

# 基于层次分析法的峰丛地貌 采动失稳致灾因素研究

苟仁涛,江成玉\*,王沉,夏勋鹏,蔡春林

(贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为了探究峰丛地貌浅埋煤层开采诱发山体失稳致灾的影响因素,以贵州纳雍“8·28”山体崩塌事故为例,通过对崩塌区现有的地质概况、开采活动、气候条件等潜在致灾因素分析,采用层次分析法建立层次分析模型,构建 3 个一级指标、9 个二级指标,定量分析确定影响山体稳定性的各指标权重.研究表明:连续降雨对坡体的稳定性相对影响最大,所占权重为 0.857 1,远远大于其他 8 个因素;层次分析法的计算结果与事故调查的实际情况具有较好的一致性,证明了该方法的合理性.该研究结果对峰丛地貌浅埋煤层开采诱发山体失稳的预防和治理提供了一种思路.

**关键词:**峰丛地貌;浅埋煤层;地表移动变形;层次分析法;致灾因素

中图分类号:P642 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)03-0001-06

## On Disaster-causing Factors of Mining-induced Instability of Peak-cluster Landform Based on Analytic Hierarchy Process

GOU Rentao, JIANG Chengyu, WANG Chen, XIA Xunpeng, CAI Chunlin

(Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the influencing factors of mountain instability induced by shallow coal seam mining in peak-cluster landform, taking the mountain collapse accident on August 28<sup>th</sup> in Nayong County of Guizhou Province as an example, the analytic hierarchy process (AHP) model is established through the analysis of the potential disaster-causing factors such as the existing geological situation, mining activities and climatic conditions in the collapse area. Three first-level indexes and nine second-level indexes are constructed to quantitatively determine the weight of each index affecting the stability of the mountain. Results show that continuous rainfall has the largest relative impact on slope stability, with the weight of 0.857 1, which is far greater than the other eight factors. The calculation results obtained by AHP are in good agreement with the actual situation of accident investigation, which proves the rationality of the method. The research results have provided an idea for prevention and treatment of mountain instability induced by shallow coal seam mining in peak cluster landform.

**Keywords:** peak cluster landform; shallow coal seam; surface movement and deformation; AHP; disaster-causing factor

贵州是中国南方煤炭资源最丰富的省区,含煤面积超过全省面积 40%以上,主要集中于六盘水煤田、织纳煤田,是浅埋煤层发育的典型地区<sup>[1]</sup>.随着西部经济建设的全面发展,对煤炭资源的需求量急剧增加,

收稿日期:2021-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904081);贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2021]一般 354);贵州省科技计划资助项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 264)

\*通信作者,E-mail:cyjiang1981@163.com

贵州作为西南地区煤炭资源的主要供给地,煤炭开采规模、范围也将不断扩大.贵州矿区地表多为峰丛地貌特征,陡倾层状山体发育<sup>[2]</sup>,浅埋煤层采动易导致上覆山体裂隙场、应力场及位移场发生改变,进而影响山体的稳定性,诱发地质灾害,例如山体崩塌、滑坡等(如贵州省纳雍县“8·28”山体崩塌事故)<sup>[3]</sup>.峰丛地貌下浅埋煤层开采诱发陡倾层状山体失稳机理和发生条件尚不明确,开展采动诱发陡倾层状山体失稳机理研究具有重要的科学意义.

对于浅埋煤层开采的地表移动变形规律、覆岩运动及裂隙演化规律,国内许多学者采用不同的方法对其进行了研究<sup>[4-6]</sup>,主要有工程地质分析、极限平衡分析、数值模拟及物理模型试验分析等方法<sup>[7-9]</sup>,并取得了丰富的研究成果.这些研究主要体现在地表移动变形规律、采动作用对山体稳定性影响的定性评价等方面,只有较少的研究涉及贵州峰丛地貌条件<sup>[10]</sup>.同时较多学者采用层次分析法对瓦斯灾害防治、底板突水等煤矿灾害<sup>[11-13]</sup>以及一般的滑坡稳定性和边坡防治等<sup>[14-17]</sup>进行了研究,但对于浅埋煤层采动影响下的滑坡、崩塌、边坡稳定等致灾因素的确定,鲜有采用层次分析法进行研究.

笔者以贵州省纳雍县“8·28”山体崩塌事故为例,对其致灾因素进行分析,建立具有3个一级指标和9个二级指标的层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)评价指标体系<sup>[17]</sup>,确定影响山体稳定性的各指标权重,以期客观地反映地下采空诱发陡倾山体失稳成因机制.

