

江阴市崩塌地质灾害分布发育特征与破坏模式

张振国*, 陈刚, 张纪星

江苏省地质调查研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年3月3日; 发布日期: 2026年3月11日

摘要

江阴市经济发达, 人口密度大, 随着经济的高速发展, 出现了一系列地质灾害问题, 在一定程度上制约了城市建设和经济社会的持续发展。本文以江阴市崩塌灾害为研究对象, 结合实地调查, 从区域分布、规模、形态、地层岩性、成因等方面, 分析了区内崩塌灾害的分布发育特征, 总结了崩塌灾害的破坏模式。结果表明: 研究区崩塌主要分布于秦望山、花山等孤山残丘, 由自然与人为因素共同作用形成。崩塌规模均为小型, 危岩体距坡脚高差多小于100 m, 以50~100 m最为集中, 且集中于砂岩等坚硬岩组地层。所有崩塌隐患点均受人工开挖影响, 主要分布在采矿区、山间道路及居民区周边。按破坏形式可分为滑移式、倾倒式和坠落式, 其中坠落式和滑移式为主, 倾倒式较少。

关键词

崩塌, 分布发育特征, 破坏模式, 无锡江阴

Distribution Characteristics and Failure Modes of Rockfall Geological Hazards in Jiangyin City

Zhenguo Zhang*, Gang Chen, Jixing Zhang

Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu

Received: January 27, 2026; accepted: March 3, 2026; published: March 11, 2026

Abstract

Jiangyin City, characterized by its developed economy and high population density, has faced a series of geological hazards during rapid economic growth, which have constrained urban construction

*通讯作者。

文章引用: 张振国, 陈刚, 张纪星. 江阴市崩塌地质灾害分布发育特征与破坏模式[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(3): 311-320. DOI: 10.12677/ag.2026.163029

and sustainable socio-economic development. This study focuses on collapse disasters in Jiangyin City, combining field investigations to analyze the distribution and developmental characteristics of these disasters from perspectives of regional distribution, scale, morphology, lithology, and causes. The results indicate that collapse disasters in the study area are primarily distributed across isolated hills and residual hills, such as Qinwang Mountain and Huashan, formed by combined natural and anthropogenic factors. The scale of collapses is small, with the height difference between hazardous rock masses and slope foot mostly less than 100 meters, concentrated within 50~100 meters, and predominantly occurring in hard rock group strata like sandstone. All collapse hazard sites are affected by human excavation activities, mainly located near mining areas, mountain roads, and residential areas. The failure modes can be categorized into sliding, toppling, and falling types, with falling and sliding being predominant and toppling less common.

Keywords

Collapse, Distribution and Developmental Characteristics, Failure Modes, Wuxi Jiangyin

Copyright © 2026 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

江阴市地处长江三角洲太湖平原北端，北枕长江，是大江南北的重要交通枢纽和江海联运的天然良港。地貌类型以冲湖积平原为主，北部分布有多处孤山残丘。受地质条件复杂、降水时空分布不均等自然条件的影响，加上人类活动带来的破坏作用，区内存在较多的崩塌、滑坡灾害及隐患。区内经济发达，人口密度大，同样规模等级的地质灾害造成的损失和影响普遍大于其它地区[1]。

前人针对研究区及周边地区地质灾害问题开展了一定的研究工作，取得了一系列成果认识。但相关研究主要针对地面沉降等缓变型地质灾害[2][3]，崩塌等突发地质灾害研究则主要从地质灾害气象风险预警[4][5]、防治区划[6][7]等应用层面入手，提出地质灾害防治措施建议，区域地质灾害分布发育规律的认识还不是很多。文章在江阴市 1:1 万地质灾害精细调查工作的基础上，结合近几年的地质灾害“三查”情况，从地形地貌、地质构造、岩土体类型、降雨、人类工程活动等方面详细分析了研究区崩塌灾害发育特征及分布规律，研究成果可为研究区地质灾害防治工作提供地质依据及参考。

