地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：西南山区典型采空区滑坡易灾地质结构与失稳模式研究

作者：张皓翔，朱赛楠，姚磊华，高峰，张丽美，杨龙，谭维佳，代旭升，高瑜

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025047
投稿时间：2025-04-26
录用时间：2025-09-09
预出版时间：2025-11-20

西南山区典型采空区滑坡易灾地质结构与失稳模式研究

张皓翔[1,2],朱赛楠[2],姚磊华[1],高 峰[3],张丽美[2],杨 龙[2],谭维佳[4],代旭升[5],高 瑜[5]

ZHANG Haoxiang[1,2],ZHU Sainan[2],YAO Leihua[1],GAO Feng[3],ZHANG Limei[2],YANG Long[2],TAN Weijia[4],DAI Xusheng[5],GAO Yu[5]

1.中国地质大学(北京)工程技术学院，北京 100083

2.中国地质环境监测院，北京 100081

3.中国地质大学(武汉)，湖北武汉 430074

4.长安大学，陕西西安 710064

5.云南省地质环境监测院，云南昆明 650216

1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083

2.China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081*, China*

3.China University of Geosciences, Wuhan, 430074*, Hubei China*

4.Chang'an University, Shaanxi 710064*, Xi'an China*

5. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming 650216*, , Yunnan China*

Study on disaster-prone geological structure and instability mode of typical goaf landslide in Southwest mountainous area

Abstract: [**Objective**] Landslides occur frequently in the goaf areas of the mountainous regions in southwest China. The purpose of this study is to explore the commonalities and differences among such landslides, so as to formulate scientific disaster prevention and mitigation countermeasures. [**Methods**] This article takes the Jiguanling landslide in the limestone area, the Zhaojiagou landslide in the clastic rock area and the Shanyang landslide in the metamorphic rock area as the research objects for a comparative study. It adopts methods such as data collection and analysis, on-site investigation, multi-phase remote sensing interpretation, physical and mechanical tests of rock and soil masses and numerical simulation to analyze the similarities and differences in the disaster-prone geological structure and instability mechanism of the research objects.[**Results**] The research results show that when the slope has features such as steep terrain, good open-air conditions and binary structure, landslide disasters are prone to occur. The numerical simulation results indicate that under the goaf condition, the displacement of each landslide increases, the maximum shear strain increment is concentrated in the potential sliding surface and the roof area of the goaf, and the overall stability of each landslide decreases. [**Conclusion**] The limestone mountainous area is characterized by thick layers of hard rock interbedded with thin layers of soft rock, presenting high-intensity rock mass characteristics. The Jiguanling landslide belongs to the toppling - sliding failure mode type. The clastic rock mountainous area is affected by the interbedded structure of thin-layer fragmented soft and hard rocks, and the overall strength of the rock mass is weakened. The Zhaojiagou landslide belongs to the type of creep - tensile fracture failure mode. The metamorphic rock mountainous area presents a structure of hard rock at the top and soft rock at the bottom, with significant differences in strength. The Shanyang landslide belongs to the type of slipping-collapse failure mode. [**Significance**] This article provides an important scientific basis for the early identification and disaster formation pattern research of landslides in goaf areas.

Keywords: Goaf landslide; Limestone mountainous area; Clastic rock mountainous area; Metamorphic rock mountainous area; Disaster-prone geological structure; Instability mechanism

摘要：在中国西南山区采空区滑坡频发，为研究此类滑坡之间存在的共性及差异，制定科学的防灾减灾对策，

文章以灰岩山区的鸡冠岭滑坡、碎屑岩山区的赵家沟滑坡及变质岩山区的山阳滑坡三个采空区滑坡为研究对象进行对比研究，采用资料收集分析、现场调查、多期遥感解译、岩土体物理力学试验与数值模拟等方法，分析三者易灾地质结构与失稳机制的异同。研究结果表明，当斜坡具备陡峭地形、良好的临空条件、上陡下缓的“靴状地形”及二元结构等特征时，易于发生滑坡灾害，采空工况下各滑坡位移量增大，最大剪应变增量集中分布于潜在滑动面及采空区顶板区域，各滑坡整体稳定性降低。灰岩山区呈硬岩夹软岩型，以厚层硬岩夹薄层软岩为特征，呈高强度岩体特性，鸡冠岭滑坡因煤层开采较为垂直导致上部岩体拉剪应力集中，形成倾倒式滑坡,为“倾倒-滑移”破坏模式；碎屑岩山区呈软硬岩互层型，受薄层碎裂状软硬岩互层结构影响，岩体整体强度弱化，赵家沟滑坡因采空区顶板沉降形成“漏斗状”位移场,呈“蠕滑-拉裂”破坏模式；变质岩山区为典型上硬下软型，呈上部硬岩下部软岩结构，强度差异大，山阳滑坡变形机制表现为滑体剪切滑移与采空区顶板挠曲变形,呈“滑移-溃屈”破坏模式。文章为采动型滑坡的早期识别与成灾模式研究提供重要科学依据。
关键词：采空区滑坡；灰岩山区；碎屑岩山区；变质岩山区；易灾地质结构；失稳机制
中图分类号：P642. 22

0 引言

随着人类对矿产资源的持续开采，受采矿活动影响所引发的滑坡灾害数量不断增加。我国采空区滑坡多发于矿产资源富集的西部地区，此类滑坡具有隐蔽性高、规模大、突发性强、危害严重等特点（朱赛楠等, 2018, 2021a; 唐建新等, 2022; Li et al., 2023; 殷跃平等, 2024; 高利军等, 2024），尤其在山区复杂地质构造区域，造成严重经济损失、人员伤亡和社会影响（李滨等, 2020; 殷跃平, 2022; 梁风等, 2022）。

地下采矿活动会扰动上覆岩层的原始应力场，引发应力重分布现象，覆岩顶板在应力调整作用下发生变形，该变形通过传递效应逐步扩展至地表，引起剪切变形与屈服破坏，坡体后缘逐渐形成张拉裂缝并持续扩展（殷跃平, 2010; 龙建辉等, 2021; 朱怡飞等, 2022; 刘一龙等, 2023; 严浩元等, 2023; 杨晓杰等, 2023; 朱赛楠等, 2024; 张顺波等, 2024; 周雷等, 2024;），并在降雨入渗、风化等内外因素的耦合作用下，最终触发滑坡。赵建军等（2016）发现煤层开采后，上覆岩层应力发生重分布，采空区边界处形成拉应力集中区域，上覆岩层发生沉降弯曲变形，在坡肩和坡脚位置出现较为明显的水平外位移；FATHI et al.（2017）研究表明地下煤矿开采导致覆岩发生裂缝化，进而引发覆岩的劈裂破坏和剪切破坏；Li et al.（2017）提出深大裂隙对不稳定岩体的形成以及斜坡破坏模式的发展具有显著的控制作用。物理模拟试验能揭示滑坡动态演化机制，已被广泛应用在滑坡机制研究中，Jones et al.（1991）采用物理模拟试验，对 South Wales 矿区浅层开采滑坡进行研究；Ren et al.（2010）通过相似模型试验，研究了地表及采空区围岩的变形破坏过程，并探讨了其破坏机理。基于有限元、离散元的数值模拟技术，在采空区诱发滑坡失稳机理研究中得到应用，杨忠民等（1999）采用弹塑性有限元分析，研究地下采动引起斜坡应力场和位移场的变化规律。

采空区滑坡灾害的发生不仅受控于不良地质结构，更与采矿活动产生的动态扰动密切相关。然而，不同采空区滑坡的易灾地质结构具备多样性，且失稳机制具备复杂性。以三个典型案例为研究对象，从易灾地质结构、失稳机制及破坏模式的角度，研究此类采空区滑坡的共性及差异。

1 典型案例概况

选取了中国不同地质环境背景下具备代表性的三个采空区滑坡进行研究，这些案例成因机制复杂、灾害伤亡严重，是研究此类灾害的重要实例，具体如下：

（1）灰岩山区鸡冠岭滑坡：1994 年 4 月 30 日，重庆市武隆区鸡冠岭发生大型滑坡灾害，滑坡体积约 400 万 m^3（贺凯等, 2018），中途解体形成碎屑流，近 30 万 m^3 的碎屑流涌入乌江，灾害共造成 17 人死亡，19 人重伤，

造成经济损失近亿元(李滨等, 2015a)；

(2)碎屑岩山区赵家沟滑坡：2013 年 1 月 11 日，云南省镇雄县赵家沟村民组发生高速远程山体滑坡灾害，滑坡体积约 $25\times10^4m^3$，滑坡运动过程中发生两次碰撞转向，灾害造成 46 人死亡，2 人受伤，造成经济损失约 4500 万元(殷跃平等, 2013; 曾庆利等, 2016)；