## 1 崩塌区概况及致灾因素影响分析

### 1.1 地质概况及其影响分析

普洒煤矿位于贵州纳雍城东约29 km处,属张家湾镇管辖.普洒煤矿“8·28”山体崩塌区是普洒村南东侧的陡峭崖壁——老鹰岩,海拔高程1 800~2 170 m,垂直高差370 m.崩塌区为中山侵蚀溶蚀斜坡地貌,斜坡整体呈上陡下缓,上部为陡崖,坡度 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,下部为缓斜坡地貌,坡度 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,相对高差约200 m.出露地层为三叠系飞仙关组粉砂岩,二叠系长兴、大隆组灰岩,龙潭组粉砂质泥岩、泥岩及煤层,岩层产状 $175^{\circ}\angle 8^{\circ}$ .老鹰岩崩塌全貌如图1所示.

老鹰岩崩塌区位于陡崖上部50~200 m,岩石整体失稳,向 $330^{\circ}$ 方向发生倾倒式崩塌,冲击斜坡中部后撒落,掩埋桥边组和老鹰岩组部分居民区.崩塌体左侧受前缘小山丘阻挡,移动堆积向近西方向.崩塌堆积形态为不规则扇形,前缘堆积最大横向宽度约400 m,纵长约600 m,最大块体约 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 15\text{ m}$ .崩塌堆积体体积约60万 $\text{m}^3$ .

总的来说,崩塌区地形陡峻,相对高差大,岩体风化强烈,节理裂隙较发育,岩体比较破碎,稳定性较差.



图1 老鹰岩崩塌区全貌

### 1.2 开采活动影响分析

普洒煤矿采用长壁采煤法,炮采工艺,顶板管理采用全部垮落法.区内可采煤共6层:M6, M10, M14, M16, M18, M20,煤层平均厚度约1.6 m,平均倾角为 $7^{\circ}\sim 12^{\circ}$ .截至灾害发生时,普洒煤矿已对这6个煤层进行了部分开采,其中M6和M10煤层已有掘进巷道见煤,但尚未回采.现有采空区主要分布在矿区中部,该采空区上覆岩层厚度小于安全开采深度,在井下开采过程中,山体的应力场发生改变,原有的地质环境遭

到破坏,引发山体滑坡、崩塌、地面沉降、地裂缝和泥石流等地质灾害的潜在可能性大,采空区影响程度严重.

根据贵州某勘察设计单位2017年9月提供的《贵州省纳雍县张家湾镇普洒煤矿井上井下对照图》及实测地裂缝分布,对照M10,M14和M16采空区分布位置(图2a),绘制崩塌源区采动影响范围剖面图,如图2b所示.从采空区边缘至地表裂缝边界,根据裂缝角方向可知,煤层开采后采空区顶板岩层沿倾向与走向的移动特征基本相同.