2. 地质环境背景

2.1. 地形地貌

研究区位于长江三角洲平原腹地，地形平坦，地面高程一般 3~6 m，仅有少量孤山残丘点缀于平原之上，一般高程 100~200 m，最高的定山主峰海拔 273.8 m，次为花山，海拔 241.2 m，砂山 192.8 m，最小的青山面积不足 0.1 km²，高度 30 m 左右。山体多呈北东向，少数为北西向。

2.2. 地层岩性

研究区属扬子地层区下扬子地层分区，中志留统一晚白垩统地层发育。出露的地层主要为中志留统茅山组，晚泥盆统观山组及晚泥盆统一早石炭统播古台组的石英砂岩、粉砂岩、泥岩等，常组成背斜的核部，构成低山残丘景观，主要见于秦望山-花山-绮山-定山一线和沿江青山-君山-黄山-长山-

线及中部毗山、砂山、乌龟山等处，其它皆为第四系覆盖。区内砂岩出露面积最广，尤以茅山组、观山组为主，是区内主要的易崩岩层。

2.3. 地质构造

根据褶皱、断层及其组合特征和中、新生代沉积构造展布等，研究区可划分为申港凹陷、常澄褶皱束、青阳-锦丰凹陷、锡虞褶皱束四个整体呈北东走向的构造单元，形成“二隆二凹”型构造格局(如图1)。其中常澄褶皱束和锡虞褶皱束由一系列北东的褶皱组成基本轮廓，并伴有大量走向断层。其中背斜的核部多出露地表，形成区内众多北东向的山丘，是区内崩塌灾害的主要发育地带。

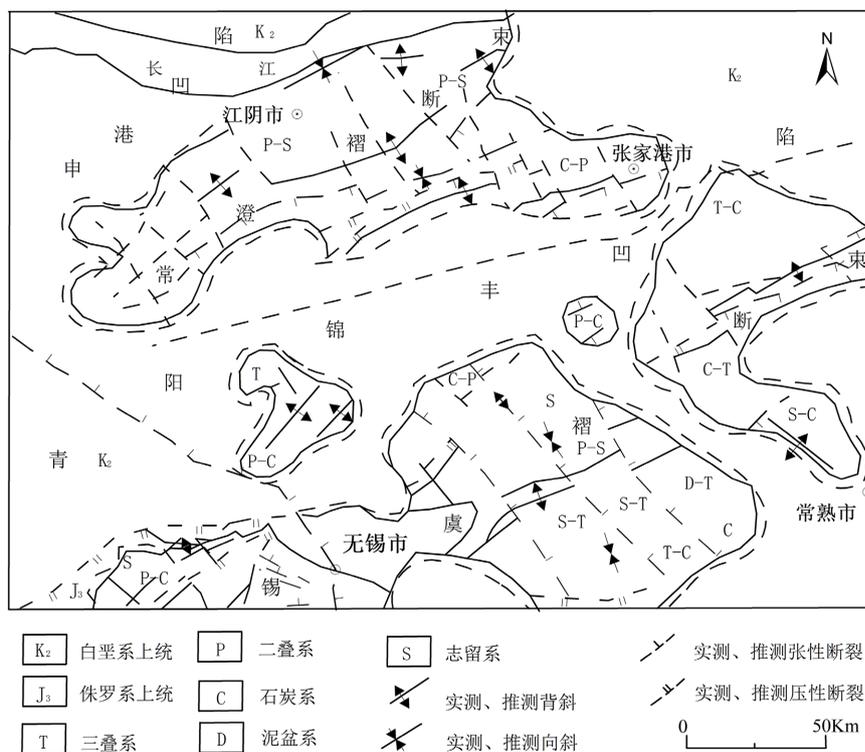


Figure 1. Sketch of the structural features in the study area and surrounding regions (Revised from [8])

图 1. 研究区及周边地区构造略图(修编自[8])