(3)变质岩山区山阳滑坡：2015 年 8 月 12 日，陕西省山阳县中村镇发生大规模山体滑坡灾害。滑坡体积约 $168\times10^4m^3$(王佳运等, 2018b)，滑坡运动过程中同样发生了两次碰撞转向，事故造成 8 人死亡，57 人失踪，经济损失约 5 亿元。

2 易灾地质结构对比

从地形地貌、地质构造、地层岩性及岩体力学强度等方面，对鸡冠岭滑坡、赵家沟滑坡及山阳滑坡进行研究比较，找出此类采空区滑坡在易灾地质结构上存在的规律。

2.1 灰岩山区：鸡冠岭滑坡

构造上，鸡冠岭位于当地第Ⅳ级剥蚀面，该区域主体构造为桐麻湾背斜，滑坡位于该背斜核部的西侧翼部，背斜核部岩层在褶皱构造影响下，受挤压作用发生破碎，并在溶蚀作用下，呈岩溶强发育特征(陈自生等, 1994; 李滨等, 2015a)。区域地貌类型为岩溶中山地貌，河谷深切，地形陡峭，山体坡度较大，平均坡度 37° 左右，地质条件脆弱。鸡冠岭山体两侧临空，朝向乌江和冲沟方向空旷开阔，为滑坡发生提供了良好的临空条件(图 1)。

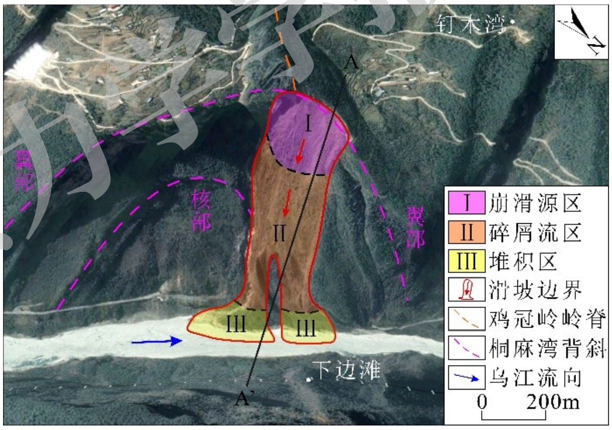
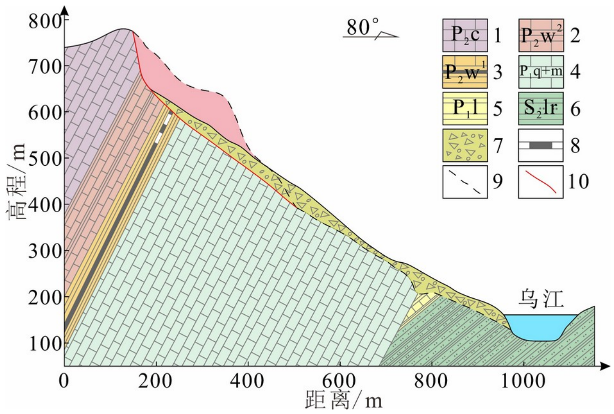


图 1 鸡冠岭滑坡与区域地貌

Fig.1 Jiguanling Landslide and regional topography

鸡冠岭地层呈上硬下软的二元结构特征，岩性依次为(王国章等, 2014; 贺凯等, 2018)：(1)二叠系中统长兴组(P_2c)灰色中厚层状灰岩，产状 302°∠68°；(2)二叠系吴家坪组上段(P_2w^2)顶部绿灰色页岩，中下部薄层-中厚层灰岩夹黄褐色页岩；(3)二叠系吴家坪组下段(P_2w^1)上部灰黑色页岩夹深灰色灰岩，中部煤层平均厚度 0. 65m，煤层已采空，下部主要为页岩；(4)二叠系下统栖霞茅口组(P_1q+m)厚层灰岩；(5)二叠系下统梁山组(P_1l)页岩夹薄层灰岩；(6)志留系罗惹坪组(S_2lr)黄绿色页岩夹薄层粉砂岩。滑体成分主要为灰岩(图 2)。



1—二叠系长兴组灰岩；2—二叠系吴家坪组上段页岩、灰岩；3—二叠系吴家坪组下段页岩、灰岩、煤层；4—二叠系栖霞茅口组灰岩；5—二叠系梁山组页岩夹灰岩；6—志留系罗惹坪组页岩夹粉砂岩；7—堆积体；8—采空区；9—原始地形线；10—滑动面

图 2 鸡冠岭滑坡工程地质剖面 A-A'(据贺凯等,2018改;剖面位置见图 1)

Fig.2 The engineering geological section A-A' of the Jiguanling landslide (modified by He et al.,2018; the section location is shown in Fig.1)

岩体结构呈层状块裂结构(图 3)，斜坡结构类型为陡倾层状横向岩质斜坡，其主要受两组结构面控制(陈自生等, 1994)：(1)后缘卸荷拉裂缝，产状 40° ∠70° ～80° ，沿原背斜横向节理不断发育形成；(2)岩层层理产状 300° ∠40° ～80° ，在卸荷作用下其逐渐扩展形成卸荷裂隙。

图 3 鸡冠岭滑坡滑源区地质结构

Fig.3 Geological structure of the source area of Jiguanling Landslide

据表 1 知，灰岩的粘聚力和内摩擦角达到硬岩标准，抗剪强度较好，抗压强度高，具备典型硬岩的力学特性，其强度参数高于同期发育的煤层、页岩。该区岩性上呈厚层硬岩夹薄层软岩的特征，尽管存在煤层、页岩等软岩夹层，但灰岩作为区域主导岩性，整体而言，强度较高。

表 1 灰岩山区岩体物理力学参数（引自王国章, 2015；李滨等, 2015a）

Table.1 Physical and Mechanical Parameters of rock Mass in Limestone Mountainous Areas (Quoted from Wang,2015; Li et al.,2015a)

岩性	容重/kN•m^{-3}	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/°	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
灰岩	25.0	9.38	40	12000	48.70	0.95	0.2
页岩	—	5.48	30	5500	24.20	0.40	0.26
煤层	15	0.30	20	5500	—	0.40	0.26

2.2 碎屑岩山区：赵家沟滑坡

区域地质构造上,位于扬子准地台娄山弧形箱形褶皱区，由于受多期新构造运动影响，该地区夷平面和断层发育，赵家沟滑坡则位于大擢魁向斜西北翼，呈单斜构造特征(殷跃平等, 2013; 殷志强等, 2015)。区域地貌为溶蚀—侵蚀中山地貌，地形上呈上陡下缓的“靴状地形”，上部滑源区的坡度较大，地形陡峭，山体稳定性较差；中下部刮铲堆积区及滑覆区的坡度较小，相对平缓，为滑坡提供了长距离运动的有利条件(图4)。

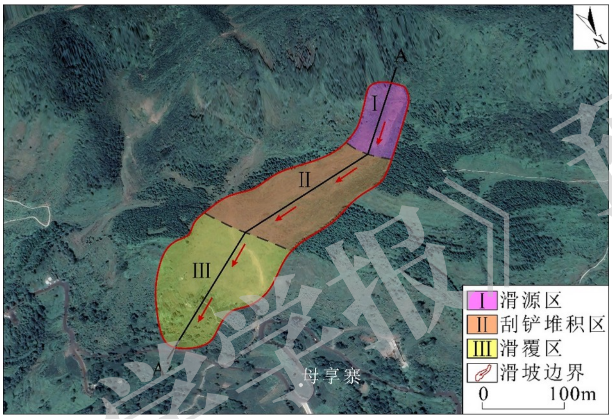
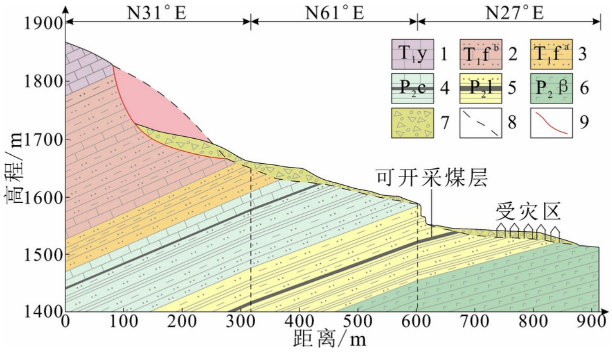


图4 赵家沟滑坡与区域地貌

Fig.4 Zhaojiagou Landslide and regional topography

赵家沟地层分布呈软硬相间的二元结构，具体地层分布如下(殷跃平等, 2013)：(1)第四系松散残坡积层(Q_4^{el+dl})泥质黏土、碎块石；(2)三叠系永宁镇组(T_1y)泥质灰岩、白云岩夹黏土岩；(3)三叠系飞仙关组(T_1f)主要表现为薄层砂泥岩互层：上段(T_1f^b)中厚层粉砂岩、薄层细砂岩、页岩夹灰岩；下段(T_1f^a)粉砂岩夹泥岩；(4)二叠系长兴组(P_2c)中厚层灰岩、黏土岩；(5)二叠系龙潭组(P_2l)薄层粉砂岩、页岩夹煤层；(6)二叠系峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)玄武岩夹凝灰岩、砂砾岩(图5)。滑体成分主要为残坡积层黏土夹碎块石。



