

东南沿海凝灰岩工程特性与致灾机制研究¹

张泰丽¹, 孙强¹, 曾平², 徐光黎³, 朱延辉^{1*}, 史洪峰¹

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 浙江省浙南综合工程勘察测绘院有限公司, 浙江 杭州, 310030;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: 我国东南沿海地区广泛发育晚中生代燕山期凝灰岩, 受特殊成岩作用与湿热气候影响, 岩体水敏性强、风化劣化显著, 在持续降雨、构造运动及人工切坡等多因素耦合作用下, 滑坡灾害群发频发, 严重威胁区域工程建设与生命财产安全。为系统揭示凝灰岩工程特性与滑坡致灾机理, 本文以东南沿海凝灰岩及典型滑坡为研究对象, 采用野外调查、薄片鉴定、XRD 矿物分析、室内物理力学与水理性质试验, 结合 356 处经现场核查的滑坡数据, 开展区域分布规律、工程特性参数、滑坡发育特征及致灾机制研究。结果表明: 研究区凝灰岩主要集中于浙、闽两省, 受控于断裂构造与火山岩相呈带状分布。凝灰岩矿物组成以石英、伊利石为主, 强-全风化带蒙脱石含量可达 20%~50%, 具有高孔隙率、高含水率、强透水等特征; 水理劣化效应显著, 自由膨胀率最高接近 60%, 全风化凝灰岩软化系数仅 0.30~0.40, 浸水后快速崩解; 力学强度随风化程度呈非线性降低, 全风化至中风化岩体强度差异可达上百倍, 强弱风化界面存在明显力学突变。区域滑坡以全风化浅层土质滑坡为主, 占比 95%, 其余为风化界面蠕变型滑坡与构造控制型岩质滑坡, 空间上集中分布于中低山陡坡及断裂影响带内, 与黏土矿物富集、强度劣化区域高度耦合。研究表明, 凝灰岩滑坡由黏土矿物水敏劣化、风化分层力学突变、软弱夹层与结构面组合、降雨入渗软化共同控制。研究成果可为东南沿海凝灰岩分布区地质灾害风险识别、预警及防治提供重要理论依据与数据支撑。

关键词: 东南沿海; 凝灰岩; 工程特性; 滑坡; 致灾机制

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2026-2-26

Study on the Engineering Geological Characteristics and Disaster-inducing Mechanisms of Tuff in the Southeast Coastal Region of China

Zhang Taili¹, Sun Qiang¹, Zeng Ping², Xu Guangli³, Zhu Yanhui¹, Shi Hongfeng¹

1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

2. Zhejiang Zhenan Comprehensive Engineering Survey and Mapping Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Late Mesozoic Yanshanian tuffs are widely developed in Southeast China's coastal areas. Affected by special diagenesis and humid tropical climate, the rock masses have strong water sensitivity and significant weathering deterioration, leading to frequent grouped landslides under the coupling of continuous rainfall, tectonic movement and artificial slope cutting, which seriously threatens

¹ **基金项目:** 国家重大研发项目 (No. 2024YFC3012605)、“国家地质安全监测预警网运维(南京地调中心)(No. DD20251300213)”项目联合资助。

作者简介: 张泰丽, 1980年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害监测预警与风险评价研究工作。E-mail: 674802878@qq.com. ORCID: 0000-0001-5980-6496.

***通讯作者:** 朱延辉 (1987—), 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害监测预警与风险评价研究工作。E-mail: 63629969@qq.com. ORCID: 0000-0001-6398-2257

regional engineering construction and human life and property safety. Taking tuffs and typical landslides in the area as research objects, this study combines field investigation, thin-section identification, XRD mineral analysis, indoor tests and 356 field-verified landslide data to explore their distribution, engineering properties and disaster-inducing mechanisms. The results show that tuffs are mainly zoned in Zhejiang and Fujian Provinces, controlled by fault structures and volcanic lithofacies, mainly composed of quartz and illite, with 20%~50% smectite in highly to completely weathered zones, showing high porosity, high water content and strong permeability. They have significant hydraulic deterioration (maximum free swelling rate nearly 60%, softening coefficient of completely weathered tuff 0.30~0.40) and nonlinear mechanical strength attenuation with weathering degree. 95% of regional landslides are shallow soil landslides in completely weathered strata, concentrated in middle-low mountain steep slopes and fault-influenced zones. Tuff landslides are jointly controlled by clay mineral water-sensitive deterioration, weathering interface mechanical mutation, weak interlayer combination and rainfall infiltration softening. The findings provide theoretical and data support for geological hazard risk identification, early warning and prevention in the area.

Keywords: Southeast coastal region; Tuff; Engineering characteristics; Landslide; Disaster-inducing mechanism

我国浙、闽等东南沿海地区晚中生代火山活动强烈，广泛发育大面积燕山期火山岩地层，其中凝灰岩分布最广（邢光福等，2026）。受成岩机制控制，凝灰岩兼具火山岩与沉积岩双重属性，在区域构造运动、干湿循环、降雨及人工切坡等多因素耦合作用下，极易触发大规模、高危害滑坡灾害（卢游等，2017；黄雨等，2025；罗森林等，2025；张进等，2025；王剑紫等，2026）。例如，2015年浙江丽水里东村滑坡，体积逾30万 m^3 ，造成38人死亡失踪；2016年遂昌县苏村滑坡，体积逾40万 m^3 ，造成28人死亡失踪，以及下个寮、山早村、下半岭等一系列群发性灾害，均对人民生命财产安全构成严重威胁（吴益平等，2009，栗倩倩等，2022）。因此，系统开展东南沿海凝灰岩工程特性及致灾机制研究，对区域重大地质灾害风险防控具有关键理论支撑与工程指导意义。

东南沿海凝灰岩受矿物组分与成岩环境控制，发育多样微观结构与构造，表现出强吸水性、软化性、膨胀性、崩解性等劣化特性，显著加速岩体风化进程（张晨阳等，2018；谭宏大等，2018）。同时区域构造运动剧烈，岩体破碎、节理裂隙高度发育（韩帅等，2022；孙丽影等，2024；徐登财，2025）。在长期冷热交替、干湿循环作用下，形成巨厚破碎软弱风化堆积体，为滑坡孕育提供了充足物源与变形动力条件（王华俊等，2023，杨劲松等，2025；刘智琪等，2026）。可见，凝灰岩工程特性是揭示其滑坡致灾规律的核心科学问题，是开展灾害机理分析、监测预警与防治工程设计的理论基础。

自20世纪20年代起，国内外围绕凝灰岩开展了大量研究，其中尤以中国东南沿海的强风化凝灰岩为关注重点。吴益平等（2009）指出厚层、分层明显的凝灰岩风化壳是降雨型滑坡主要孕灾载体；胡瑞林等（2004）证实其在湿热环境下易转化为黏土矿物，表现出软化、崩解、泥化特性；邓涛等（2022）揭示了干湿循环导致的微观结构破坏与宏观强度劣化机制。现研究存在三方面局限：一是尺度单一，多基于单个滑坡或局部区域，缺乏区域规律性总结；二是因素分析片面，未充分耦合岩体结构组合、区域构造等关键因素；三是劣化机制缺乏微观与宏观的定量关联，难以支撑不同类型、环境下的区域灾害精准防控。

因此，本文针对东南沿海工程特性及致灾机制研究存在的不足，通过系统收集东南沿海地区凝灰岩基础地质及滑坡资料，基于火山历史演化分析、统计、薄片鉴定、物理力学水理性质测试分析等方法，揭示凝灰岩多重劣化特性控制滑坡的时空发育机制，为地质灾害风险预警提供科学有效的理论支撑。

1 研究区凝灰岩分布特征

东南沿海凝灰岩广泛分布，出露总面积为14851km²，占比约5.27%，其中浙江省与福建省出露凝灰岩面积最大，分别占到东南四省总凝灰岩出露面积的44%和39%，江西省为11%，凝灰岩出露面积最小的为安徽省，仅占到6%（图1-1）。在空间上，凝灰岩主要集中于江绍断裂及政和-大埔断裂以东地区，以西地区面积较小且分布分散，多构成盆地式分布。凝灰岩分布特征与火山构造、岩相组合、喷发旋回等密切相关（汪新庆等，2010）。区内凝灰岩主要形成于中生代白垩纪、侏罗纪的英山质、安山质和流纹质熔结凝灰岩，其中浙闽东南区以钙碱性岩系列为主，岩石组合以英安质-流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩为主；赣中、赣东北以碱性玄武岩系列为主，部分为钙碱性系列安山质-粗面质-英安质凝灰岩、熔结凝灰岩（图1-2,1-3）。