2.4. 气象

研究区属北亚热带季风性湿润气候，四季分明，光照充足，雨量丰沛。年平均气温 15.2℃，历年最高气温 38.2℃，历年最低气温-10.0℃。年平均降水量 1040.4 mm，呈南多北少的降雨趋势，汛期为 6~9 月份，降水量约占全年总降水量的 55%。年平均蒸发量为 1452.8 mm，蒸发量大于降水量。从多年的地质灾害调查资料来看，降雨对区内斜坡变形表现出明显的控制作用，即区内崩塌多发生在汛期的 6~9 月。

2.5. 人类工程活动

江阴市是我国县域经济的排头兵，住房、道路交通等基础设施建设活动频繁，人地矛盾突出，区内切坡(临坡)建房、修路等形成大量边坡。同时，区内建筑用石英砂岩开发利用程度较高，数十年的露天开采，形成大量高而陡的人工开采坡面，对矿区及周边生态地质环境造成严重破坏，为崩塌灾害发育提供了有利条件。

3. 崩塌分布发育特征

3.1. 崩塌灾害分布规律

截至 2025 年, 区内现有崩塌隐患点 34 处[9]。根据研究区现有崩塌隐患点的分布发育特征以及地质环境条件, 研究区可能发生崩塌灾害的区域主要位于秦望山、花山、绮山、砂山、定山、凤凰山、稷山、乌龟山、顾山等孤山残丘(如图 2)。

具体来看, 区内崩塌隐患主要分布在低山丘陵区的采石宕口以及切坡修路、建房形成的人工切坡地段。开山采石等人类工程活动破坏原始山体, 使山体内部应力条件发生改变, 导致边坡上出现大量的卸荷裂隙, 进而形成危岩体(区)。崩塌隐患分布的微地貌多为坡度大于 60° 的陡崖地貌, 陡峭坡面更易受到各种外界营力的侵蚀, 为危岩体的进一步崩落提供了有利的空间条件。崩塌隐患主要分布在石英砂岩和泥页岩互层的软硬岩互层岩组地层中, 硬岩层在出现人工切坡时更易出现张性裂隙, 而软岩层会因为差异风化, 先于硬岩岩层风化剥蚀, 从而形成凹腔[10]。在外界营力的持续作用下, 裂隙不断向下发育, 将岩体逐渐向下切割, 最终在自重影响下发生崩塌。

