜沉降。此外，液化还可能诱发局部地表变形，如喷砂、冒水等，进一步加剧结构物的受损风险。为有效降低地震作用带来的不良影响，建议对液化潜势较高的区域进行地基加固，如采用换填土、振冲密实或高压注浆等方法，同时在设计阶段充分考虑抗震规范要求，确保结构物具有足够的抗震性能。

### 4.2. 工程影响及防治

地下水渗透问题是昌江县场地的主要挑战之一，尤其在海域环境中，由于海水潮汐变化、波浪作用及地下水的流动，地下水渗透对土层稳定性产生较大影响。在砂土层和人工填土层中，土层渗透性较强，可能引发土体软化、地基沉降甚至结构物变形。为有效防止地下水渗透带来的负面影响，建议对场地进行详细的水文地质勘察，确定地下水流动路径和渗透区域，并设计针对性防渗措施。例如，采用高密度土工布、注浆加固以及设置防渗墙等手段，切断水流通道，确保地基和地下结构的稳定性。此外，隧道和地下设施施工时，应特别关注防水层设计，确保结构的防渗能力，避免后期水渗漏对工程的影响。

滑坡和崩塌现象多发生在坡度较陡的区域。特别是在暴雨期间，地表径流和地下水渗透的双重作用会进一步加剧边坡不稳定，导致滑坡或崩塌的发生。在昌江县场地，局部地区尽管整体地形平坦，但部

分区域坡度较大,受暴雨或地下水影响,可能出现边坡失稳现象。因此,针对这些风险较高的区域,建议进行详细的坡体稳定性评估,并采取削坡、减载、坡面植被恢复等手段提高边坡稳定性。同时,应避免在降雨季节进行大规模土方开挖,以减少边坡滑动的风险,必要时可通过加固支护结构,如锚杆、抗滑桩或挡土墙等措施增强边坡的承载力。

地震作用是昌江核电厂所在区域可能面临的潜在风险。虽然该区域地震活动较为平缓,但极端地震事件的发生无法完全排除,特别是在软土和风化岩层区域,强震可能诱发液化现象,导致地基承载力迅速下降,建筑物可能发生倾斜或沉降。针对这种情况,建议对潜在的液化区域进行深入的土层分析,并在设计阶段采取有效的加固措施,如换填土、振冲密实或注浆固结等技术,强化土壤的抗液化能力。在抗震设计中应充分考虑液化效应,选用适合的基础类型(如桩基或深基础),确保地基稳定性和结构的抗震能力。

## 5. 结论

本研究通过对昌江县滨海台地地貌和地质条件的综合分析,评估了该地区的地质特性对核电厂建设的影响,并提出了相应的工程建议。主要结论如下:

1) 地貌特征与工程影响:昌江县的地貌分为海成地貌和台地地貌,海成地貌具有高渗透性和沉积不稳定性,对基础施工和防水设计提出了较高要求。台地地貌地质条件较为稳定,但部分陡坡地区存在滑坡风险,需要特别关注。

2) 岩土层特性与施工影响:昌江县场地的岩土层主要由人工填土层、第四纪海积层及燕山期侵入岩层组成。人工填土层松散不稳,需加固处理;海积层存在地下水渗透问题,可能导致土层软化和沉降;燕山期的侵入岩层相对稳定,但部分区域仍需防范风化和裂隙问题。

3) 工程风险与防治建议:潮间带和水下岸坡区域具有较高的渗透性和不稳定性,建议采用帷幕注浆或隔渗墙技术进行地基加固,并进行水文地质监测;台地区域存在滑坡风险,应采取削坡减载、锚杆支护等措施增强边坡稳定性。软土区域可通过振冲密实、动态压实处理提高基础承载力。

4) 施工安全与监测建议:为确保施工安全性,建议在施工过程中建立实时监测系统,监测地下水位、土层沉降及边坡位移情况,及时调整施工方案。此外,应关注生态保护,避免破坏潮间带等敏感区域的生态系统。

综上所述,昌江县场地的地质环境具有一定的建设优势,但也存在多种挑战。为了确保核电厂建设项目的顺利进行,必须针对地质条件提出针对性的设计和防治措施,尤其是在地基加固、防渗处理及滑坡防控等方面,做到预见性处理和精确设计,以确保工程的安全性、稳定性和环境可持续性。

## 参考文献

- [1] 朱永其,曾成开,冯韵. 东海陆架地貌特征[J]. 东海海洋, 1984(2): 1-13.
- [2] 李炳元,潘保田,韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.
- [3] 朱熹文. 淤泥质吹填土的渗透特性与沉降数值模拟[D]. [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [4] 范敏,黄洁,刘智,等. 基于遥感数据的西南地区第四纪残坡积层分布与利用——以四川省盐源盆地为例[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(S1): 204-208.
- [5] 云平,吴育波,谢盛周. 海南岛燕山晚期典型侵入岩成因矿物学研究及其地质意义[J]. 华南地质与矿产, 2004, 20(4): 1-8.
- [6] 杜军. 中国海岸带灾害地质风险评价及区划[D]. [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [7] 邵超. 海滩-珊瑚礁海岸侵蚀及适应性管理研究[D]. [硕士学位论文]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016.