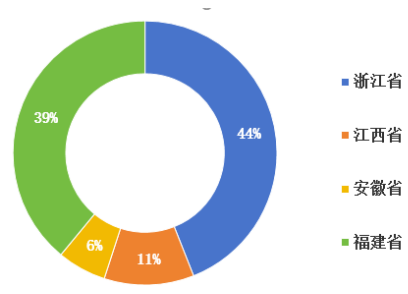


图1-1 东南沿海各省凝灰岩分布面积

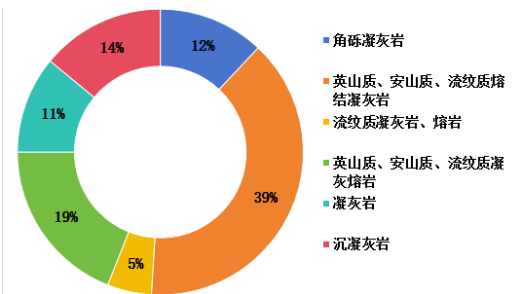


图1-2 东南沿海各凝灰岩岩性分布面积

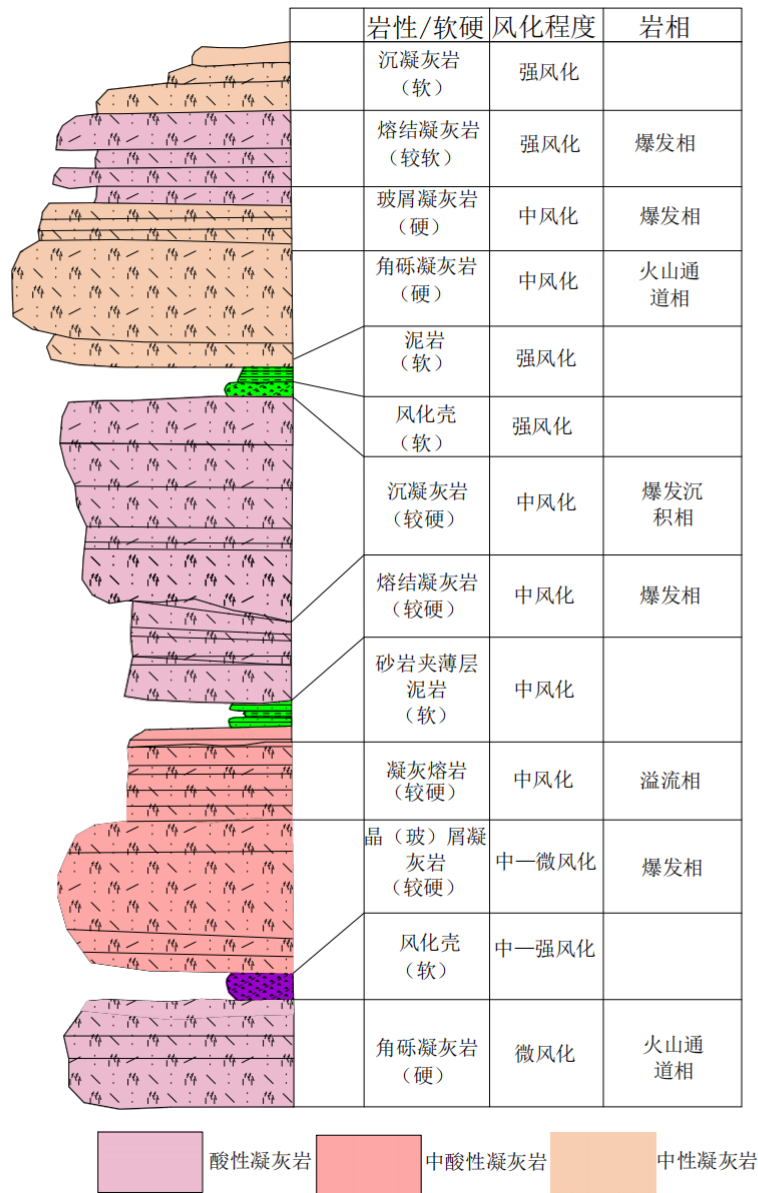


图1-3 东南沿海地区凝灰岩地层岩相分布模式图

2 凝灰岩工程特性研究

本章聚焦矿物组分与微观结构如何主导凝灰岩多维度工程劣化的核心科学问题，通过样品系统采集、薄片鉴定、XRD 矿物测试及室内物理-力学-水理系列试验，从微观矿物结构、物理参数、力学强度、水理劣化四个维度，揭示不同风化等级凝灰岩高含水、高孔隙、强软化、强膨胀崩解的内在成因，建立微观物质组成与宏观工程劣化的对应关系，为滑坡致灾机理分析提供试验基础。

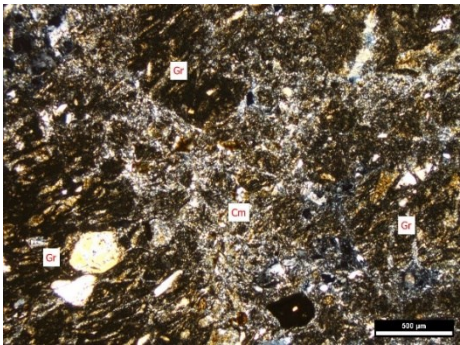
2.1 样品采集原则

本研究采取了30组凝灰岩样品开展粉晶XRD衍射实验，44组样品进行常规物理性质试验。采样主要基于地貌控制、岩性控制、风化分级控制、灾害代表性四大原则。空间上：取样点主要分布于断裂带东西两侧、中低山 / 丘陵主要地貌单元，同一斜坡单元不同位置；岩性上：涵盖研究区主流流纹质、英安质、安山质凝灰岩及熔结凝灰岩等主要类型；风化上：按全风化、强风化、中风化、微风化分级配套取样；灾害

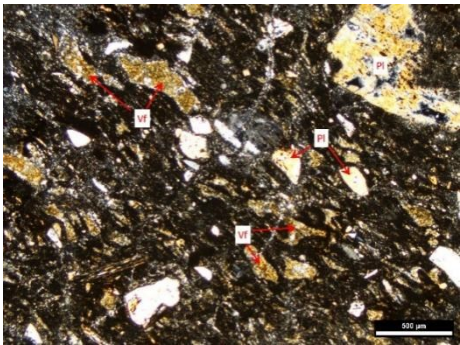
代表性：优先在滑坡灾害高发的岩性发育区。样本涵盖了东南沿海凝灰岩主要成因、岩相、风化类型与工程地质环境，试验数据能够反映区域整体凝灰岩工程特性规律，而非局部单点、小范围特例，支撑全文机理分析与结论的普适性。

2.2 微观性质

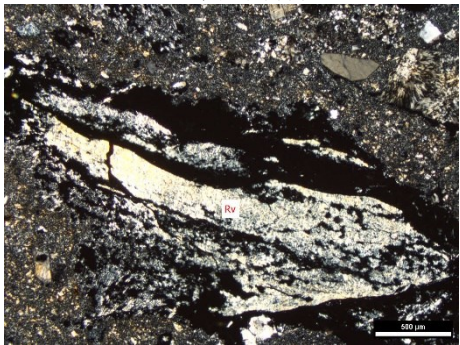
通过对研究区不同类型凝灰岩取样进行薄片鉴定（图2-1），结果显示：凝灰岩普遍含有晶屑、玻屑，二者含量因岩性不同存在差异，大致范围为20%~70%。晶屑主要由钾长石、石英、斜长石、黑云母组成，呈棱角状；当岩石受到压（扭）性构造作用影响时，晶屑多表现为典型的崩裂形态。玻屑多经脱玻化作用转化为隐晶长英质，并伴随强粘土化（水云母化）现象，导致玻屑原有形态趋于消失，凹面棱角状玻屑难以观察到。不同岩性的凝灰岩所含其他矿物（火山角砾、火山碎屑、岩屑及正常沉积物）含量存在差异；玻屑和晶屑的长轴大体呈定向排列，矿物颗粒之间主要通过火山灰填充联结。由于凝灰岩岩相存在差异，岩石内部矿物成分及含量差别较大，进而导致岩性差异显著。