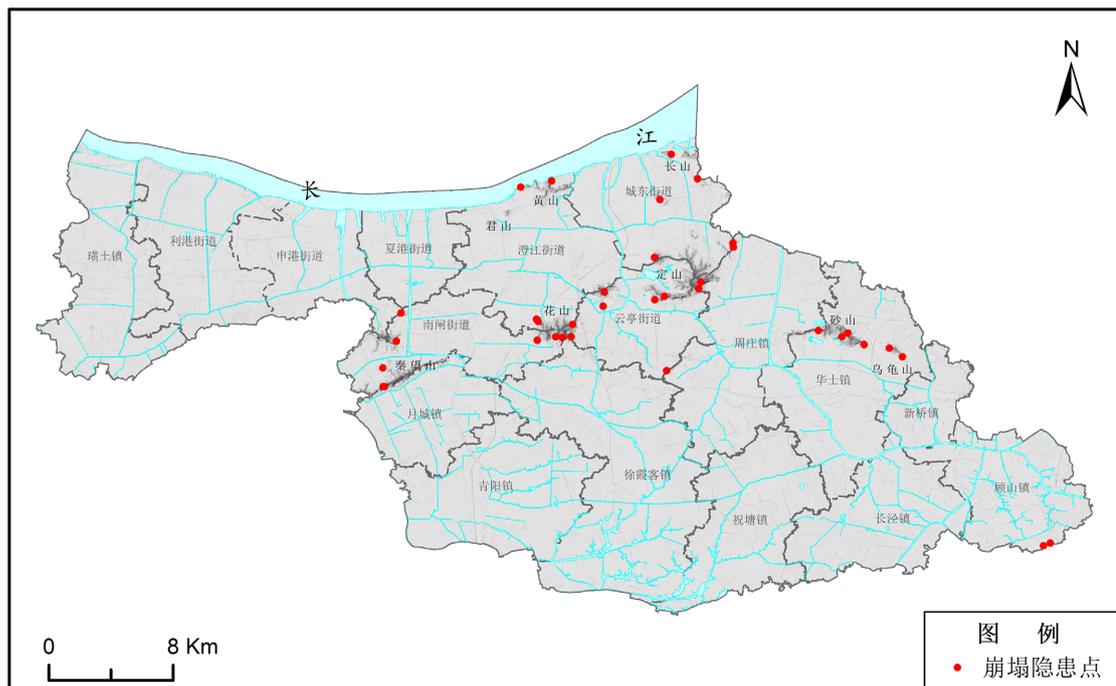


Figure 2. Distribution map of collapse hazard points in the study area
图 2. 研究区崩塌隐患点分布图

3.2. 崩塌灾害发育特征

3.2.1. 规模特征

发育规模是地质灾害风险评价的基础, 也是分析地貌演化过程的关键参数[11]。研究区 34 处崩塌隐患点危岩体体积均小于 $10,000 \text{ m}^3$, 规模均为小型, 具有规模小的特点。具体来看, 危岩体方量主要集中在 1000 m^3 以内, 其中小于 10 m^3 有 1 处, 占总数的 2.9%; $10 \sim 100 \text{ m}^3$ 有 6 处, 占总数的 17.6%; $100 \sim 500 \text{ m}^3$ 有 12 处, 占总数的 35.3%; $500 \sim 1000 \text{ m}^3$ 有 10 处, 占总数的 29.4%; $1000 \sim 5000 \text{ m}^3$ 有 5 处, 占总数的 14.7% (如图 3)。

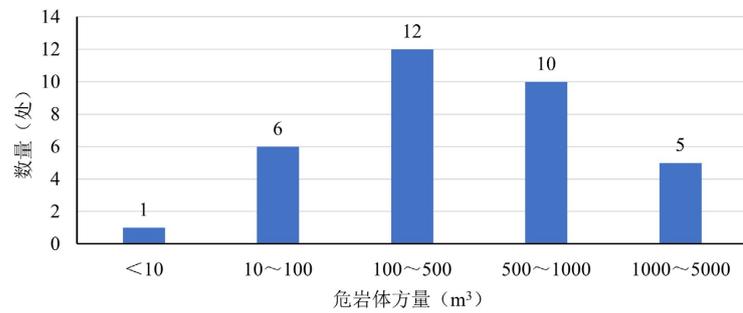


Figure 3. Histogram of unstable rock mass scale distribution at potential collapse sites in the study area
图 3. 研究区崩塌隐患点危岩体规模分布直方图

3.2.2. 高差及形态特征

在其它条件都相同的情况下, 边坡高差越大, 重力势能越大, 崩塌发生时的破坏性越强。研究区 34 处崩塌隐患点危岩体相对坡脚最大高差多小于 100 m。具体来看, 高差小于 10 m 有 1 处, 占总数的 2.9%; 10~20 m 有 2 处, 占总数的 5.9%; 20~30 m 有 5 处, 占总数的 14.7%; 30~40 m 有 6 处, 占总数的 17.6%; 40~50 m 有 3 处, 占总数的 8.8%; 50~100 m 有 12 处, 占总数的 35.3%; 大于 100 m 有 5 处, 占总数的 14.7% (如图 4)。研究区崩塌隐患主要由开山采石等人工切坡引发, 所在微地形多为“L”形, 且危岩体距坡脚相对高差较小, 崩塌体崩落后多堆积于坡脚, 基本不会形成滚石。