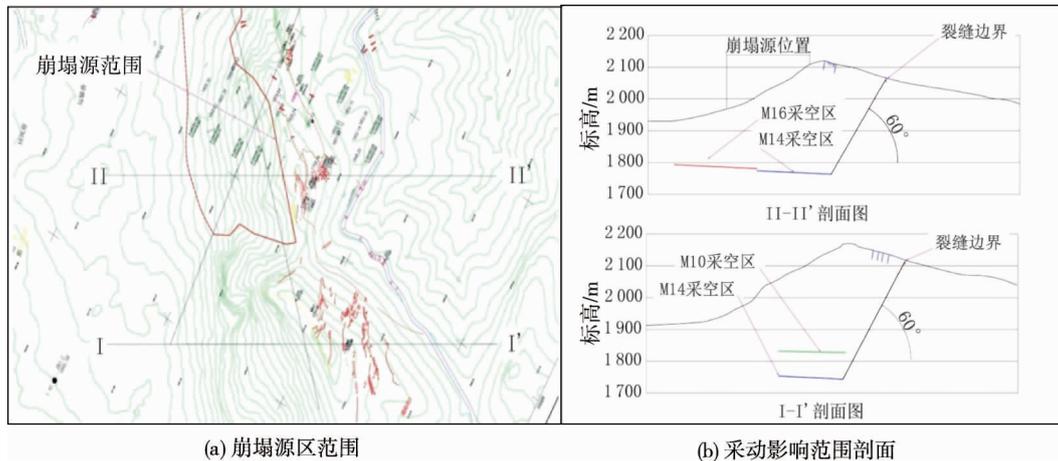


图2 崩塌源区采动影响范围

### 1.3 降雨情况及其影响分析

根据2017年张家湾镇6月—8月逐日降雨量资料显示,从6月20日至6月30日,纳雍县出现持续性降雨天气,累计降雨量达161.6 mm.从老鹰岩崩塌体发生崩塌前的监测点监测资料分析,在6月20日至6月30日持续性降雨后,坡体残坡积层裂缝饱水程度及静水压力大幅增加,坡体裂缝变形已开始发生变化.7月6日至7月15日,纳雍县又出现一次持续性降雨天气,累计降雨量达226 mm.7月18日,老鹰岩崩塌危岩体山顶发生大面积垮塌后,监测人员已无法前往山顶进行监测(监测数据截至2017年7月15日).持续的降雨使久旱后坡体重量和岩土物理力学性质发生急剧变化,雨水沿采空区裂隙向深部渗漏渗入,在软化结构面岩土强度的同时,产生孔隙水压力,进而加剧了采空区覆岩的沉降变形,诱发山体崩塌.

## 2 基于层次分析法的采动失稳致灾因素分析

### 2.1 构建层次分析法模型

层次分析法(AHP)是萨蒂教授提出的一种多层次因素权重决策分析方法.该方法通过建立多因素、多层次的评价系统,将定性信息定量化,使复杂的评价问题明朗化.目前,该方法主要应用在安全科学和环境科学领域,在安全生产科学技术方面的应用主要包括煤矿安全研究、危险化学品评价、油库安全评价、城市灾害应急能力研究以及交通安全评价等<sup>[18]</sup>.本文通过对崩塌区现有的地质环境、开采活动情况及气候条件等潜在致灾因素的分析,以峰丛地貌浅埋煤层开采诱发山体失稳为目标层,选取地质环境(B1)、人类工程活动(B2)、气候条件(B3)这3个影响因素为一级指标层,二级指标层含9个影响因素(C1~C9),建立层次分析结构模型,如图3所示.

### 2.2 构造判断矩阵及一致性检验

判断矩阵是以某个因素为比较准则,通过比较两两因素对准则层的重要程度(A-B即以A为准则对B层因素两两比较)而建立.计算判断矩阵各因素与其准则之间的相对重要度的方法有多种,常用方法有

和法、特征根法、幂法等,本文采用特征根法.判断矩阵一致性指标用CI表示,  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$  ( $\lambda_{\max}$ 为最大特征根, $n$ 为判断矩阵的阶数).当 $n < 3$ 时,二阶矩阵是完全具有一致性的,即 $CI = 0$ .当 $n \geq 3$ 时,则需通过

一致性比例 CR 进行一致性检验,其中  $CR = \frac{CI}{RI}$  (RI 为平均随机一致性指标,由表 1 确定).当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵的一致性检验通过;反之,不能通过一致性检验,需对排序权重赋值问题进行调整.