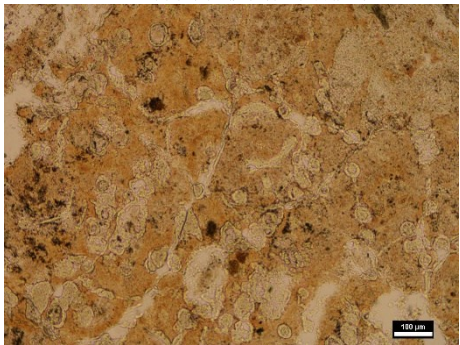
(a) 碎裂结构构造



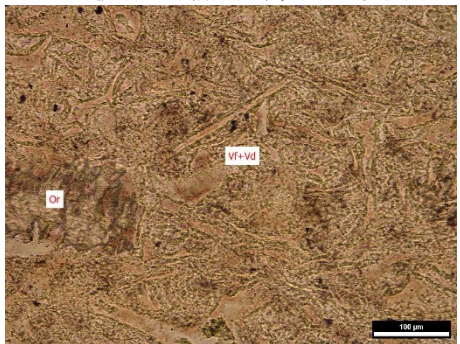
(b) 晶屑和玻屑定向排列



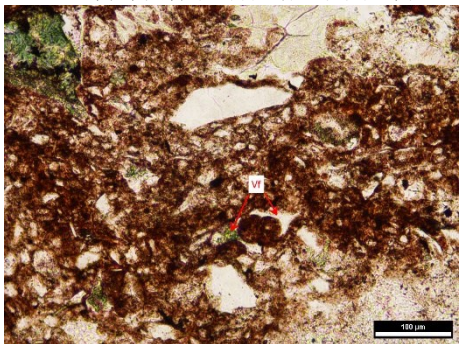
(c) 被绢云母彻底交代的撕裂状玻屑



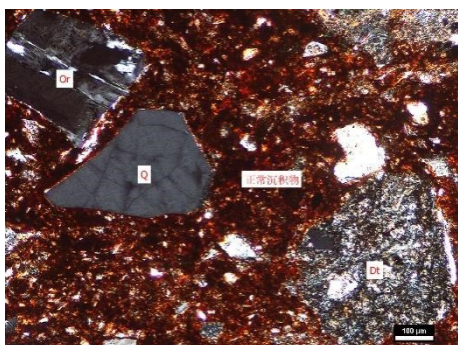
(d) 内部发育小而稀气孔的浮石碎块



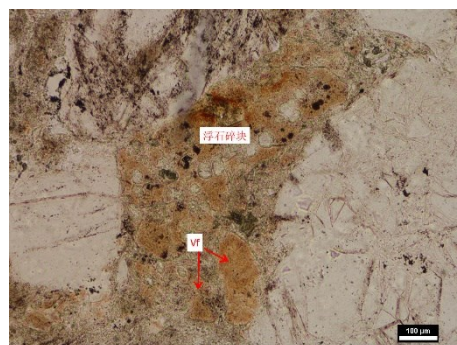
(e) 玻屑呈凹面棱角状，由火山尘充填



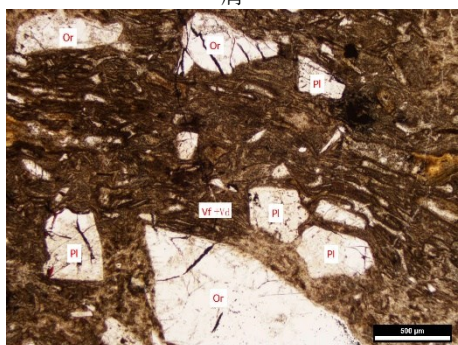
(f) 呈凹面棱角状的玻屑



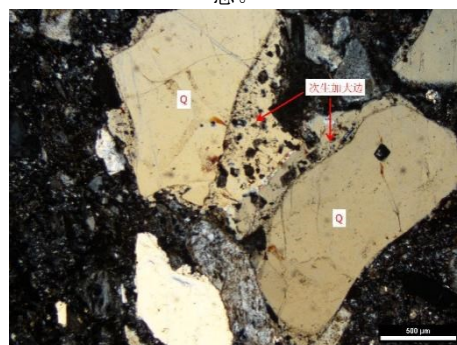
(g) 与粉砂粒度严重不协调的次棱角状岩屑、石英和钾长石晶屑



(h) 浮石碎块中气孔小而稀，呈不特征的玻屑形态。



(i) 晶玻屑熔结凝灰结构



(j) 石英晶屑普遍发育次生加大边

图 2-1 凝灰岩电镜下照片

为分析凝灰岩全岩矿物成分及含量，本研究完成了30组粉晶XRD衍射实验，实验结果见图2-2。结果表明：不同风化程度的晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩、晶屑玻屑凝灰岩、熔结凝灰岩中，主要矿物成分为石英和粘土矿物，含少量长石，个别岩样含极少量方解石和闪石；其中石英含量高达30%~70%，其次为伊利石（8%~32%），强-全风化凝灰岩中可见蒙脱石（20%~50%）。伊利石具有较强的吸水性，易风化、易崩解；蒙脱石是火山凝灰岩等火成岩在碱性环境中蚀变形成的膨润土主要组成部分，二者均对岩体强度、抗风化能力、耐崩解性、软化性及强度劣化产生显著影响。凝灰岩风化程度越高，粘土矿物含量越多（图2-3），其中熔结凝灰岩风化物的粘土矿物含量最高。

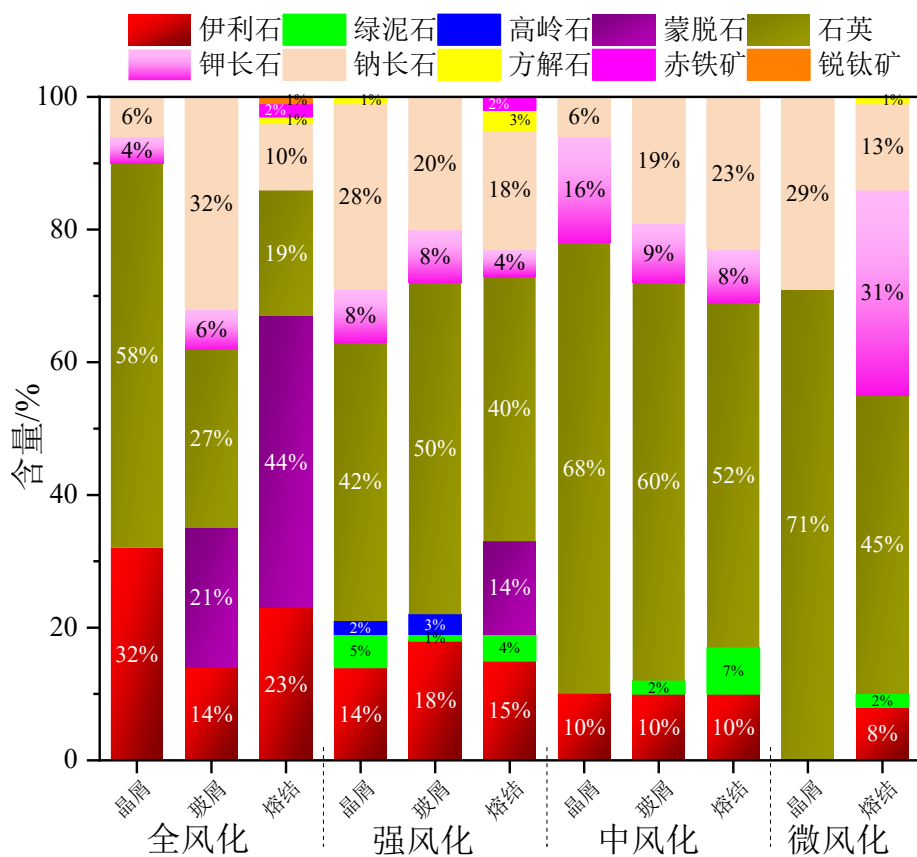


图 2-2 凝灰岩各矿物成分含量图

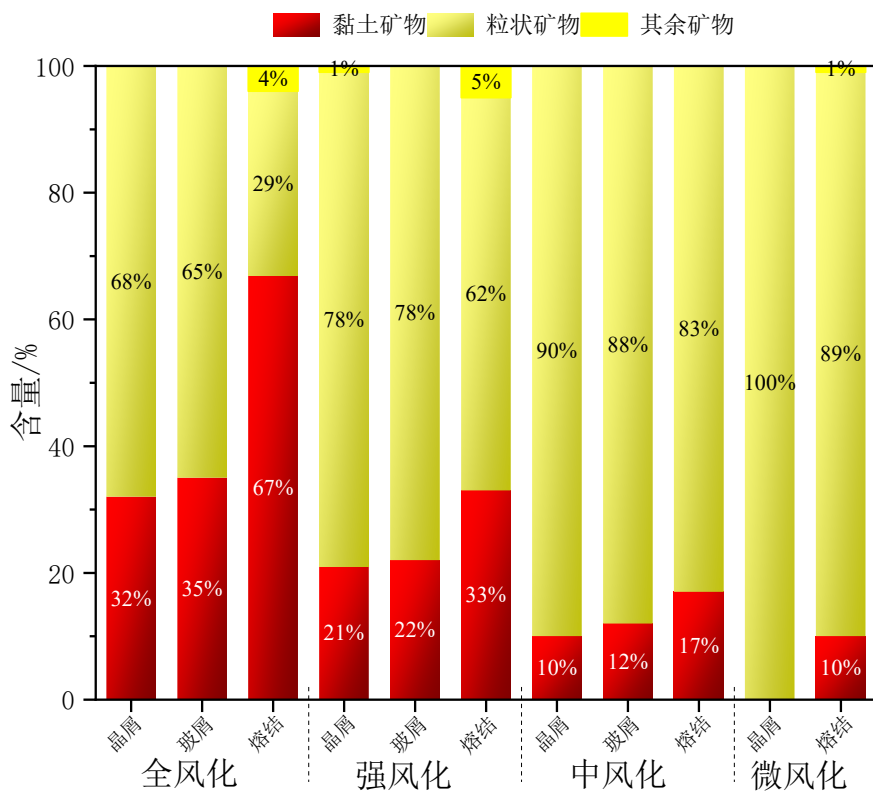


图 2-2 凝灰岩黏性矿物、粒状矿物、方解石成分含量图

2.3 物理性质

岩石物理性质是由岩石固有物质组成和结构特征决定的基本属性，主要包括块体干密度、湿密度、含

水率、孔隙率等。本研究选取研究区内典型凝灰岩44组样品进行常规物理性质试验，结果显示：凝灰岩风化物湿密度为 $1.42\sim 1.99\text{g/cm}^3$ （图2-5），干密度为 $1.03\sim 1.64\text{g/cm}^3$ （图2-4），孔隙率为 $14.89\%\sim 48.67\%$ （图2-5），含水率为 $14.8\%\sim 48.3\%$ （图2-6）。可见，凝灰岩具有孔隙率及含水率较大的显著特征。孔隙率的存在为凝灰岩吸水崩解提供了前提条件：当水贯入凝灰岩的孔隙、裂隙中时，细小岩粒的吸水膜会逐渐增厚，引起凝灰岩体积膨胀；由于这种膨胀力具有不均匀性，会使凝灰岩内部产生不均匀应力，导致部分胶结物稀释、软化或溶解，最终引发凝灰岩颗粒破裂解体。