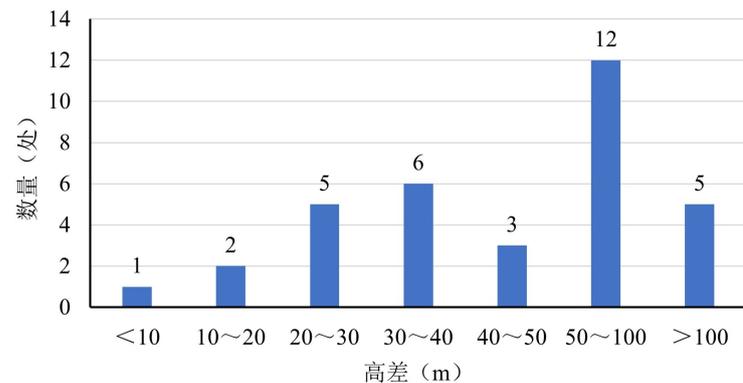


Figure 4. Histogram of cutting slope height distribution at potential collapse sites in the study area
图 4. 研究区崩塌隐患点切坡高度分布直方图

3.2.3. 地形坡度特征

斜坡变形要具备良好的临空条件, 斜坡坡度越大, 其重力沿坡向提供的分量也就越大, 滑动力越大。研究区 34 处崩塌隐患点均位于坡度大于 30° 的陡坡及陡崖地带。具体来看, 地形坡度 30°~40° 有 2 处, 占总数的 5.9%; 40°~50° 有 3 处, 占总数的 8.8%; 50°~60° 有 5 处, 占总数的 14.7%; 大于 60° 有 24 处, 占总数的 70.6% (如图 5)。

3.2.4. 地层岩性特征

斜坡岩土体是地质灾害发育的物质基础, 地层岩性决定了斜坡岩土体强度、应力分布、变形破坏方式等特征[12]。研究区崩塌均为岩质崩塌, 主要发生在砂岩等坚硬岩组地层中。据调查统计, 34 处崩塌隐患点全部位于砂岩地层, 崩塌落石(危岩体)粒径随母岩变化具有一定的规律性, 主要表现为: 在石英砂岩等硬质岩层中发育的崩塌危岩体一般粒径较大, 地形陡峭, 以垂直的陡坎、崖为主, 如凤凰山某仓库

后方边坡，落石粒径最大达 2 m，此类崩塌突发性强，冲击力大，危害性大，防治难度较大。在泥质粉砂岩等相对较软地层中发育的崩塌危岩粒径较小，多以片石、碎石为主，在落地后易解体，此类崩塌通常持续时间长，冲击力较小，相对易于防治。

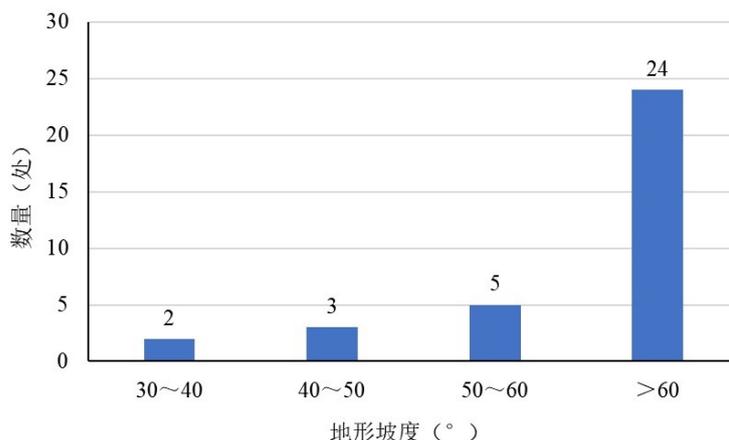


Figure 5. Histogram of slope distribution for potential collapse hazard points in the study area

图 5. 研究区崩塌隐患点地形坡度分布直方图

3.2.5. 成因特征

研究区 34 处崩塌隐患点均由人工切坡引发，具体来看，有 30 处由开山采石引发，占总数的 88.3%；2 处由切坡建房引发，占总数的 8.8%；1 处由切坡修路引发，占总数的 2.9% (如图 6)。人工切坡形成高陡临空面，改变了斜坡的原始应力分布，加之开挖对斜坡岩土体进行了扰动，岩土体裂隙进一步发育，局部破碎，从而引发崩塌现象。