1—三叠系永宁镇组灰岩、泥质灰岩；2—三叠系飞仙关组上段粉砂岩、细砂岩夹灰岩；3—三叠系飞仙关组下段粉砂岩、泥岩；4—二叠系长兴组页岩夹灰岩、煤线；5—二叠系龙潭组页岩、粉砂岩、煤层；6—二叠系峨眉山玄武岩组玄武岩夹凝灰岩、砂砾岩；7—堆积体；8—原始地形线；9—滑动面

图5 赵家沟滑坡工程地质剖面A-A'(据殷跃平等，2013改;剖面位置见图4)

Fig.5 The engineering geological section A-A' of Zhaojiagou Landslide (according to Yin et al., 2013; the section location is shown in

Fig.4）

岩体结构呈薄层碎裂状，斜坡结构类型为逆向坡。由于受长期蠕变作用及滑坡发生时牵引作用的影响，其存在多组结构面，滑体后缘及滑源区附近形成多条张拉裂缝（曾庆利等, 2016）。

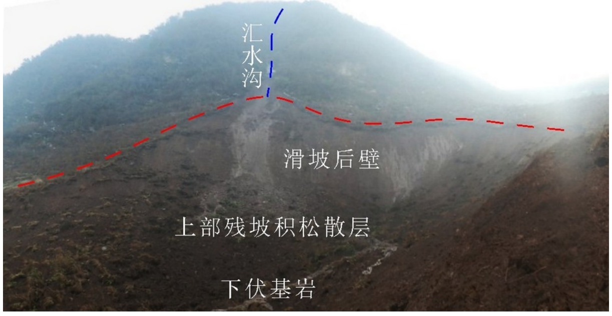


图 6 赵家沟滑坡滑源区地质结构

Fig.6 Geological structure of the source area of Zhaojiagou Landslide

通过三轴压缩试验等得到碎屑岩山区飞仙关组灰岩、砂岩及泥岩的力学参数（表 2）。不同岩性间的力学参数呈显著差异性：灰岩、钙质砂岩的粘聚力值达 17.1 MPa、14.9 MPa，高于铁质砂岩、泥质砂岩、泥岩的 10.1 MPa、8.46 MPa、4.89 MPa，内摩擦角值则相对稳定，未表现出明显岩性差异。三叠系飞仙关组呈薄层碎裂状软硬岩互层结构，这种结构导致岩体的整体强度呈显著弱化特征，薄层软岩的低粘聚力特性构成力学薄弱面，同时，软硬岩间的差异变形产生的层间错动效应利于结构面扩展，这种软硬交替的岩性组合使得三叠系飞仙关组整体表现为低强度岩体特性。

表 2 碎屑岩山区岩体物理力学参数

Table.2 Physical and mechanical parameters of rock mass in clastic rock mountainous areas

岩性	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/°	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	泊松比
灰岩	17. 1	42. 7	19.7	92.3	0.18
铁质砂岩	10. 1	42. 8	11.7	68.7	0.20
泥质砂岩	8. 46	42. 2	9.43	57.4	0.23
钙质砂岩	14. 9	43. 2	15.4	78.5	0.19
泥岩	4. 89	39. 4	6.87	37.6	0.25

2. 3 变质岩山区：山阳滑坡

区域地质构造上，位于祁连山—秦岭褶皱系，断裂和褶皱构造均发育，山阳滑坡区域地处镇安逆冲推覆构造带区域，位于耀岭河倒转背斜倒转翼，呈北倾单斜构造特征（亢佳乐, 2023; 高峰等, 2024）。山阳滑坡区域属于中山陡坡地貌类型，位于烟家沟与大西沟两沟交汇地带，所在山体处于三面临空状态（图 7），临空条件良好。滑坡发生位置处于山体的山脊部位，总体地势呈西高东低，山体坡度 40°左右，山顶高程约 1310m，山脚高程约 1010m，相对高差约 300m。

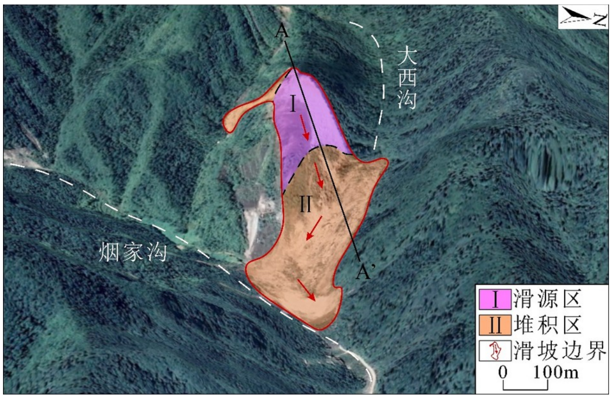
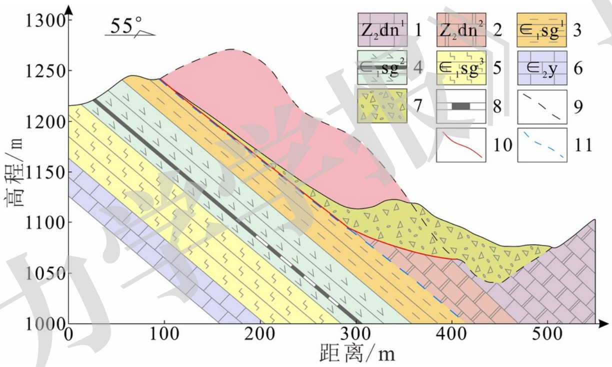


图 7 山阳滑坡与区域地貌

Fig.7 Shanyang Landslide and Regional Topography

区域地层呈上硬下软二元结构(图 8)，软硬岩接触面为坡体失稳提供了天然滑动面。具体地层分布如下(亢佳乐, 2023; 孟桓羽等, 2023)：(1)震旦系灯影组一段(Z_2dn^1)厚层-巨厚层白云岩；震旦系灯影组二段(Z_2dn^2)厚层白云岩；(2)下寒武统水沟口组($Є_1sg$)：①$Є_1sg^1$紫红色夹薄层黏土硅质板岩，产状 15° ∠48°；②$Є_1sg^2$厚层硅质岩，钒矿层位于该岩性段底部，矿层厚度 9. 75～18. 75m；③$Є_1sg^3$杂色黏土岩；(3)中寒武统岳家坪组($Є_2y$)下部灰色灰岩夹黏土岩；上部灰岩。滑体成分主要为白云岩。



1—震旦系灯影组一段白云岩；2—震旦系灯影组二段白云岩；3—下寒武统水沟口组一段硅质板岩；4—下寒武统水沟口组二段硅质岩、钒矿层；5—下寒武统水沟口组三段黏土岩；6—中寒武统岳家坪组灰岩；7—堆积体；8—采空区；9—原始地形线；10—滑动面；11—平行不整合面

图 8 山阳滑坡工程地质剖面 A-A'(据孟桓羽等,2023改;剖面位置见图 7)

Fig.8 The engineering geological section A-A' of the Shanyang landslide (according to Meng et al.,2023; the section location is shown in Fig.7)

岩体结构类型呈层状板裂和层状块裂，属于陡倾层状斜向顺层岩质斜坡(王佳运等, 2018b)，其控制性结构面有三组(王佳运等, 2018a, 2018c)：(1)平行不整合结构面：滑坡底滑面主要沿此结构面发育；(2)溶蚀结构面：由岩溶发育贯通形成；(3)后缘卸荷结构面：卸荷拉裂产生(图 9)。

图 9 山阳滑坡滑源区地质结构

Fig.9 Geological structure of the source area of the Shanyang Landslide

据表 3 知，白云岩的粘聚力和内摩擦角均处于较高水平，而钒矿层、硅质岩的力学强度明显弱化。该区上硬下软二元结构的强度差异易导致下伏软岩压缩变形，在软硬岩界面形成层间剪切带（朱赛楠等, 2019），尤其在降雨等外部因素作用下，下部软岩抗剪强度下降，易触发上部硬岩沿剪切带发生整体滑移。

表 3 变质岩山区岩体物理力学参数（引自王佳运等, 2019；阴晓冬, 2019；韩宇涛, 2023；亢佳乐, 2023）

Table.3 Physical and mechanical parameters of rock mass in metamorphic rock mountainous areas (Quoted from Wang et al., 2019; Yin, 2019; Han, 2023; Kang, 2023)