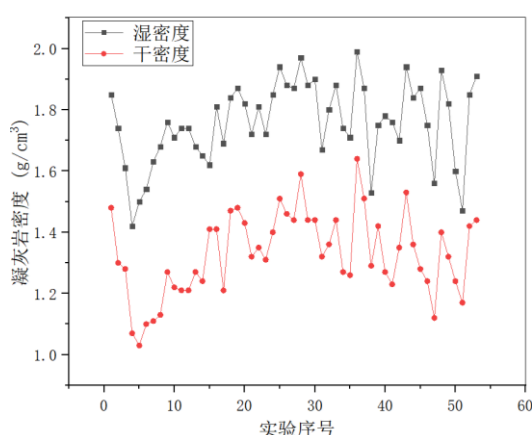


图2-4 凝灰岩密度测试图

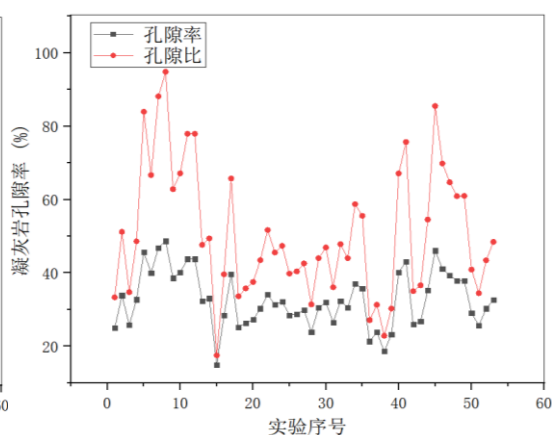


图2-5 凝灰岩孔隙率测试图

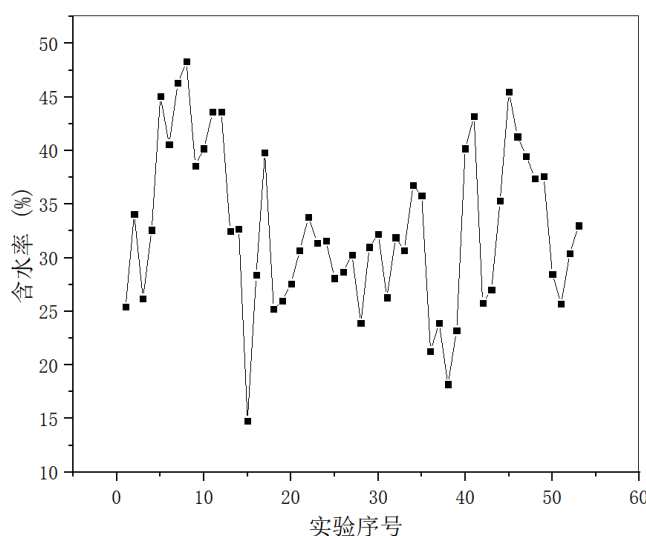


图2-6 凝灰岩含水率图

2.4 力学性质

本研究针对强风化—全风化凝灰岩，采用针贯入仪（日本发明），通过测试反映软岩强度的针贯入指标，推算其单轴抗压强度。测试结果表明：全风化凝灰岩抗压强度为 $0.2\sim 0.8\text{ MPa}$ ，强风化凝灰岩抗压强度为 $0.8\sim 3.5\text{ MPa}$ ，均属于软岩，抗压强度极低。通过点荷载试验测得：中风化凝灰岩抗压强度为 $21.7\sim 67.2\text{ MPa}$ ，微风化凝灰岩抗压强度为 $43.1\sim 69.3\text{ MPa}$ ，均属于较硬岩~坚硬岩（图2-7）。

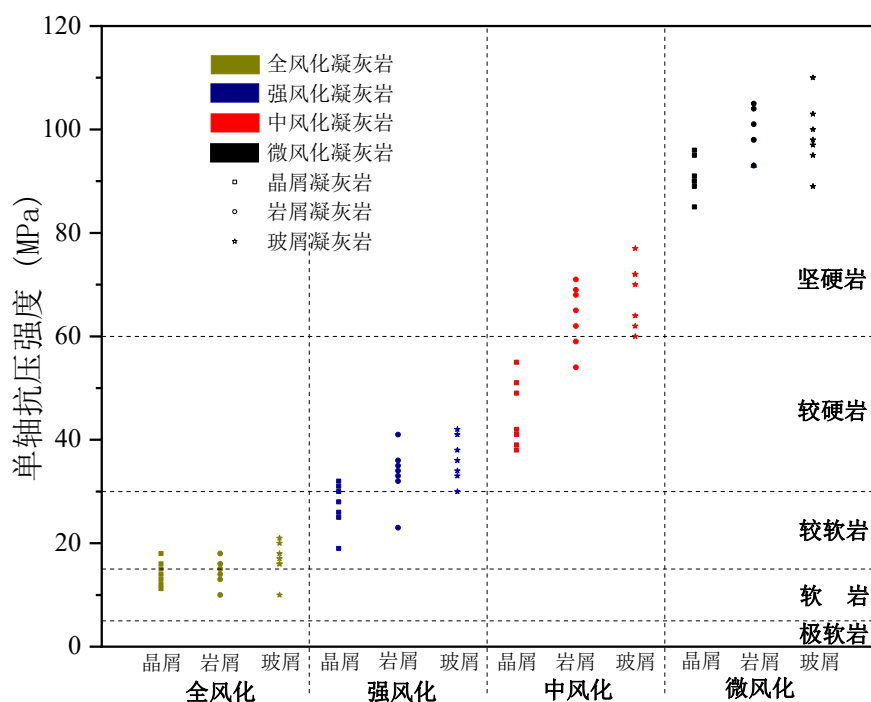


图 2-7 凝灰岩强度分布

2.5 水理性质

岩石的水理特性主要包括吸水性、软化性、膨胀性和崩解性。东南沿海分布的凝灰岩，因其岩相及矿物组成不同，水理特性存在差异，进而影响岩石的力学性质。

东南沿海不同风化程度凝灰岩的透水性差异较大（图2-8）：强-全风化凝灰岩透水率在 3Lu 以上，中-微风化凝灰岩透水率骤降至 $0.3\sim 3\text{Lu}$ 之间，微风化凝灰岩表现出明显的弱透水性，透水率持续保持在 0.3Lu 以下。凝灰岩遇水后易发生软化，从干燥状态到饱和状态过程中，其单轴抗压强度损失可达40%；凝灰岩自由浸水48h后，软化系数均在 $0.30\sim 0.75$ 范围内（图2-9），其中微风化凝灰岩软化系数为 $0.5\sim 0.7$ ，中风化凝灰岩为 $0.4\sim 0.5$ ，强风化凝灰岩为 $0.3\sim 0.45$ ，全风化凝灰岩为 $0.3\sim 0.4$ 。

凝灰岩遇水软化的同时会迅速发生膨胀，其自由膨胀率与初始含水率呈反比关系，即初始含水率越高，自由膨胀率越小（图2-10）；当凝灰岩初始含水率在10%左右时，自由膨胀率最大可接近60%。凝灰岩的膨胀性与其粘土矿物组成及类型密切相关（包括蒙脱石、绿泥石等），主要表现为粘土矿物的粒间膨胀与层间膨胀，进而导致颗粒间胶结作用弱化，片架状粘土矿物发生滑移和膨胀，最终引发崩解。凝灰岩的崩解过程在1小时内基本完成，崩解率为14%~17%，并随时间延长而增加，一般6小时后可实现全面崩解；崩解作用会导致凝灰岩斜坡抗剪强度迅速降低，进而引发滑移失稳破坏（图2-11）。