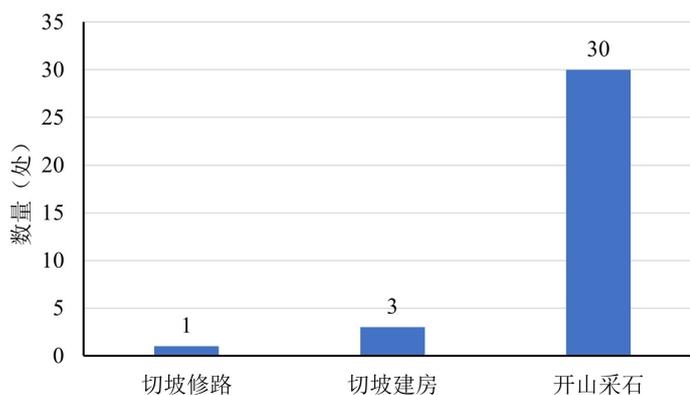


Figure 6. Distribution histogram of slope-cutting types at potential collapse hazard sites in the study area

图 6. 研究区崩塌隐患点切坡类型分布直方图

4. 崩塌破坏模式

研究区崩塌均为岩质崩塌，主要发育于砂岩等坚硬岩组地层中，具有突发性和连发性的特点。由于岩体裂隙的出现、发展常不被人注意，崩塌的前兆不明显，因而突发性较强。崩塌发生后，又会出现新的陡峭临空面，在降雨、风化和重力作用下，新的裂缝延伸扩展，崩塌现象可再次发生，从而形成连发性的崩塌现象[13]。崩塌灾害的变形破坏模式主要受岩土体结构特征、主控结构面发育状况、地形这三方

面因素的控制，在受力状态和运动形式上各有特点[14] [15]。工作区崩塌按成因机理主要为坠落式崩塌，其次为滑移式崩塌和倾倒式崩塌(如图 7)。

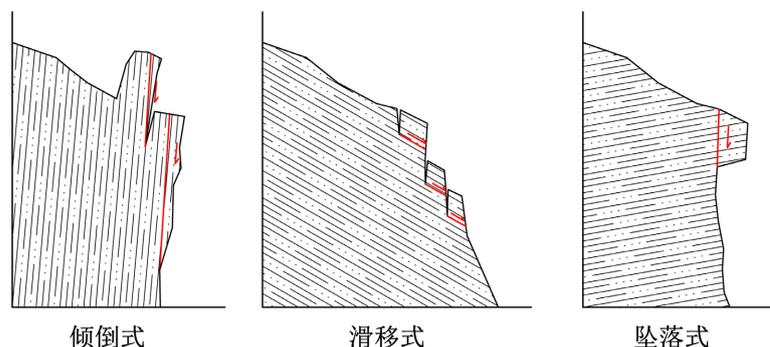


Figure 7. Schematic diagram of typical collapse failure modes in the study area
图 7. 研究区典型崩塌破坏模式示意图

4.1. 坠落式崩塌

坠落式崩塌是指高悬于陡崖上端或岩腔顶部的岩体，受结构面切割脱离母岩，上部及后部尚未脱离母岩，因其底界临空条件极好，在长期重力作用下，一旦拉应力大于连接处岩石的抗拉强度，拉张裂缝迅速向下发展，最终失稳下坠形成崩塌[16]。该类崩塌灾害在工作区最为多见，微地貌表现为上部突出，局部反倾，控制结构面为受自身重力而形成的拉张裂缝或风化等作用产生的裂隙。岩性多为软硬相间的岩层，由于软岩和硬岩的差异风化，风化较快的软岩在硬岩下部形成凹腔，上部硬岩失去支撑，在重力作用下沿裂隙发生坠落(如照片 1)。除重力作用外，震动、风化、冻融等作用都会加速坠落式崩塌的形成。在进行工程治理时，若危岩体仅为局部分布的话，可采取局部危岩清除 + 被动防护网的方式进行治理；若危岩数量多、分布广，则可以采用削坡或者锚固结合主动防护网的方式进行治理。