岩性	容重 /kN•m^{-3}	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/°	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
白云岩	28.0	7.18	48.53	31.67	63.70	0.13	0.22
硅质岩	26.0	1.69	46.15	78.00	98.64	—	0.17
钒矿层	25.37	1.50	30.00	12.58	—	2.00	0.28
灰岩	27.0	7.00	34.50	43.69	—	4.50	0.20

2.4 易灾地质结构对比分析

在地形地貌与地质构造上，共性：三者均发育于中山地貌区，均位于区域性褶皱构造的翼部；均具备利于失稳的陡峭地形，为滑坡运动提供了势能条件；均具备良好的临空条件，为滑坡的变形和运动提供空间条件。差异性：赵家沟滑坡为上陡下缓“靴状地形”，其下部缓坡区为滑体远距离运动提供条件，其余二者的山体坡度整体均较大。

在地层岩性与地质结构方面，共性：三者在地层岩性组合方面均呈“软硬相间”的二元结构特征；三处滑坡均受多组结构面控制，且均存在卸荷拉裂面。差异性：在斜坡结构类型上，鸡冠岭斜坡为陡倾层状横向岩质斜坡，赵家沟斜坡属逆向坡，山阳斜坡则为陡倾斜向顺层岩质斜坡；在岩体结构类型上，鸡冠岭滑坡呈层状块裂结构，赵家沟滑坡呈薄层碎裂状结构，山阳滑坡呈层状板裂及层状块裂结构。

三者宏观上虽同属二元结构，但其具体的结构形式存在差异，这是影响其易灾结构的重要因素，可将其分类如下：

(1) 硬岩夹软岩型：鸡冠岭滑坡区域以坚硬的厚层灰岩 (P_2c，P_1q+m) 为主体，中部夹有薄层页岩和煤层 (P_2w) 作为软岩夹层，呈硬-软-硬式结构。此类结构的灾变特征主要受中部软岩夹层控制，下伏坚硬灰岩 (P_1q+m) 构成了稳定的基础，采矿活动采空了关键软岩夹层，导致上覆坚硬灰岩岩体失去底部支撑，形成以倾倒为主的破坏形式。

(2) 软硬岩互层型：赵家沟滑坡区域以飞仙关组 (T_1f) 的薄层碎裂状砂泥岩互层结构为主要特征。该特征导致岩体呈现显著的各向异性，其整体强度受控于强度较低的软弱岩层，且软硬岩间的差异变形产生的层间错动效应利于结构面扩展，在重力或采空因素扰动下，坡体易沿这些软弱岩层发生变形，进而为降水入渗作用提供优势通道，使斜坡稳定性显著降低，属于典型的易滑地层结构。

(3) 典型上硬下软型：山阳滑坡区域上部为坚硬白云岩 (Z_2dn)，下部为相对软弱的钒矿层、硅质板岩、黏土岩 (ϵ_1sg) 等，软硬岩分界面明显。此类结构的下伏软岩主要起控滑作用，下伏软岩在上部硬岩的长期荷载作用下易发生蠕变，产生压缩变形，进而在软硬岩界面处形成层间剪切滑移带，尤其在地下采空以及降雨等外部因素作用下，下部软岩抗剪强度下降，为上部坚硬岩体沿剪切带发生整体滑移提供良好条件。

分析不同区域的岩体力学强度差异可知，共性：三者均发育为硬岩与软岩的复合岩性组合，且软硬岩间的力学性质差异显著。差异性：由于三者二元结构的具体形式存在差异，使其岩体力学强度特征呈现不同特点，灰岩山区由于受厚层硬岩夹薄层软岩结构的影响，尽管其存在软岩夹层，但灰岩作为区域主导岩性，整体而言强度较高；碎屑岩山区由于受薄层碎裂状软硬岩互层结构的影响，使其整体强度较低；变质岩山区则呈典型上硬下软的结构特征，强度差异性较大。

综合对比内容详见下表 (表 4)。

表 4 采空区滑坡易灾地质结构综合对比

Table.4 Comprehensive Comparison of Geological structures prone to Landslides in goaf Areas

易灾地质结构	灰岩山区鸡冠岭滑坡	碎屑岩山区赵家沟滑坡	变质岩山区山阳滑坡
地形条件	高陡	上陡下缓靴状地形	陡峻山脊
微地貌类型	岩溶中山地貌	溶蚀—侵蚀中山地貌	中山陡坡地貌
地质构造	桐麻湾背斜核部西翼	大擢魁向斜西北翼，呈单斜构造	耀岭河倒转背斜倒转翼，呈北倾单斜构造
临空条件	两侧临空	平缓开阔	三面临空
地层岩性	上部为灰岩 中部为页岩夹煤层, 下部为灰岩	上部基岩为砂岩与泥岩互层 下部砂岩页岩煤层	上部为白云岩 下部硅质岩与硅质板岩、钒矿层
岩性组合	上硬下软二元结构	软硬相间二元结构	上硬下软二元结构
岩体结构	层状块裂	薄层碎裂状	层状板裂及层状块裂
斜坡结构类型	陡倾层状横向岩质斜坡	逆向坡	陡倾层状斜向顺层岩质斜坡
结构面	两组	多组	三组
关键主控地层	二叠系吴家坪组 (P_2w)	三叠系飞仙关组 (T_1f)	下寒武统水沟口组 (ϵ_1sg)
岩体力学强度	硬岩夹软岩型，整体强度较高	软硬岩互层型，整体强度较低	典型上硬下软型，强度差异大
主要地下水类型	岩溶水	基岩裂隙水	基岩裂隙水
矿物种类	煤矿	煤矿	钒矿
矿层采动方式	掩护支架采煤法	平巷开采技术	人工爆破、钻爆法、房柱式崩落回采
主要滑体成分	灰岩	残坡积层黏土夹碎块石	白云岩

3 失稳模式对比

基于 FLAC3D 数值模拟软件，采用莫尔-库仑弹塑性本构模型进行研究区边坡模拟计算，模型底部边界施加固定约束，前后及左右边界采用法向约束，顶部边界为自由边界 (无约束)，分别进行天然工况和采空工况下斜坡模拟，对比分析三者的失稳主控因素与机制差异，揭示不同地质构造与采矿扰动作用下的失稳机制。此外，三个滑坡虽同属于采空区滑坡，但在地质环境条件、采空区分布特征以及失稳机制等方面存在显著差异，使其呈现出不同破坏模式类型。

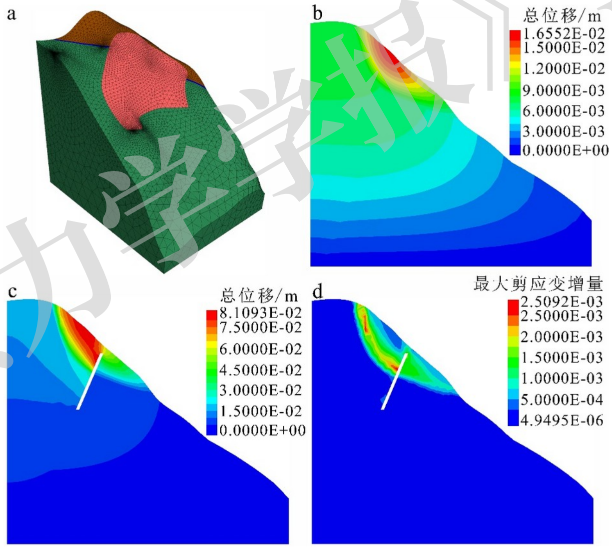
3.1　灰岩山区：鸡冠岭滑坡

滑坡三维地质模型从上到下分别为长兴组灰岩、吴家坪组煤层、栖霞茅口组灰岩，各材料参数取值基于表1，并根据 Hoek-Brown 强度准则对岩体强度进行估算，模型长 650m，宽 500m，高 630m，包含 301199 个单元，56444 个节点，计算模型示意如图 10a 所示。

根据天然工况下鸡冠岭滑坡剖面总位移图可知(见图 10b)，在天然工况下，鸡冠岭滑坡的主要变形区域分布在高差较大的斜坡后部，最大位移为 16. 6mm。可知，在天然工况斜坡只受重力作用影响时，位移变形量较小，斜坡整体稳定性良好。

根据采空工况下鸡冠岭滑坡剖面总位移图可知(图 10c)，在采空工况下，斜坡出现较大变形，最大位移为 81. 1mm。但由于采空煤层较为垂直，出现煤层开采后下部岩体位移增量较小而上部岩体位移增量较大的现象，采空区上部岩体因失去下方支撑作用，重力直接作用于采空区顶板，导致拉应力和剪切应力在上部岩体中积累，该状态易引发岩体拉伸破坏或剪切滑移，从而导致较大位移；采空区下部岩体，其变形更多表现为受压变形，但由于应力释放效应，整体位移相对较小。该现象表明鸡冠岭滑坡属于倾倒式滑坡。