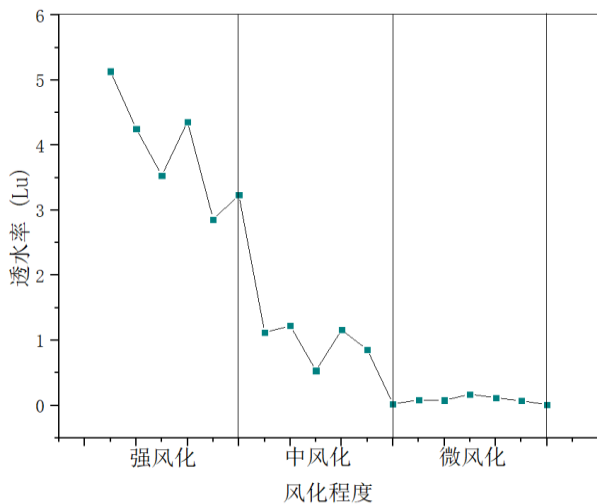


图 2-8 不同风化程度凝灰岩透水性图

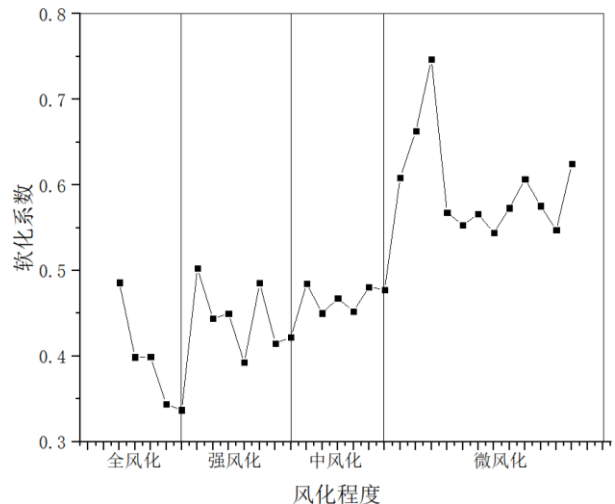


图 2-9 不同风化程度软化系数图

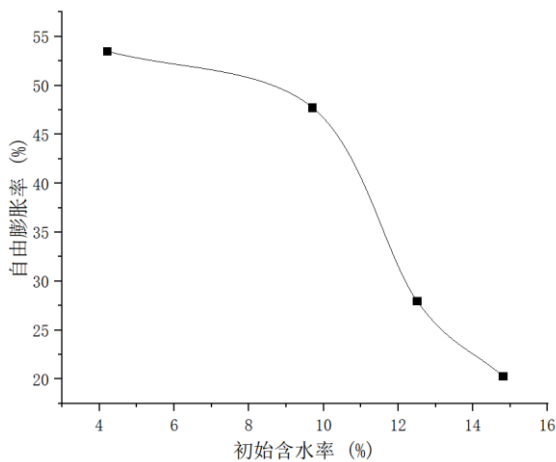


图 2-10 自由膨胀率与含水率关系曲线图

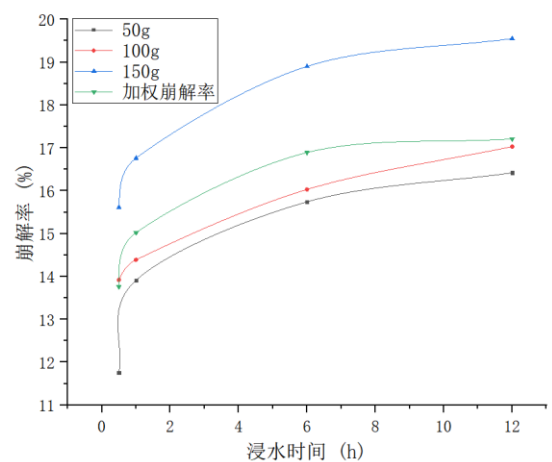


图2-11 不同质量凝灰岩崩解率与浸水时间变化曲线图

2.6 黏土矿物与凝灰岩工程特性相关性分析

前述薄片鉴定与 XRD 测试明确了不同风化程度凝灰岩的矿物组成特征，物理、力学及水理试验获得了岩体宏观工程参数，但微观矿物组分与宏观劣化效应缺乏定量关联，难以支撑黏土矿物主导岩体劣化的机理解释。为此，本节基于研究区配套采样的 XRD 矿物含量与室内试验参数，开展黏土矿物（伊利石、蒙脱石）含量与孔隙率、含水率、软化系数、自由膨胀率及崩解率的相关性统计分析。结果表明：黏土矿物总量、蒙脱石、伊利石含量与凝灰岩孔隙率、天然含水率呈显著正相关，黏土矿物占比越高，岩体原生孔隙与次生微裂隙越发育，储水和导水能力越强；同时黏土矿物含量与软化系数呈显著负相关，蒙脱石、伊利石等水敏黏土矿物占比增大时，岩体遇水软化程度加剧，强度衰减幅度明显提升。

黏土矿物含量与自由膨胀率、浸水崩解率同样表现为明显正相关，强-全风化凝灰岩蒙脱石含量可达 20%~50%，层间吸水膨胀效应突出，促使颗粒间胶结弱化、微裂隙持续扩展，浸水后快速渐进崩解。总体规律显示：风化程度越高，黏土矿物富集程度越高，岩体高孔隙、高含水、高膨胀、低软化系数、强崩解的劣化特征越显著。通过定量相关性分析，建立了微观黏土矿物组分→宏观工程劣化参数的内在关联关系，从定量层面证实黏土矿物水敏蚀变是控制东南沿海凝灰岩物理劣化、力学衰减及水理失稳的核心内因，有效弥合微观测试与宏观工程特性之间的逻辑断层，为后续滑坡致灾机理分析提供定量试验支撑。

3 凝灰岩滑坡发育特征

东南沿海地区凝灰岩分布广、风化强烈、构造发育，加之降雨充沛、人类工程活动频繁，导致滑坡灾害呈高发、群发、点多面广特征。为揭示滑坡发育规律，本文以浙江省丽水市 356 处经现场核查的凝灰岩滑坡为基础，结合区域地质、地形地貌、降雨及工程活动条件，从类型规模、时间分布、空间分布、地质控制因素四方面开展系统分析。

3.1 资料来源与可靠性

本文使用的 356 处凝灰岩滑坡数据来源于浙江省自然资源厅地质灾害数据库、丽水市地质灾害调查评价及应急调查报告、野外实地核查数据及高分遥感解译结果，数据时间跨度为2000–2025 年。所有滑坡点位均经过现场复核、坐标校正、灾害类型判定，剔除重复记录、模糊记录与非凝灰岩区滑坡，确保数据真实、准确、完整、具有区域代表性。

3.2 滑坡类型与规模特征

研究区内凝灰岩滑坡以浅层小型土质滑坡为主，占比约 95%，规模普遍小于 1000 m^3 ，主要由房前屋后人工切坡、全风化层强度劣化及降雨入渗引发，表现为全风化凝灰岩切层或差异风化界面拉裂破坏。约 4% 的滑坡属于强弱风化界面控制型蠕变滑坡，规模多小于 $10\times 10^4\text{ m}^3$ ，滑动面位于强风化与中风化凝灰岩分界面，受力学参数突变控制。危害最显著的为构造结构面控制型中风化岩质滑坡，占比约 1%，规模普遍大于 $10\times 10^4\text{ m}^3$ ，受节理、裂隙、软弱夹层及断裂带控制，具有突发性强、滑距大、破坏力极强的特点。

3.3 时间分布特征

滑坡发生时间集中于每年5–10 月，与区域梅汛期、台汛期高度吻合。全风化土质滑坡主要发生在梅汛期（5–6 月），受持续降雨入渗、土体饱和软化控制；构造控制型岩质滑坡多发生于台汛期（7–9 月），由短历时、高强度降雨触发，表现为骤发型、高位启动特征（图3-1）。

3.4 空间分布特征

滑坡空间分布呈现显著的地质环境耦合性：（1）地貌上：集中于200–600 m 中低山区，坡度 25° – 50° 的斜坡中下部及公路切坡段；（图3-2，3-3）（2）构造上：85% 以上滑坡分布于断裂 500 m 范围内，岩体破碎、节理密集，为滑坡提供结构条件；（图3-4）（3）岩性上：主控岩性为J_{3a}、J_{3b} 流纹质晶屑凝灰岩、熔结凝灰岩，该类岩石黏土矿物含量高、水敏性强、易风化；（4）风化上：滑坡集中发育于全风化–强风化厚度大的区域，与凝灰岩工程劣化区高度重合。

3.5 滑坡分布与工程特性的空间耦合关系

凝灰岩工程特性是控制滑坡空间分布的内在核心因素：（1）蒙脱石、伊利石高含量区 = 滑坡高密度区；强–全风化凝灰岩黏土矿物含量高，吸水膨胀、软化崩解显著，形成大量易滑物源；（2）强度劣化显著区 = 滑坡高发区：全风化、强风化凝灰岩单轴抗压强度低（0.2–3.5 MPa）、抗剪强度弱，与滑坡集中区高度重合；（3）风化分界面力学突变区 = 滑动面集中发育区：强–中风化界面强度骤变，形成天然软弱面，控制蠕变型滑坡分布；（4）高孔隙、高含水率区 = 降雨敏感区：孔隙率大、渗透性不均，雨水易积聚并快速软化土体，是浅层滑坡主控带。由此表明：凝灰岩工程特性的空间差异，直接决定了滑坡类型、规模与空间分布格局。

综上，凝灰岩的矿物组成、风化分带、强度劣化、水理劣化并非均匀分布，其空间差异性与滑坡分布高度耦合，构成了“物质劣化→结构弱化→降雨触发→灾害分异”的内在控制链条。