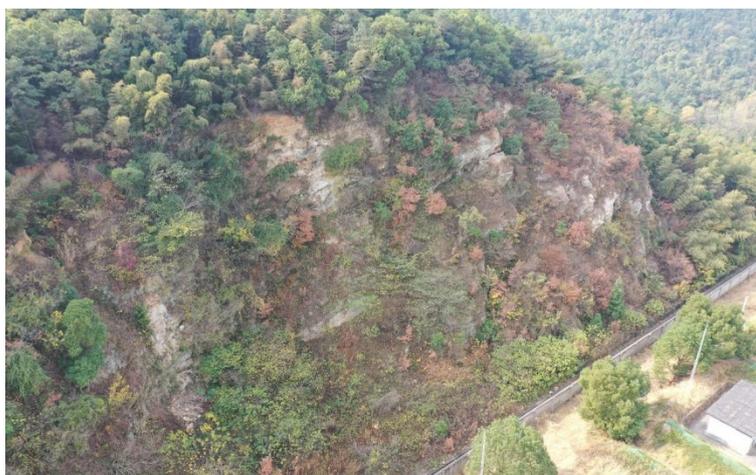


Photo 1. Photo of a typical fall-type rockfall in the study area
照片 1. 研究区典型坠落式崩塌照片

研究区 34 处崩塌隐患点中，有 28 处是坠落式崩塌，占总数的 82.3%，主要发育于坚硬的厚层 - 中厚层含砾石英砂岩夹粉砂质泥岩工程地质层组和软硬相间的中厚 - 薄层的石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩工程地质层组中。

4.2. 滑移式崩塌

滑移式崩塌为岩土体沿结构面发生滑移而形成的，兼具滑坡性质，控制结构面多为节理裂隙面或层面，其倾角小于斜坡倾角。该类崩塌为较陡坡体受风化、侵蚀等作用形成较陡的裂缝，在长期外界作用下，裂缝贯通，危岩体在重力作用下沿裂隙面发生下滑，形成崩塌(如照片 2)。降雨入渗导致基岩裂隙中静、动水压力的变化以及对软弱面的软化作用，是发生滑移式崩塌的主要诱发性因素。在进行工程治理时，通常需要对边坡进行削坡减载或者设置抗滑桩，治理成本相对较高。



Photo 2. Photo of a typical slide-type rockfall in the study area
照片 2. 研究区典型滑移式崩塌照片

研究区 34 处崩塌隐患点中，有 5 处是滑移式崩塌，占总数的 14.7%，主要发育于软硬相间的中厚 - 薄层的石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩工程地质层组中。

4.3. 倾倒式崩塌

倾倒式崩塌为岩体受倾覆力矩作用，发生整体倾倒的崩塌，通常需要特定的岩土体结构，主要表现为岩层厚度较大，岩质强度较高，裂隙发育间距较大，多受蠕变张拉、卸荷裂隙以及构造裂隙控制，其次为溶蚀裂隙，溶蚀裂隙多为其它裂隙的继承性垂向发育，加大了对岩层的垂向分割。这类崩塌的特点是在崩塌体失稳时，以坡体的某一点为转点，发生转动性倾倒，多发生于近于直立的边坡上。坡体上部受卸荷、渗透侵蚀等作用形成近竖直向的裂缝，下部受风化、侵蚀和掏空作用导致下部悬空，使危岩体重心外倾，当岩体受到的倾覆力矩大于内部摩擦力产生的抗倾覆力矩时，岩体因重心外移而倾倒，产生突然崩塌(如照片 3)。在进行工程治理时，通常需要对边坡进行锚固或者削坡减载。