据采空工况下鸡冠岭滑坡最大剪应变增量图(图 10d)可知，最大剪应变增量集中在模型后部，云图显示出明显条带贯通滑体部分，且采空区上部最大剪应变增量更为集中。结合实例分析可知，采矿卸荷促进上覆岩体变形，加速坡体后缘张拉裂缝向深部扩展，应力重分布使采空区顶板上方岩体最大剪应变增量集中，使岩体发生剪切破坏，下伏阻滑岩体在上覆岩体挤压下发生剪切滑移，最终张拉裂缝与剪切滑移带贯通，形成潜在滑动面，滑坡整体稳定性较差。



a—三维地质模型；b—天然工况下剖面总位移；c—采空工况下剖面总位移；d—采空工况下最大剪应变增量

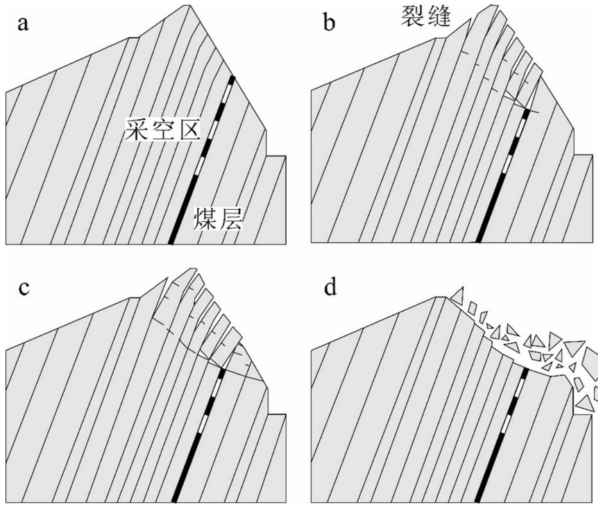
图 10　鸡冠岭滑坡失稳机制数值模拟

Fig.10 Numerical simulation of the instability mechanism of Jiguanling Landslide

(a) Three-dimensional geological model; (b) Total displacement of the section under natural conditions; (c) Total displacement of the section under open-mindedness conditions; (d) The maximum increment of shear strain under the open-mindedness condition

可见鸡冠岭滑坡属于倾倒变形主导、滑移破坏协同的“倾倒-滑移”破坏模式(图 11)，是陡倾层状岩体在多重因素(岩体结构、采矿扰动、岩溶作用等)长期作用下的结果。其演化机制可概括为“长期重力蠕变-裂隙扩展-岩体渐进弯曲-煤层采空加速变形-倾倒挤压-剪切滑移-灾害发生”(李滨等, 2015a)。具体如下(李滨等, 2015b；贺凯等, 2018)：鸡冠岭区域原始地形陡峭，陡倾层状岩体在长期重力作用下朝临空面方向产生蠕变，导致裂隙扩展，形成拉裂缝，其与岩溶、降雨等作用共同加速岩体破碎，岩体完整性降低，且受采煤活动影响，下伏软弱煤层采空导致上覆层状岩体失去支撑力，上覆层状岩体受到拉力作用产生脆性破坏，向临空方向倾倒变形，同时，由于煤层采空区较为陡立，为上部岩层向临空面的弯曲倾倒提供了侧向变形空间，加剧了上覆岩

层的倾倒变形，随着倾倒荷载持续增加，挤压下伏阻滑块体，下伏阻滑块体因剪切强度不足，沿底部软弱结构面发生滑移失稳，最终滑坡发生。



a—初始蠕变阶段；b—裂缝扩展、岩体弯曲阶段；c—倾倒挤压阶段；d—剪切滑移、整体失稳阶段

图 11 鸡冠岭滑坡破坏模式(据李滨等,2015a改)

Fig.11 Failure Mode of Jiguanling Landslide (modified by Li et al., 2015a)

(a) Initial creep stage; (b) Fracture propagation and rock mass bending stage; (c) Pouring and squeezing stage; (d) Shear slip and overall instability stage

3.2 碎屑岩山区：赵家沟滑坡

滑坡三维地质模型分为坡积层滑体、滑床及煤层，模型长 900m，宽 450m，高 550m，包含 196722 个单元，37285 个节点，计算模型见图 12a，各材料参数取值见表 5。(说明：本模拟是基于对 2m 厚煤层进行极端重度开采情况的模拟)

表 5 赵家沟滑坡岩土体物理力学参数取值表（引自殷跃平等，2013）

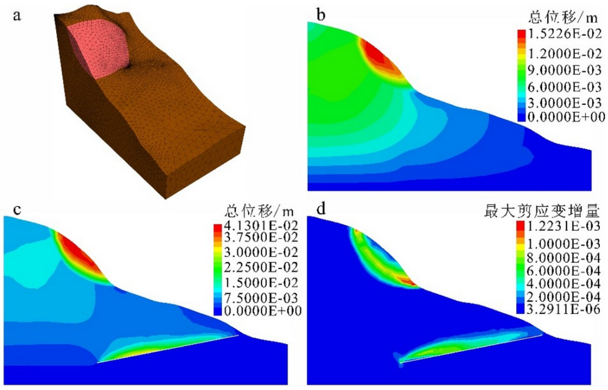
Table.5 Physical and Mechanical Parameter Values of Rock and Soil Mass in Zhaojiagou Landslide (Quoted from Yin et al., 2013)

岩性	容重 /kN•m^{-3}	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/°	弹性模量 /MPa	泊松比
滑体	18.5	0.10	16.0	10000	0.30
滑床	21.5	0.20	20.5	100000	0.25
煤层	15.0	0.30	20.0	5500	0.26

由天然工况下赵家沟滑坡剖面总位移图(图 12b)可知，天然工况下，滑坡变形区域集中分布于滑源区位置，最大位移为 15.2mm。滑床位移量自坡脚至坡顶逐渐变大，但变形量较小，斜坡整体稳定。

由采空工况下赵家沟滑坡剖面总位移图(图 12c)可知，采空工况下，滑源区位移量相较于天然工况明显增大，最大位移量为 41.3mm。采空区上覆岩体因应力重分布产生下沉塌陷，在采空区顶板区域形成沉降中心，位移量在采空区边界呈现“漏斗状”分布。可见，煤层采空会造成上覆岩体位移量增大，滑坡整体稳定性较差。

根据采空工况下赵家沟滑坡最大剪应变增量图可知(见图 12d)，采空工况下，高剪应变增量区域集中在采空区边缘及潜在滑移面附近，滑体内部剪应变增量分布呈条带状延伸，这些位置因自重、采动卸荷及应力重分布等作用产生剪切变形，易于发生剪切破坏。



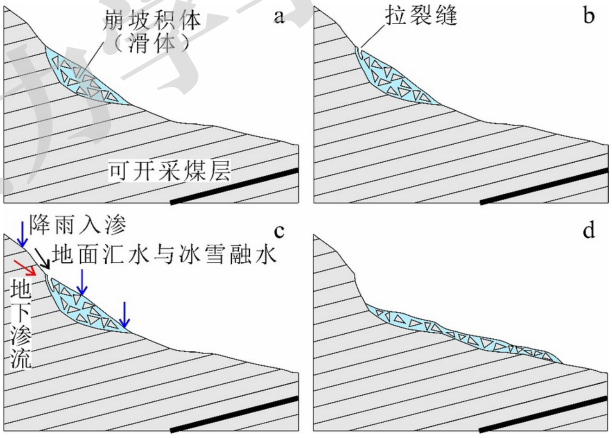
a—三维地质模型；b—天然工况下剖面总位移；c—采空工况下剖面总位移；d—采空工况下最大剪应变增量

图 12 赵家沟滑坡失稳机制数值模拟

Fig.12 Numerical simulation of the instability mechanism of Zhaojiagou Landslide

(a) Three-dimensional geological model; (b) Total displacement of the section under natural conditions; (c) Total displacement of the section under open-mindedness conditions; (d) The maximum increment of shear strain under the open-mindedness condition

在破坏模式上，赵家沟滑坡属于“蠕滑-拉裂”破坏模式(图 13)。演化过程表现为“蠕滑-剪缩变形-拉裂缝形成-水体入渗-渗流促滑-拉裂失稳”。具体如下(姚鑫等, 2014; 曾庆利等, 2016; 朱赛楠等, 2021b)：在长期重力作用下滑体发生持续蠕滑，且当地下存在采空区时，采空区顶板下沉引发上覆岩土体沉降，通过持续性的沉降变形，促进蠕滑变形的发生，蠕滑产生剪缩变形导致滑体孔隙度降低，并且该处水体来源丰富(降雨及冰雪融水)，导致孔隙水压力显著累积，有效应力持续下降，触发应变软化效应，进一步弱化土体抗剪强度，进而导致后缘拉张裂隙的形成，使原本的降水入渗模式发生改变，加速滑体饱水软化，加快蠕滑速率，促使裂隙向深部扩展，最终后缘拉裂贯通，灾害发生。



a—初始蠕滑阶段；b—裂缝发育阶段；c—渗流促滑阶段；d—拉裂失稳阶段

图 13 赵家沟滑坡破坏模式

Fig.13 Failure mode of Zhaojiagou landslide

(a) Initial creep stage; (b) Crack development stage; (c) Seepage and sliding promotion stage; (d) The stage of cracking and instability