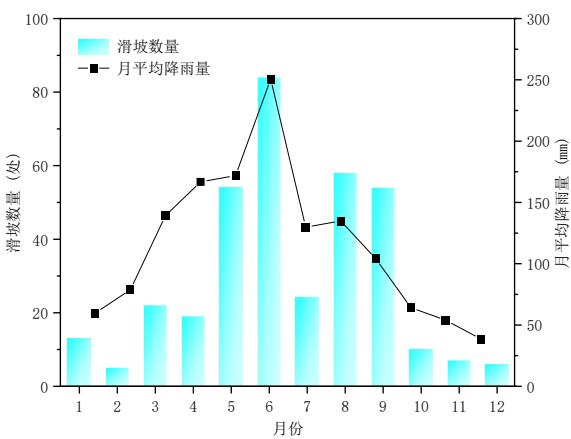


图3-1 滑坡与月平均降雨量分布图

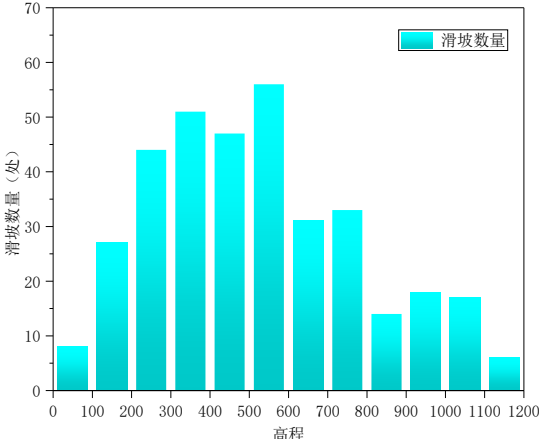


图3-2 滑坡高程分布图

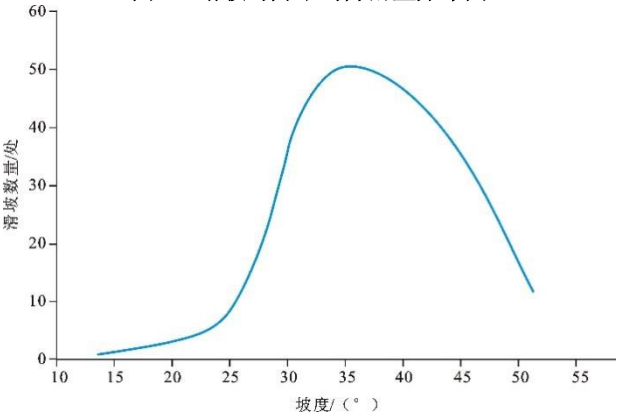


图 3-3 滑坡与地形坡度关系图

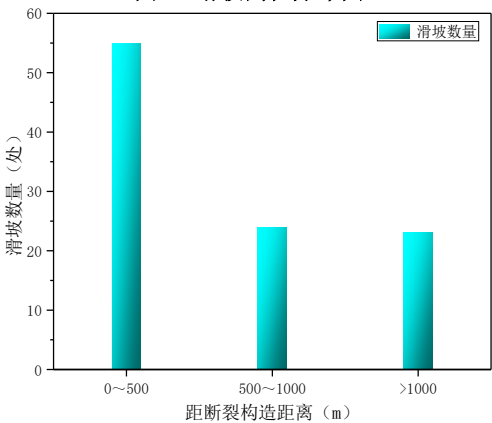


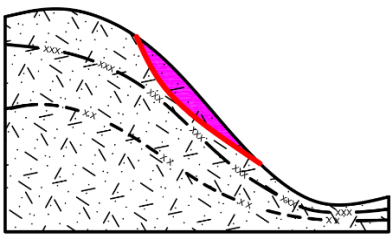
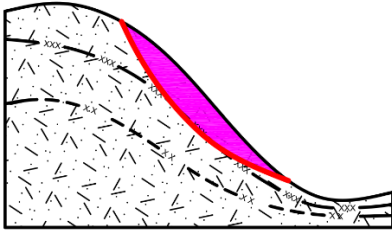
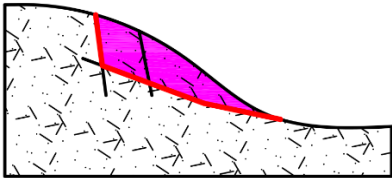
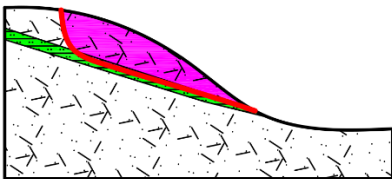
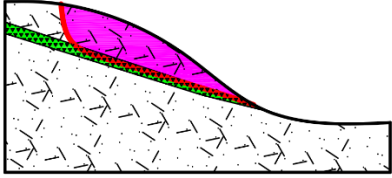
图 3-4 滑坡分布数量受断裂构造影响统计图

4 凝灰岩滑坡成灾模式

基于前文凝灰岩工程特性与滑坡发育规律，围绕不同结构与风化条件下凝灰岩滑坡如何形成差异化成灾模式展开研究，依据滑动面位置、岩土介质类型及结构面控制条件，划分五类典型滑坡破坏模式（见表4-1），厘清各类模式的边界条件、发育场景与主控因素，为后续统一灾机制耦合机理归纳提供类型框架。通过野外调查分析，凝灰岩滑坡按物性主要分为土质滑坡和岩质滑坡两类；按滑动面特征，土质滑坡可分为全风化凝灰岩滑坡（土质滑坡）和强风化~中风化接触面滑坡，岩质滑坡可分为硬质结构面滑坡、软弱沉积岩滑坡、凝灰岩软弱夹层滑坡。东南沿海凝灰岩具有易风化、遇水膨胀快、变形量大、持续时间长等基本属性，在降雨条件下，为风化凝灰岩剪切失稳形成滑坡提供了有利条件；而岩质边坡的破坏模式则取决于结构面的性质和状态。

表 4-1 凝灰岩滑坡破坏模式

滑坡类型	滑动面（带）位置	说明	剖面示意图
------	----------	----	-------

岩土混合滑坡	全风化凝灰岩（土质）滑坡	沿全风化层内部软弱带滑动	全风化层内部具有隔水意义的古土壤层、陡倾的破裂面、振动作用下易液化的层，此类滑坡以小型的塌滑为主，规模一般小于1000m ³ 。	
	风化界面控制型凝灰岩滑坡	沿强风化与中风化凝灰岩接触面滑动	强风化与中风化凝灰岩接触面遇水易被软化形成软弱带（面），当岩层倾角与坡向一致时，滑坡常沿此面滑动，此类滑坡多为蠕动拉裂型为主，规模5000-10000m ³ 不等。	
岩质滑坡	结构面控制型滑坡	沿下伏基岩软弱构造面（节理面、裂隙面、断裂面等）滑动	若下伏基岩结构破碎，构造面发育，上覆岩土层常因自重作用切断基岩，沿硬质结构面滑动，此类滑坡规模一般10万m ³ 以上。	
	喷发间断软弱沉积岩滑坡	沿喷发间断形成的沉积岩活动	喷发间断所形成的沉积岩常表现出层薄，力学性质差等特点，在上覆沿土层的重力作用下沿该层滑动，此类滑坡规模一般10万m ³ 以上。	
	软弱凝灰岩夹层滑坡	沿下伏基岩层间软弱带（面）滑动	斜坡下伏凝灰岩内部的层间软弱夹层，易形成连同上部岩土层整体滑动，此类滑坡规模一般10万m ³ 以上。	

5 凝灰岩工程特性与滑坡致灾机制耦合机理

拟从黏土矿物水敏劣化、孔隙入渗赋水、风化界面力学突变、火山软弱夹层控制、区域构造结构面组合五个层面，揭示多因子逐级作用、耦合联动的滑坡孕育-启动-失稳全过程；建立微观矿物蚀变-细观结构损伤-宏观工程劣化-外部降雨与工程触发的致灾链式机制，实现室内试验特征与野外滑坡发育规律的机理贯通。

5.1 风化凝灰岩矿物-结构劣化为滑坡提供物质基础与先天条件

5.1.1 黏土矿物组成的水敏劣化效应

XRD 测试结果表明：研究区凝灰岩石英含量 30%~70%，伊利石含量 8%~32%；强 — 全风化凝灰岩蒙脱石含量可达 20%~50%。蒙脱石、伊利石为典型高水敏黏土矿物，是凝灰岩工程性质劣化的物质本源。其中，试验测得凝灰岩初始含水率 10% 左右时自由膨胀率接近 60%，高膨胀性使矿物颗粒层间、粒间产生

显著体积胀缩，迫使原生孔隙与微裂隙扩展贯通；同时强风化—全风化凝灰岩软化系数仅 0.30~0.45，饱水后抗压强度降幅超过 50%、黏聚力大幅损失。干湿循环与降雨入渗条件下，黏土矿物反复吸水膨胀、失水收缩，不断弱化颗粒间胶结联结，使完整岩体逐步碎裂为松散风化堆积体，为浅层土质滑坡提供了充足物源。

5.1.2 孔隙结构与透水性控制降雨入渗及内部赋水条件

物理试验显示凝灰岩风化物孔隙率 14.89%~48.67%、天然含水率 14.8%~48.3%，孔隙发育且连通性好；水理试验表明强—全风化凝灰岩透水率大于 3Lu，雨水可快速入渗并在风化层内部、强弱风化界面滞留赋水。高孔隙、高透水特征一方面加速岩体吸水软化与崩解，另一方面形成上层滞水与渗流压力，降低潜在滑移面有效正应力与抗剪强度，是浅层土质滑坡降雨启动阈值的关键控制因子。

5.1.3 崩解特性加速浅表岩土体渐进破坏

试验表明凝灰岩浸水1h内即可发生明显崩解，6h基本完成全面崩解，崩解率随浸水时间持续增长。低软化系数 + 高膨胀性 + 快速崩解三者耦合，使全风化凝灰岩边坡在单次降雨过程中即出现表层剥落、渐进拉裂、整体溜滑，对应区域房前屋后人工切坡诱发的小型浅层土质滑坡发育特征（图5-1~5-4）。