研究区 34 处崩塌隐患点中，倾倒式崩塌较少，仅有 1 处，占总数的 3.0%，主要发育于垂向节理发育的厚层坚硬石英砂岩地层中。

5. 结论

研究区崩塌由自然因素和人为因素共同作用而形成。自然作用下，褶皱及断层构造破碎带的岩体裂隙发育，稳定性差，当地形切割较陡时常发生崩塌现象。而人类工程活动则会加剧或诱发破碎的岩体失稳形成崩塌。

区内崩塌主要位于秦望山、花山、绮山、砂山、定山、凤凰山、稷山、乌龟山、顾山等孤山残丘。崩塌的危岩体体积均小于 $10,000 \text{ m}^3$ ，均为小型，具有规模小的特点；危岩体距坡脚最大高差多小于 100 m，

又以 50~100 m 最为集中；崩塌主要集中在砂岩等坚硬岩组地层中，整体稳定性较差；此外，除崩塌发育部位岩石自身节理裂隙均较发育外，所有崩塌隐患点均遭受人工开挖影响，主要分布在采矿区、山间道路以及居民建筑物周边；按破坏形式可以分为滑移式、倾倒式和坠落式等 3 种，又以坠落式和滑移式为主，倾倒式较少。



Photo 3. Photo of a typical toppling-type rockfall in the study area
照片 3. 研究区典型倾倒式崩塌照片

建议加强建设用地地质灾害危险性评估工作，特别是加强对新建房屋选址的指导，避免出现新的地质灾害风险隐患。有序开展废弃采石宕口土地利用工作，对存在地质灾害风险，未进行矿山环境整治的宕口，原则上应禁止开发利用，对已开垦为菜园、果园的，应清退并封闭宕口。

参考文献

- [1] 谢兴楠. 江苏地质灾害特征、成因及防治建议[J]. 地质学刊, 2009, 33(2): 154-159.
- [2] 汪名鹏. 苏锡常地区主要地质灾害及防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(1): 60-65.
- [3] 李莎, 张云, 于军, 等. 基于多因素叠加计算权重法的苏锡常地裂缝危险性预测[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 978-988.
- [4] 徐玉琳, 孙国曦, 陆美兰, 等. 江苏省突发性地质灾害气象预警研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 46-50.
- [5] 单玉香, 鄂建, 黄敬军, 等. 江苏省突发地质灾害气象风险预警模型优化与应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 122-126.
- [6] 余成, 葛伟亚, 贾军元, 等. 苏南地区地质灾害区划评价[J]. 中国地质调查, 2019, 6(5): 131-136.
- [7] 张丽, 黄敬军, 武健强, 等. 江苏省地质灾害区划评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2): 81-86, 102.
- [8] 车增光, 陈刚, 喻永祥, 等. 江阴市地质灾害风险普查报告[R]. 江苏省地质调查研究院, 2022.
- [9] 张振国, 陈刚, 王亚山, 等. 江阴市地质灾害精细调查报告[R]. 江苏省地质调查研究院, 2025.
- [10] 任朝霞, 杨达源, 葛兆帅. 赣南青龙岩丹霞洞穴特征、成因与保护[C]//中国地理学会. 地貌·环境·发展——2004丹霞山会议文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 285-286.
- [11] 彭令, 徐素宁, 彭军还. 三峡库区滑坡规模与发育特征研究[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1077-1086.
- [12] 赵国通, 朱小龙, 马佰衡. 河北省崩塌滑坡滞后于降雨的地质背景分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 151-155.
- [13] 王梅. 淮北市烈山区斜坡结构类型与崩塌地质灾害形成浅析[J]. 地下水, 2024, 46(3): 189-191.
- [14] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.

- [15] Zhang, L. and Wang, Y. (2018) Slope Failure Modes and Their Control Factors: A Case Study of Rockfall Hazards in Mountainous Regions. *Engineering Geology*, **234**, 1-12.
- [16] 王霞. 青海省玉树州典型崩塌变形破坏模式与过程分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.