3.3 变质岩山区：山阳滑坡

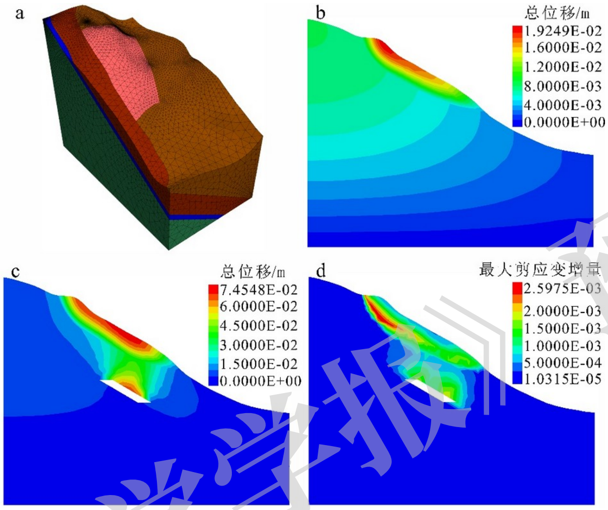
三维地质模型从上到下分别为震旦系灯影组白云岩、水沟口组硅质岩、钒矿层及岳家坪组灰岩，各材料参数取值基于表 3，并根据 Hoek-Brown 强度准则对岩体强度进行估算，模型长 500m，宽 270m，高 400m，包含 121699 个单元，24574 个节点，计算模型见图 14a。

据天然工况下山阳滑坡剖面总位移图(图 14b)可知，天然工况下，位移从坡顶至坡脚呈递减分布，滑体位

移相对较大，最大位移值约 19.2mm，图中位移集中区域反映了岩体在自重作用下局部应力调整以及潜在滑动面初步形成，但位移量级较小，斜坡未发生显著变形，整体稳定性良好。

根据采空工况下山阳滑坡剖面总位移图可知(见图 14c)，采空工况下，最大位移量为 74. 5mm。地下采空诱发上覆岩体应力重分布，采空区周边岩体失去支撑出现顶板下沉，形成以采空区为中心、位移量向外围逐渐扩展的变形区，呈“漏斗状”分布。由于岩体应力释放与变形传递效应，导致上部滑体位移相较于天然工况明显增大，呈现以滑移为主导的变形，滑坡处于不稳定状态。

由采空工况下山阳滑坡最大剪应变增量图可知(见图 14d)，采空工况下，滑体区域剪应变增量集中，滑动面呈条带状且趋于贯通，滑体易沿潜在滑动面剪切滑移，滑体后方剪应变增量较大与滑坡后缘拉裂有关。采空区顶板岩层由于采空卸压产生挠曲变形，故采空区顶板上方剪应变增量也较高。可见，该滑坡变形机制以滑体剪切滑移为主，其次为顶板变形，滑坡整体稳定性差。



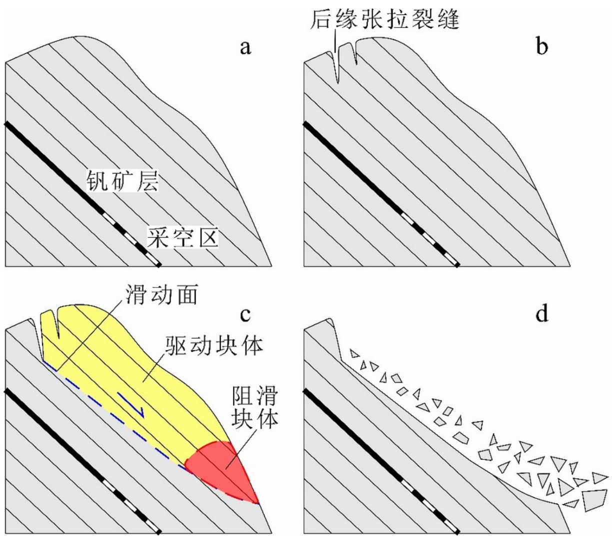
a—三维地质模型；b—天然工况下剖面总位移；c—采空工况下剖面总位移；d—采空工况下最大剪应变增量

图 14 山阳滑坡失稳机制数值模拟

Fig.14 Numerical simulation of the instability mechanism of Shanyang Landslide

(a) Three-dimensional geological model; (b) Total displacement of the section under natural conditions; (c) Total displacement of the section under open-mindedness conditions; (d) The maximum increment of shear strain under the open-mindedness condition

结合上述模拟分析山阳滑坡属于“滑移-溃屈”破坏模式(图 15)。整个过程表现为“降雨入渗软化-顺层滑移-裂隙发育-视向滑移-锁固段剪断-整体失稳”。具体如下(王佳运等, 2018b, 2019; 孟桓羽等, 2023)：降雨入渗、岩溶等作用软化软弱夹层，并在自重作用下，驱动块体沿软弱夹层产生真倾向方向蠕动滑移，随着滑移加剧，后缘拉裂缝产生并不断扩张，同时，上覆岩体受地下钒矿层开采影响所产生的沉降变形，会促进滑坡后缘张拉裂缝的发育扩展，加速坡体内部滑动面的形成，由于山体阻挡转向视倾向方向滑移，挤压前部阻滑块体(锁固段)，前期阻滑力大于下滑力，坡体处于稳定状态，但随着降雨入渗，坡体自重增加，软弱夹层抗剪强度下降，再加上采矿活动影响，阻滑块体在应力集中和裂隙扩展中逐渐损伤，发生溃屈剪断破坏，上部驱动块体失去支撑，最终整体失稳。



a—顺层蠕滑阶段；b—后缘裂缝扩展阶段；c—阻滑块体结构损伤阶段；d—溃屈失稳阶段

图 15 山阳滑坡破坏模式(据杨海龙等,2016; 孟桓羽等,2023改)

Fig.15 Failure mode of Shanyang Landslide (Modified by Yang et al., 2016; Meng et al., 2023)

(a) Forward layer creep and sliding stage; (b) Posterior margin crack propagation stage; (c) Structural damage stage of the anti-sliding block body; (d) Collapse and instability stage

3.4 失稳模式对比分析

在失稳机制上，通过对鸡冠岭、赵家沟和山阳三个采空区滑坡的数值模拟结果分析可知，相同点主要表现为：天然工况下各滑坡总位移较小，变形相对集中于高差较大的斜坡后部或滑源区，位移分布均呈自坡顶至坡脚递减趋势，斜坡整体稳定性良好；采空工况下各滑坡位移量显著增大，最大剪应变增量集中分布于潜在滑动面及采空区顶板区域，形成条带状贯通区域，导致滑坡整体稳定性降低，加速滑坡演化进程；采空区上覆岩体均因应力重分布产生下沉塌陷。不同点体现在：鸡冠岭滑坡因煤层开采较为垂直导致上部岩体拉剪应力集中，形成倾倒式滑坡；赵家沟滑坡因采空区顶板沉降形成“漏斗状”位移场，剪应变增量集中于采空区边缘；山阳滑坡变形机制则表现为滑体剪切滑移与采空区顶板挠曲变形，位移场呈“漏斗状”分布。

在破坏模式方面，三者均表现为在长期自重、降雨入渗等作用下，经历多阶段渐进式破坏过程，均经历蠕变累积变形、结构损伤累积(包括裂隙扩展与岩体抗剪强度降低)、临界失稳三阶段。不同点则表现为：鸡冠岭滑坡为“倾倒-滑移”模式，以陡倾层状岩体弯曲倾倒为主导，采空区陡立为上部岩层的弯曲倾倒提供侧向变形空间，最终通过下部剪切滑移实现失稳；赵家沟滑坡为“蠕滑-拉裂”模式，体现为孔隙水压力累积引发应变软化效应，地下采空沉降促进蠕滑变形，后缘拉裂贯通触发滑坡；山阳滑坡为“滑移-溃屈”模式，表现为驱动块体顺层滑移，开采沉降促进后缘张拉裂缝扩展，阻滑块体(锁固段)应力集中，最终剪断溃屈失稳。

4 结论

对比研究了灰岩山区的鸡冠岭滑坡、碎屑岩山区的赵家沟滑坡及变质岩山区的山阳滑坡三个采空区滑坡。分析了三者在易灾地质结构、失稳机制及破坏模式等方面的异同，得到以下认识：

(1)当采空区位于区域性褶皱构造的翼部，以及斜坡具备陡峭的地形条件、良好的临空条件、上陡下缓的“靴状地形”、卸荷拉裂面等易灾地质结构特征，尤其是具备二元结构特征时，易于发生滑坡灾害，上述要素可作为采空区滑坡的早期识别特征。