图5-1 全风化熔结凝灰岩滑坡



图5-2 全风化凝灰岩滑坡

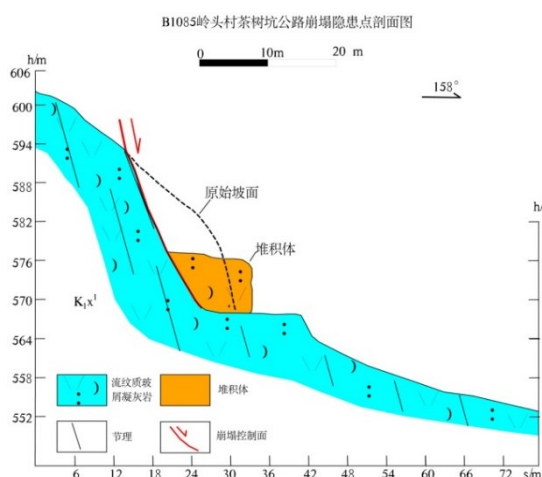


图5-3 风化层内错动带滑坡

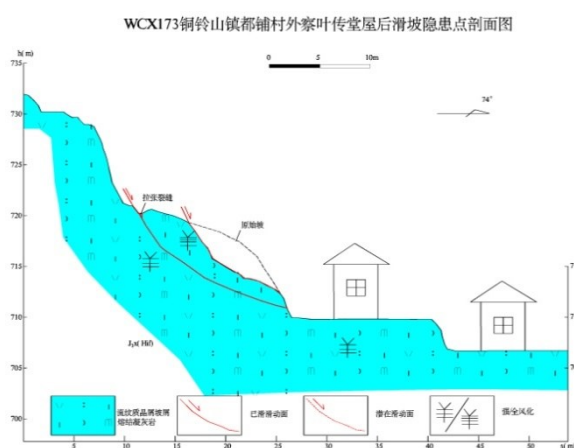


图5-4 差异风化界面控制滑坡

5.2 强弱风化界面力学参数突变控制蠕变型滑坡发育

第 2 节力学试验证实：风化程度对凝灰岩强度具有极强控制作用，全风化抗压强度 0.2~0.8 MPa、强风化 0.8~3.5 MPa，而中风化可达 21.7~67.2 MPa，强弱风化界面存在显著力学参数突变带；同时界面上下透水性差异显著，中—微风化凝灰岩透水率降至 0.3~3 Lu，形成相对隔水层，降雨入渗后易在界面处汇集、长期浸润软化。

结合占比 4% 的风化界面控制型蠕变型滑坡可知：强风化层高孔隙、高含水、低强度，沿与坡向一致的风化界面产生缓慢蠕变变形；水岩作用进一步降低界面抗剪强度，当强度衰减至临界阈值时，由渐进蠕滑转为整体滑动。该类滑坡的孕育过程，本质是试验测得的强度分层差异、透水性分层差异、界面软化系数偏低共同控制的结果。

5.3 火山喷发间断软弱夹层与沉积层控制顺层整体滑坡

东南沿海中生代火山活动具有多旋回、间歇性喷发特征，喷发间歇期形成薄层泥质粉砂岩、凝灰质泥岩等软弱沉积夹层，与凝灰岩呈互层产出。此类软弱夹层本身力学强度极低，且黏土矿物富集、软化效应突出，软化系数普遍处于低值区间。

在自重应力与构造挤压作用下，夹层逐渐压密破碎、结构完整性丧失；降雨沿节理裂隙下渗后，夹层被进一步软化润滑，抗剪参数持续劣化，最终沿软弱夹层发生整体性顺层滑移，对应喷发间断软弱沉积岩滑坡、凝灰岩层间软弱夹层滑坡两类模式。其致灾本质不是表层风化失稳，而是层间低强度介质 + 水岩软化 + 地层产状耦合控制的深层、中大型滑坡。（图5-5~5-7）



图5-5 泥质粉砂岩软弱夹层



图5-6 山早村滑坡

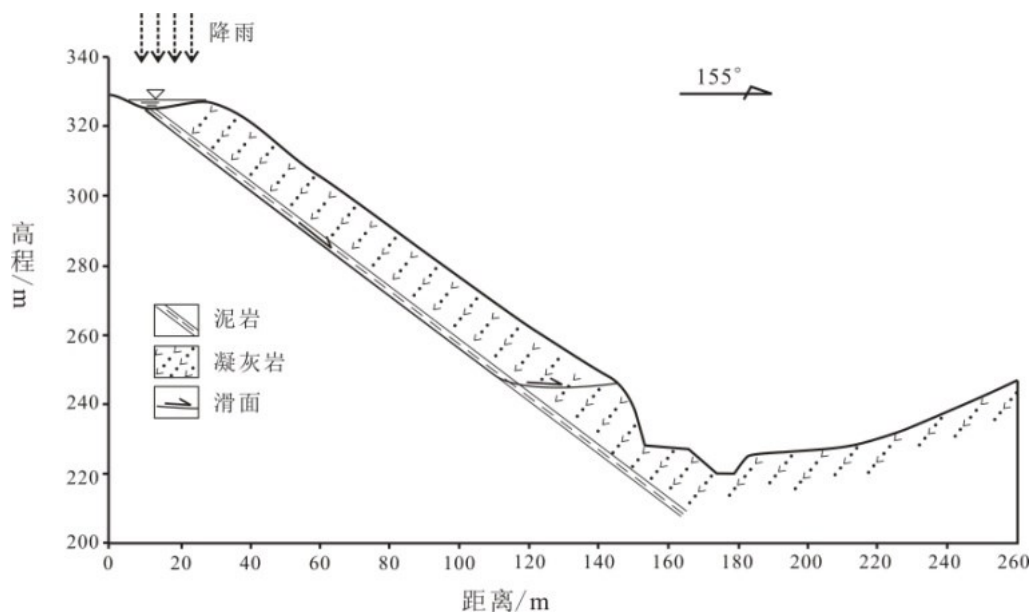


图5-7 凝灰岩软弱夹层控制滑坡

5.4 区域构造与不利结构面组合控制大型岩质滑坡

受太平洋板块俯冲与区域断裂活动影响，研究区江绍断裂、政和一大埔断裂带周边岩体节理裂隙高度发育，被多组结构面切割形成离散块体。占比 1% 的构造控制型大型岩质滑坡多发育于断裂 500 m 范围内，受控于结构面产状组合关系：当结构面倾角小于边坡坡角形成顺向伏倾坡时，结构面与坡面组合构成最不利失稳边界；多组节理交切形成楔形体滑移模式，降雨入渗进一步降低结构面充填物强度、产生静水压力，触发高位、大规模岩质崩塌与滑坡。此类滑坡受表层风化与黏土矿物膨胀崩解影响较小，主要受控于岩体结构面空间组合、构造破碎程度、降雨静水压力，与浅层土质滑坡形成明显差异化致灾机制。（图5-8~5-11）

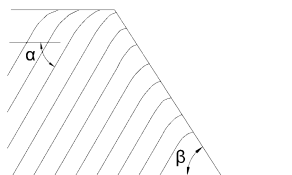
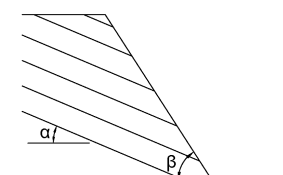
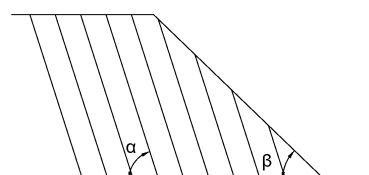


图5-8 逆向坡



a.顺向伏倾坡 $\alpha < \beta$



b.顺向飘倾坡 $\alpha > \beta$

图5-9 顺向坡



图5-10 软弱夹层控制面形成的崩塌



图5-11 节理面为控制面的崩塌

5.5 凝灰岩滑坡致灾链式机制

综合定量试验指标、滑坡发育特征与分类模式，建立东南沿海凝灰岩滑坡完整致灾链条：微观层面：凝灰岩玻屑脱玻化、长石蚀变，生成大量伊利石、蒙脱石等高水敏黏土矿物；细观层面：形成的伊利石、蒙脱石等矿物吸水膨胀（自由膨胀率近 60%），同时软化崩解（软化系数 0.3~0.45），膨胀微裂隙扩展贯通，岩体孔隙率与透水性显著增大；宏观层面：风化分层导致力学强度突变、火山间歇形成软弱夹层、构造作用发育不利结构面；外部触发：梅汛期持续降雨、台汛期暴雨入渗叠加人工切坡卸荷；多要素叠加失稳：按物质条件与结构条件差异，分别形成浅层土质滑坡、风化界面蠕变滑坡、软弱夹层顺层滑坡、结构面控制岩质滑坡四大类灾害模式。

综上，凝灰岩滑坡是矿物水敏劣化—微观结构损伤—工程参数衰减—地质结构控界—降雨与工程活动触发多过程耦合的结果。第 2 节测得的膨胀率、软化系数、强度分级、孔隙透水等定量指标，是解释不同类型滑坡启动条件、发育规模与空间分布差异的核心定量依据，实现了室内试验与野外灾害机理的有效衔接。

6 结论

本文围绕东南沿海凝灰岩矿物—结构—工程劣化—滑坡时空发育的核心科学问题与研究主线，系统开展区域分布、微观结构、工程特性、滑坡特征及耦合致灾机制研究，凝练得到凝灰岩空间分布规律、多维度工程劣化特征、滑坡发育耦合关系及五类成灾模式与链式致灾机理等核心成果，从机理层面解答了凝灰岩多重劣化特性控制滑坡时空发育的内在规律，可为区域地质灾害防控提供理论与数据支撑。