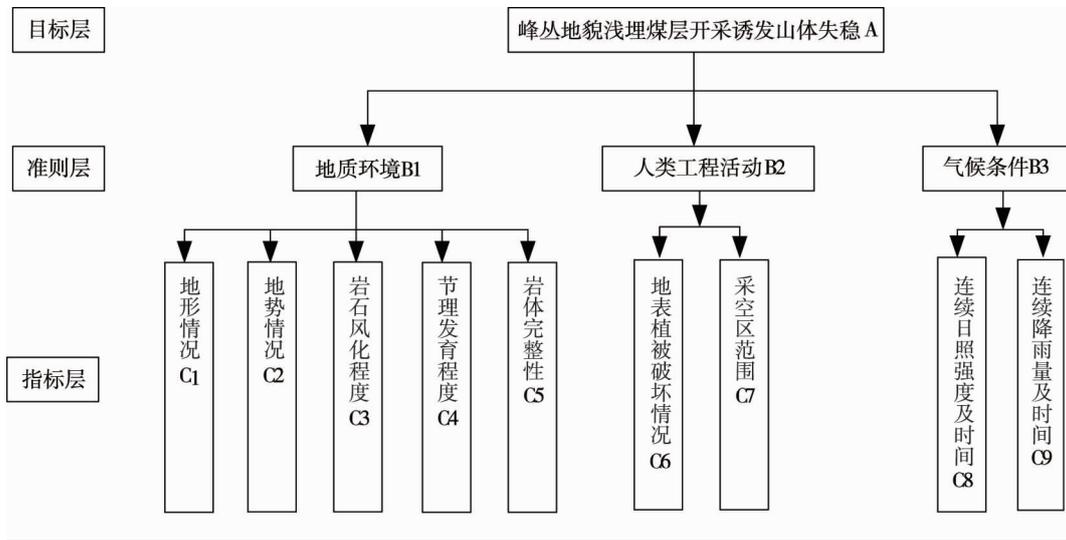


图 3 层次分析结构模型

表 1 随机一致性指标 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

结合崩塌区基本资料,邀请相关专家及工程技术人员对各因素重要程度按 1~9 级标度进行评价,建立判断矩阵,并进行一致性检验,得到不同因素的主观权重,如表 2~表 5 所示.

表 2 一级评价指标各因素比较判断矩阵及一致性检验

A	B1	B2	B3	权重	一致性检验
B1	1	3	3	0.593 6	$\lambda_{max} = 3.053 6,$ $CR = 0.051 6 < 0.1$
B2	1/3	1	2	0.249 3	
B3	1/3	1/2	1	0.157 1	

表 3 地质环境下的各因素比较判断矩阵及一致性检验

B1	C1	C2	C3	C4	C5	权重	一致性检验
C1	1	1/2	1/2	1/2	1/3	0.088 3	$\lambda_{max} = 5.395 1,$ $CR = 0.088 2 < 0.1$
C2	2	1	1/3	1/2	1/3	0.109 8	
C3	2	3	1	1/3	1/3	0.163 6	
C4	2	2	3	1	1/3	0.232 6	
C5	3	3	3	3	1	0.405 7	

表 4 人类工程活动下的各因素比较判断矩阵及一致性检验

B2	C6	C7	权重	一致性检验
C6	1	1/5	0.166 7	$\lambda_{max} = 2, CI = 0$
C7	5	1	0.833 3	

表 5 气候条件下的各因素比较判断矩阵及一致性检验

B3	C8	C9	权重	一致性检验
C8	1	1/6	0.142 9	$\lambda_{max} = 2, CI = 0$
C9	6	1	0.857 1	

### 2.3 权重比较及致灾因素影响分析

通过以上计算,一级指标及二级指标均满足一致性检验.9个因素的权重大小:地形情况 C1 为 0.088 3,地势情况 C2 为 0.109 8,岩石风化程度 C3 为 0.163 6,节理发育程度 C4 为 0.232 6,岩体完整性 C5 为 0.405 7,地表植被破坏情况 C6 为 0.166 7,采空区范围 C7 为 0.833 3,连续日照强度及时间 C8 为 0.142 9,连续降雨量及时间 C9 为 0.857 1.比较各项影响因素的权重,可定量分析得出主要因素和次要因素:持续性降雨是诱发山体崩塌的主要因素,再加上煤层埋深浅,开采活动的影响使原岩应力重新分布,诱导采动纵向破断,裂隙向上扩展贯通,使得岩体的稳定性降低,进而造成山体整体破断失稳,引发塌陷、山体滑坡、地表非连续变形、水土流失等系列灾害.浅埋煤层采动失稳示意图如图 4 所示.

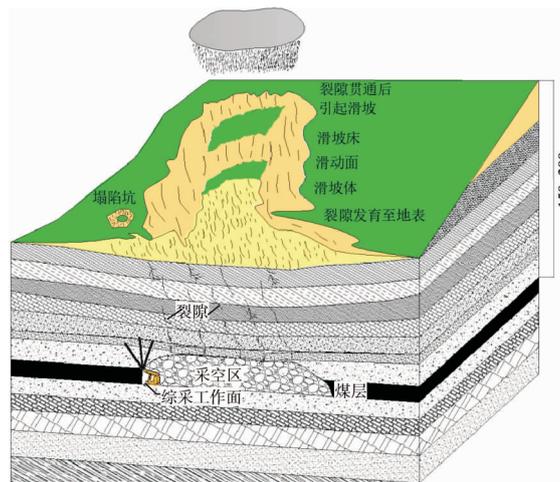


图 4 峰丛地貌浅埋煤层采动失稳示意

## 3 现场调查结果

经事故现场专家调查,此次崩塌地质灾害成因主要有 3 个方面:

- 1) 地质环境因素.崩塌区地形陡峻,相对高差较大,岩体的风化影响强烈,节理裂隙较发育,岩体完整性差,较破碎,稳定性差.
- 2) 人类工程活动因素.根据普洒煤矿的井上井下对照图等资料显示,崩塌位于普洒煤矿采空区覆岩变形影响范围区.煤矿开采使原有坡体的应力平衡被破坏,导致坡体变形,诱发崩塌灾害.
- 3) 气候影响因素.崩塌区气候特征总体呈现“久晴久雨”,降雨期间,岩体内部裂隙充水形成静止水压力,危岩带表层岩体的稳定性降低;天晴期间,危岩带表面岩体长期暴晒,体积膨胀,岩体的风化破碎程度发生了急剧变化.在持续的降雨条件下,斜坡岩土体遭受雨水的软化,内聚力和内摩擦角减小,滑坡抗滑能力下降.

综合以上因素分析,持续性降雨、采空区范围、地势情况等影响因素对灾害发生的贡献较大,与事故现场专家调查结果基本一致.采矿活动对崩塌事故具有重大作用,但不构成致灾的直接原因.持续性降雨导致雨量激增,诱发崩塌,加上崩塌区域山高坡陡、岩体破碎以及采矿活动综合影响加剧了灾害的发生.

## 4 结论

- 1) “8·28”崩塌滑坡的 9 个影响因素中连续降雨对坡体的稳定性相对影响最大,所占权重为 0.857 1,远远大于其他 8 个因素的权重,表明降雨是导致此次崩塌滑坡的关键因素,也印证了崩塌滑坡灾害多发生在雨季.
- 2) 采用层次分析法对各致灾因素的研究与工程实际基本一致,证明了该方法的可靠性,为峰丛地貌浅埋煤层开采诱发山体失稳预防和治理提供了一种参考依据.

## 参考文献:

- [1] 徐宏杰.贵州省薄-中厚煤层群煤层气开发地质理论与技术[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [2] 苏泽志,苏宁.贵州山体滑坡与防护研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(3):137-140.
- [3] FAN X, XU Q, SCARINGI G, et al. The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report[J]. Landslides, 2019, 16:139-154.
- [4] ZHENG D, FROST J D, HUANG R Q, et al. Failure process and modes of rockfall induced by underground mining: A case study of Kaiyang Phosphorite Mine rockfalls[J]. Engineering Geology, 2015, 197:145-157.
- [5] FAN X Y, TANG J J, TIAN S J, et al. Rainfall-induced rapid and long-runout catastrophic landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou, China[J]. Landslides, 2020, 17:2161-2171.
- [6] ZHANG G B, ZHANG W Q, WANG C H, et al. Mining Thick Coal Seams Under Thin Bedrock-Deformation and Failure of Overlying Strata and Alluvium[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(5): 1553-1563.
- [7] 谷拴成,洪兴.概率积分法在山区浅埋煤层地表移动预计中的应用[J].西安科技大学学报,2012,32(1):45-50.
- [8] 王玉川.缓倾煤层采空区上覆山体变形破坏机制及稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2013.
- [9] 贺凯,高杨,王文沛,等.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.2018,24(3): 399-406.
- [10] 郭建达,韩连昌,田焱,等.峰丛地貌浅埋煤层工作面覆岩移动规律研究[J].采矿技术,2018,18(3):36-39.
- [11] 冯占文,刘贞堂,李忠辉,等.应用层次分析-模糊综合评判法对煤与瓦斯突出危险性的预测[J].中国安全科学学报, 2009,19(3):149-154.
- [12] 郭德勇,胡杰,王彦凯.煤与瓦斯突出层次-可拓预警技术及应用[J].中国安全科学学报,2017,27(1):88-92.
- [13] 侯恩科,纪卓辰,车晓阳,等.基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J].煤炭学报,2019,44(10): 3164-3173.
- [14] 何海鹰.基于层次分析法的边坡处治方案比选[J].中外公路,2012,32(3):42-45.
- [15] 杨秀贵,仇森,冯一鸣.改进层次分析法的滑坡灾害危险性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(6): 773-777.
- [16] 郑重,赵云胜,张卫中,等.改进的模糊层次分析法在采动滑坡稳定性影响因素评价中的应用[J].安全与环境工程, 2016,23(5):109-112.
- [17] 张懿,晏鄂川,胡致远,等.改进层次分析法在沐抚滑坡场地建设适宜性评价中的应用[J].科学技术与工程,2020,20(26):10956-10964.
- [18] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.