(2)根据具体结构形式差异，将二元结构分类如下：鸡冠岭滑坡区域为硬岩夹软岩型，受厚层硬岩夹薄层

软岩结构的影响，整体强度较高；赵家沟滑坡区域为软硬岩互层型，受薄层碎裂状软硬岩互层结构的影响，整体强度较低；山阳滑坡区域为典型上硬下软型，强度差异较大。

(3) 地下矿层开采会诱发上覆岩体内部发生应力重分布现象，造成上覆岩体位移量增大，产生下沉塌陷及采动裂隙，加速滑坡演化进程，降低斜坡整体稳定性。鸡冠岭滑坡由于采空煤层较为垂直导致上部岩体拉剪应力集中，形成倾倒式滑坡；赵家沟滑坡因采空区顶板沉降形成“漏斗状”位移场，剪应变增量集中于采空区边缘；山阳滑坡变形机制则表现为滑体剪切滑移与采空区顶板挠曲变形。

(4) 由于斜坡在采空区分布特征、失稳机制等方面存在差异，使其呈现出不同的破坏模式类型。鸡冠岭滑坡为“倾倒-滑移”模式，陡倾层状岩体弯曲倾倒，采空区陡立提供侧向变形空间，最终下部剪切滑移实现失稳；赵家沟滑坡为“蠕滑-拉裂”模式，孔隙水压力累积引发应变软化效应，地下采空沉降促进蠕滑变形，后缘拉裂贯通触发失稳；山阳滑坡为“滑移-溃屈”模式，驱动块体顺层滑移，开采沉降促进后缘张拉裂缝扩展，阻滑块体应力集中最终溃屈失稳。

References

CHEN Z S, ZHANG X G, 1994. A hazard→chain of landslide→collapse→debris flow, river stoppage in Wulong county, Sichuan Province on April 30, 1994[J]. Mountain Research, 12(4): 225-229. (in Chinese with English abstract)

FATHI SALMI E, NAZEM M, KARAKUS M, 2017. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. Engineering Geology, 217: 141-152.

GAO F, CHEN A Y, XU F D, et al., 2024. Strength characteristics of sliding zone soil and early warning Analysis of reserved thickness at the base of deep cutting slope along the layer [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(03):279-288. (in Chinese with English abstract)

GAO L J, FENG B, JIN F D, 2024. Control of surface movement and deformation during coordinated mining of large dip coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 55(9): 157-165. (in Chinese with English abstract)

HAN Y T, 2023. Experimental study on interfacial shear strength characteristics of soft and hard rock: a case study of siliceous slate and mudstone[D]. Chang 'an University (in Chinese with English abstract)

HE K, GAO Y, Wang W P, et al., 2018. Physical model experimental study on deformation and failure of overlying rock slope under the condition of steep coal seam mining[J]. Journal of Geomechanics, 24(3): 399-406. (in Chinese with English abstract)

JONES D B, SIDDLE H J, REDDISH D J, et al., 1991. Landslides And Undermining: Slope Stability Interaction With Mining Subsidence Behaviour[C]//7th ISRM Congress. OnePetro.

KANG J L, 2023. Analysis of Apparent Tendency Instability Mechanism of Bedding Rock Landslide: A Case Study of “8.12” Landslide in Shanyang County, Shaanxi Province[D]. Chang 'an University (in Chinese with English abstract)

LI B, WANG G Z, FENG Z, et al., 2015a.Failure mechanism of steeply inclined rock slopes induced by underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,34 (6): 1148 ~ 1161. (in Chinese with English abstract)

LI B, WANG G Z, FENG Z, et al., 2015b.Limit equilibrium and stability analysis of steep stratified rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,37 (5) : 839 ~ 846. (in Chinese with English abstract)

LI B, YIN Y P, GAO Y, et al., 2020. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(4): 5-13. (in Chinese with English abstract)

LI B, ZHAO C, LI J, et al., 2023. Mechanism of mining-induced landslides in the karst mountains of Southwestern China: a case study of the Baiyan landslide in Guizhou[J]. Landslides, 20(7): 1481-1495.

LI Z Q, XUE Y G, LI S C, et al., 2017. Deformation features and failure mechanism of steep rock slope under the mining activities and rainfall[J]. Journal of Mountain Science, 14(1): 31-45.

LIANG F, SHI W B, QIAN X L, et al. 2022. Study on deformation and failure mechanism of gentle anti-dipped slope induced by mining in mountain area：A case study of the Pusa village rock avalanche of Guizhou [J]. Journal of Natural Disasters, 31(4): 190-200. (in Chinese with English abstract)

LIU Y L, YANG T H, MA K, et al., 2023.Study on overburden damage and prevention of runoff disaster in multiseam mining of gully region[J]. Coal Science and Technology, 51(7): 243−254. (in Chinese with English abstract)

LONG J H, ZHU Q H, NI X L, 2021. Study on landslide model induced by underground resources exploitation: taking mining-triggered landslide as an example[J]. Coal Science and Technology, 49(8): 181-187. (in Chinese with English abstract)

MENG H Y, ZHAN J W, LU Q Z, et al., 2023.Kinematic characteristics and numerical simulation analysis of "8·12" giant landslide in Shanyang County, Shaanxi Province [J] . Journal of Engineering Geology，31(6) : 1910 − 1928.(in Chinese with English abstract)

REN W, GUO C, PENG Z, et al., 2010. Model experimental research on deformation and subsidence characteristics of ground and wall rock due to mining under thick overlying terrane[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(4): 614-624.

TANG J X, LI W, ZHANG Z J, et al., 2022. Analysis of deformation and failure characteristics of steep rock under repeated mining[J]. Safety in Coal Mines, 53(7): 215−220. (in Chinese with English abstract)

WANG G Z, 2015. Research on the Mechanism of Steep Dip Layered Rock Slopes: A Case Study of Jiguanling Landslide [D]. Shanghai Jiao Tong University (in Chinese with English abstract)

WANG G Z, LI B, FENG Z, et al., 2014. Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing[J]. Hydrogeology ＆ Engineering Geology,41(5):101 − 106.(in Chinese with English abstract)

WANG J Y, LI L, ZHENG D G, et al., 2018a. Characteristics of Apparent Dip Slide and Movement Process of the "8 ·12" Shanyang Rockslide[J].Journal of Catastrophology,33(1):111 − 116. (in Chinese with English abstract)

WANG J Y, SHI X Y, 2018b. Mechanical analysis of apparent dip Buckling mechanism of steep stratified oblique rock: a case study of Shanyang rockslide in Shaanxi province[J]. Journal of Geomechanics, 24(4): 482-489. (in Chinese with English abstract)

WANG J Y, SHI X Y, WU L, et al., 2018c. Formation Mechanism of Apparent Dip Slide in the Shanyang" 8.12" Landslide[J]. Northwestern Geology, 51(3): 232-239.(in Chinese with English abstract)

WANG J Y, WANG G L, SHI X Y, 2019. Mechanical analysis of apparent dip creep- buckling failure of Shanyang rockslide in Shaanxi Province[J]. Geology in China, 46(2): 381-388(in Chinese with English abstract).

YAN H Y, CHEN W X, LENG Y Y, et al., 2023. Study on deformation characteristics of mining slope under different mining modes —Taken fa'er coal mine as an example[J]. Guizhou Geology, 40(2): 145−152. (in Chinese with English abstract)

YANG H L, FAN X Y, ZHANG Y Y, et al., 2016. Study on formation mechanism and motion characteristics of Yanjiagou landslide in Shanyang[J]. Subgrade Engineering, 6: 30-35. (in Chinese with English abstract)

YANG X J, CHENG M J, WANG J, et al., 2023. Pressure relief mechanism of roof cutting of Fa'er coal mine in Guizhou and the evolution law of ground pressure during secondary mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(10): 2358−2371. (in Chinese with English abstract)

YANG Z M, HUANG G M, 1999. Deformation mechanism of declivity caused by underground mining movement[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 19(2): 105-109. (in Chinese with English abstract)

YAO X, YU K, ZHANG Y S, et al., 2014. Mechanisms of catastrophic landslide on January 11, 2013, in Zhenxiong county: fluidization initiation and movement liquefaction of high porosity soil[J]. Chin. J. Rock Mech. Eng, 33(5): 1047-1054. (in Chinese with English abstract)

YIN X D, 2019. The study of deformation and damage mechanism of the bedrock landslide under underground mining [D]. Chang 'an University (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, 2010. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide-a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 29(2): 217-226. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, 2022. Methods and Application Practices of Geological Disaster Risk Investigation and Evaluation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,33(04):5-6. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, GAO S H, 2024. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,35(1): 1-18. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, LIU C Z, CHEN H Q, et al., 2013. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiong county,Yunnan province[J]. Journal of Engineering Geology,21 (1) : 6 − 15.(in Chinese with English abstract)