1. 明确了凝灰岩黏土矿物与宏观工程特性的定量关联规律，填补了微观矿物与宏观劣化“两张皮”的研究空白。基于XRD测试与Pearson相关性分析表明，强—全风化凝灰岩中蒙脱石（含量20%~50%）、伊利石（含量8%~32%）与孔隙率（14.89%~48.67%）、崩解率呈显著正相关（相关系数均大于0.7），与软化系数（0.30~0.75）呈显著负相关（相关系数小于-0.65），量化揭示了黏土矿物对凝灰岩工程劣化的主导控制作用。

2. 揭示了东南沿海凝灰岩滑坡多类型分异的主控因素, 提出“矿物水敏劣化—风化界面突变—软弱夹层控制—降雨触发”的耦合致灾新机制。明确区域95%的滑坡为全风化浅层土质滑坡, 其发育与黏土矿物水敏劣化直接相关; 强弱风化界面(强度从0.8~3.5MPa骤升至21.7~67.2MPa)及火山喷发间断软弱夹层的力学突变, 是蠕变型、顺层型滑坡的核心控滑因素, 降雨入渗则是各类滑坡的关键触发条件。

3. 构建了“微观矿物蚀变—细观结构损伤—宏观工程劣化—灾害失稳”的链式致灾模式, 完善了东南沿海凝灰岩滑坡致灾理论体系。明确微观层面玻屑脱玻化、长石蚀变生成高水敏黏土矿物, 细观层面引发孔隙扩展与结构损伤, 宏观层面表现为岩体强度非线性衰减, 最终在降雨与人工切坡叠加触发下, 形成不同类型滑坡, 实现了微观劣化与宏观失稳的机理贯通。

4. 明确了本研究的理论与工程应用价值, 为东南沿海凝灰岩区地质灾害精准防控提供重要支撑。研究建立的黏土矿物含量与工程特性定量关联模型、滑坡耦合致灾机制及链式致灾模式, 可直接应用于区域地质灾害风险识别、监测预警指标设定及边坡工程加固设计, 提升区域地质灾害防控的科学性与针对性。

References

- Deng, T., Liao, J., Wang, C., et al. 2022. Study on shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49(4): 71-80.
- Han, S., Liu, M., Wu, J., et al. 2022. Risk assessment of single slope disaster induced by typhoon rainstorm in the coastal area of Southeast China: A case study of the north slope of Shiyang, Taishun. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 583-595.
- Huang, Y., Mao, W., Guo, Z., et al. 2025. Challenges and countermeasures for the prevention and control of rainfall-induced compound chain landslide disasters in Southeast coastal China under climate change. *Science Foundation in China*, 39(6): 1006-1015.
- Li, Q., Wang, W., Huang, L., et al. 2022. Analysis of lag effect of typhoon rainstorm landslide: A case study of Typhoon Lekima in Qingtian County, Zhejiang Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(6): 10-19.
- Liu, Z., Wu, Q., Wang, L., et al. 2026. A review on the multi-scale mechanisms of rainfall-induced group-occurring landslides in Southeast China under multi-factor coupling. *Earth Science*, 1-24.
- Lu, Y., Jian, W., Wang, L., et al. 2017. Study on physical mechanics and stress-strain characteristics of tuff residual soil in southern Jiangxi. *Safety and Environmental Engineering*, 24(1): 16-21.
- Luo, S., Mao, W., Zheng, G., et al. 2026. Influence of rainfall characteristic differences on the type differentiation and trigger timing of group-occurring landslides. *Earth Science*, 1-18.
- Sun, L., Zhang, H., Qiu, C., et al. 2024. Study on time variability of weight of influencing factors and rainfall threshold of geological hazards in Ningbo. *East China Geology*, 45(2): 218-227.
- Tan, H., Jian, W., Lu, Y., et al. 2018. Study on water-mechanics interaction characteristics of tuff residual soil in southern Jiangxi. *Safety and Environmental Engineering*, 25(1): 18-22.
- Wang, H., Guan, R., Tang, B., et al. 2023. Experimental study on duration of dry-wet and freeze-thaw cycles of saturated tuff. *Bulletin of Science and Technology*, 39(9): 47-52.
- Wang, Z., Zhang, M., Li, G., et al. 2026. Formation mechanism and dynamic characteristics of large-scale tuff landslide induced by typhoon rainstorm. *Safety and Environmental Engineering*, 33(1): 19-29.
- Wu, Y., Yin, K., & Jiang, W. 2009. Study on risk early warning of landslide disasters in Yongjia County, Zhejiang Province. *Journal of Natural Disasters*, 18(2): 124-130.
- Xing, G F., Liu, W Y., Fan F P., et al. 2026. Advances in exploration prediction using alteration minerals in the coastal volcanic belt of Southeast China[J]. *East China Geology*, 47(1): 183-202.
- Xu D C, Zhang T L, Hei L S, Wang Y M. 2025. Study on rainfall threshold of geological disasters based on effective rainfall model in Wenzhou City. *East China Geology*, 46(2): 252-267.
- Yang, J S., Chen, P., Yang, K., et al., 2025. Progress and thought of ground substrate survey from the perspective of Quaternary geology[J]. *East China Geology*, 46(3): 314-327.
- Zhang, C., Zhang, M., Zhang, T., et al. 2018. Influence of intrusive rock vein weathering crust on seepage field and stability of residual soil landslide in Zhonglin Village. *Rock and Soil Mechanics*, 39(7): 2617-2625.
- Zhang, J., Zhang, B H., Zhao, L., et al. 2025. Basement-involved structures: characteristics, styles, mechanism and tectonic settings[J]. *East China Geology*, 46(3): 293-313.

中文参考文献

- 邓涛, 廖军, 王陈宾, 等. 2022. 不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究. 水文地质工程地质, 49(4): 71-80(in Chinese with English abstract).
- 韩帅, 刘明军, 伍剑波, 等. 2022. 东南沿海台风暴雨型单体斜坡灾害风险评价——以泰顺仕阳北坡为例. 地质力学学报, 28(4): 583-595(in Chinese with English abstract).
- 黄雨, 毛无卫, 郭桢, 等. 2025. 气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害防控挑战及应对. 中国科学基金, 39(6): 1006-1015(in Chinese with English abstract).
- 栗倩倩, 王伟, 黄亮, 等. 2022. 台风暴雨型滑坡滞后效应分析——以浙江青田县“利奇马”台风为例. 中国地质灾害与防治学报, 33(6): 10-19(in Chinese with English abstract).
- 刘智琪, 吴琼, 王亮清, 等. 2026. 多因素耦合作用下东南降雨型群发滑坡多尺度孕育机制研究综述. 地球科学, 1-24(in Chinese with English abstract).
- 卢游, 简文星, 王立宸, 等. 2017. 赣南凝灰岩残积土物理力学与应力-应变特性研究. 安全与环境工程, 24(1): 16-21(in Chinese with English abstract).
- 罗森林, 毛无卫, 郑国明, 等. 2026. 降雨特征差异对群发滑坡类型分异与触发时序影响. 地球科学, 1-18(in Chinese with English abstract).
- 孙丽影, 张弘怀, 邱昌骏, 等. 2024. 宁波地质灾害影响因子权重的时变性与雨量阈值研究. 华东地质, 45(2): 218-227(in Chinese).
- 谭宏大, 简文星, 卢游, 等. 2018. 赣南凝灰岩残积土水-力相互作用特性研究. 安全与环境工程, 25(1): 18-229(in Chinese with English abstract).
- 王华俊, 管仁秋, 汤斌, 等. 2023. 饱和凝灰岩干湿-冻融循环时长试验研究. 科技通报, 39(9): 47-529(in Chinese with English abstract)..
- 王紫剑, 张明, 李贵仁, 等. 2026. 台风暴雨诱发大型凝灰岩滑坡形成机理与动力学特征. 安全与环境工程, 33(1): 19-29(in Chinese with English abstract).
- 吴益平, 殷坤龙, 姜玮. 2009. 浙江省永嘉县滑坡灾害风险预警研究. 自然灾害学报, 18(2): 124-130(in Chinese with English abstract).
- 邢光福, 刘文元, 范飞鹏, 等. 2026. 东南沿海火山岩区蚀变矿物找矿预测研究新进展[J]. 华东地质, 47(1): 183-202(in Chinese with English abstract).
- 徐登财, 张泰丽, 黑李莎, 王一鸣. 2025. 基于有效雨量的地质灾害降雨阈值研究——以温州市为例[J]. 华东地质, 46(2): 252-267(in Chinese with English abstract).
- 杨劲松, 陈彭, 杨柯, 等. 2025. 第四纪地质学视角下地表基质调查进展与思考[J]. 华东地质, 46(3): 314-327(in Chinese with English abstract).
- 张晨阳, 张明, 张泰丽, 等. 2018. 侵入岩脉风化壳对中林村残积土滑坡渗流场和稳定性的影响. 岩土力学, 39(7): 2617-2625(in Chinese with English abstract).
- 张进, 张北航, 赵磊, 等. 2025. 基底卷入型构造: 特征、样式、机制与形成环境[J]. 华东地质, 46(3): 293-313(in Chinese with English abstract).
- .