YIN Z Q, XU Y Q, JIANG X W, 2015. The key triggering factor and its mitigation implication of Zhaojiagou catastrophic landslide in Zhenxiong County, Yunnan province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 26(2): 36-42. (in Chinese with English abstract)

ZENG Q L, WANG W F, CHEN H Y, et al., 2016. Characteristics of Zhaojiagou colluviums landslide and its failure mechanism on slope structure, Zhenxiong county[J]. Journal of Engineering Geology, 24(4): 510-518. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S B, SHI W B, WANG Y, et al., 2024. Process of deformation and destruction with super-high-steep and medium-gentle anti-dip slope by underground mining[J]. Journal of Engineering Geology, 32(5): 1669−1682. (in Chinese with English abstract)

ZHAO J J, LIN B, MA Y T, et al., 2016. Physical modeling on deformation characteristics of overlying rock mass above mined-out area in gently inclined coal seam[J]. Journal of China Coal Society,41(6) : 1369 − 1374.(in Chinese with English abstract)

ZHOU L, WANG Y, LIU Y Z, et al., 2024. Deformation and failure mechanism of phosphorus mine slopes under mining action and its impact range[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 26(2): 87−99. (in Chinese with English abstract)

ZHU S N, WEI Y J, WANG P, et al., 2021a.Research on deformation characteristics and instability mechanisms of large monoclinal layered bedrock landslides: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County, Chongqing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(4): 739-750. (in Chinese with English abstract)

ZHU S N, YIN Y P, LI B, 2018.Evolution characteristics of weak intercalation in massive layered rockslides—A case study of Jiweishan rockslide in Wulong , Chongqing[J].Journal of Engineering Geology,26(6) : 1638 − 1647.(in Chinese with English abstract)

ZHU S N, YIN Y P, LI B, 2019. Shear creep behavior of soft interlayer in Permian carbonaceous shale[J]. Rock. Soil. Mech, 40: 1377-138. (in Chinese with English abstract)

ZHU S N, YIN Y P, TIE Y B, et al., 2024. Deformation Characteristics and Reactivation Mechanism of Giant Ancient Landslide in Wumeng Mountain Area: A case study of the Daguan Ancient Landslide [J/OL][J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-10. (in Chinese with English abstract)

ZHU S N, YIN Y P, WANG M, et al., 2021b.Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 43(4): 688-697. (in Chinese with English abstract)

ZHU Y F, YAO X, YAO L H, et al., 2022. Identification and risk assessment of coal mining-induced landslides in Guizhou Province by InSAR and optical remote sensing [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 268- 280. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈自生，张晓刚，1994．1994－04－30 四川省武隆县鸡冠岭滑坡→崩塌→碎屑流→堵江灾害链[J]．山地研究(4)：225-229.

高峰，陈爱云，许方党，等，2024．顺层深路堑边坡滑带土强度特性和基底预留厚度预警分析[J]．地质科技通报，43(03):279-288.

高利军，冯斌，晋发东，2024．大倾角煤层协调开采地表移动变形控制[J]．煤矿安全，55(9):157-165.

韩宇涛，2023．软硬岩界面剪切强度特性试验研究——以硅质板岩与泥岩为例[D]．长安大学.

贺凯，高杨，王文沛，等，2018．陡倾煤层开采条件下上覆山体变形破坏物理模型试验研究[J]．地质力学学报，24(3)：399-406.

亢佳乐，2023．顺层岩质滑坡视倾向失稳机制分析——以陕西山阳“8.12”滑坡为例[D]．长安大学.

李滨，王国章，冯振，等，2015a．地下采空诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究[J]．岩石力学与工程学报，34(6)：1148-1161.

李滨，王国章，冯振，等，2015b．陡倾层状岩质斜坡极限平衡稳定分析[J]．岩土工程学报，37(5)：839-846.

李滨，殷跃平，高杨，等，2020．西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]．水文地质工程地质，47(4)：5-13.

梁风，史文兵，钱孝龙，等，2022．山区平缓倾内采动斜坡变形破坏机制研究——以贵州普洒崩塌为例[J]．自然灾害学报，31(4)：190-200.

刘一龙，杨天鸿，马凯，等，2023．沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究[J]．煤炭科学技术，51(7)：243−254.

龙建辉，朱清华，倪向龙，2021. 地下资源开采诱发的一种滑坡模式研究——以采空触发滑坡为例[J]．煤炭科学技术，49(8):181-187.

孟桓羽，占洁伟，卢全中，等，2023．陕西山阳“8·12”大型山体滑坡运动特征及数值模拟分析[J]．工程地质学报，31(6)：1910-1928.

唐建新，李伟，张择靖，等，2022．重复采动下陡岩变形破坏特征分析[J]．煤矿安全，53(7)：215-220.

王国章，2015．陡倾层状岩质斜坡破坏机制研究——以鸡冠岭崩塌滑坡为例[D]．上海交通大学.

王国章，李滨，冯振，等，2014．重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟[J]．水文地质工程地质，41(5)：101-106.

王佳运，李林，郑定国，等，2018a．“8·12”山阳滑坡视向滑动特征与运动过程[J]．灾害学，33(1)：111-116.

王佳运，石小亚，2018b．陡倾层状斜向岩层视向溃屈机制力学分析——以陕西山阳滑坡为例[J]．地质力学学报，24(4)：482-489.

王佳运，石小亚，武立，等，2018c．“8.12”山阳滑坡视向滑动成因机理[J]．西北地质，51(3)：232-239.

王佳运，王根龙，石小亚，2019．陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析[J]．中国地质，46(2)：381-388.

严浩元，陈文祥，冷洋洋，等，2023．基于不同开采方式作用下采动斜坡变形特征研究—以贵州发耳煤矿为例[J]．贵州地质，40(2)：145−152.

杨海龙，樊晓一，张友谊，等，2016．山阳烟家沟滑坡成因机制与运动特征研究[J]．路基工程(6)：30-35.

杨晓杰，程满江，王炯，等，2023. 贵州发耳煤矿二次回采切顶卸压机制及矿压演化规律[J]. 岩石力学与工程学报，42(10):2358-2371.
杨忠民，黄国明，1999. 地下采动诱发斜坡变形机理[J]. 西安矿业学院学报(2)：10-14.
姚鑫，余凯，张永双，等，2014. "1·11"镇雄灾难性滑坡滑动机制——高孔隙度土流态化启动与滑动液化[J]. 岩石力学与工程学报，33(5)：1047-1054.
阴晓冬，2019. 地下采动作用下岩质边坡变形破坏机理研究[D]. 长安大学.
殷跃平，2010. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报，29(2)：217-226.
殷跃平，2022. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(04):5-6.
殷跃平, 高少华，2024. 高位远程地质灾害研究：回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报，35(01):1-18.
殷跃平，刘传正，陈红旗，等，2013. 2013 年 1 月 11 日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报，21(1)：6-15.
殷志强，徐永强，姜兴武，2015. 云南镇雄赵家沟灾难性滑坡主控因素及减灾启示[J]. 中国地质灾害与防治学报，26(2)：36-42.
曾庆利，王炜风，陈宏宇，等，2016. 镇雄赵家沟滑坡特征及基于坡体结构的失稳机理研究[J]. 工程地质学报，24(4)：510-518.
张顺波，史文兵，王勇，等，2024. 地下采动作用下超高陡中缓倾逆向坡变形破坏过程研究[J]. 工程地质学报，32(5)：1669-1682.
赵建军，蔺冰，马运韬，等，2016. 缓倾煤层采空区上覆岩体变形特征物理模拟研究[J]. 煤炭学报，41(6)：1369-1374.
周雷，王勇，刘永志，等，2024. 采动作用下磷矿山边坡变形破坏机制和影响范围研究[J]. 防灾科技学院学报，26(2)：87—99.
朱赛楠，魏英娟，王平，等，2021a. 大型单斜层状基岩滑坡变形特征与失稳机制研究——以重庆石柱县龙井滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报，40(4)：739-750.
朱赛楠，殷跃平，李滨，2018. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 工程地质学报，26(6)：1638-1647.
朱赛楠，殷跃平，李滨，2019. 二叠系炭质页岩软弱夹层剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学，40(4)：1377-1386.
朱赛楠，殷跃平，铁永波，等，2024. 乌蒙山区巨型古滑坡变形特征与复活机理研究——以大关古滑坡为例[J]. 岩土工程学报：1-10.
朱赛楠，殷跃平，王猛，等，2021b. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J]. 岩土工程学报，43(4)：688-697.
朱怡飞，姚鑫，姚磊华，等，2022. 基于 InSAR 和光学遥感的贵州鬃岭采煤滑坡识别与危险性评价[J]. 地质力学学报，28(2)：268-280.