

易连兴. 鬃岭高位滑坡带地下水补径排特征及致灾作用研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 559-566.
DOI: 10. 11932/karst20200411

鬃岭高位滑坡带地下水补径排特征 及致灾作用研究

易连兴

(中国地质科学院岩溶地质研究所 / 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林
541004)

摘要: 本文以贵州省纳雍县鬃岭崩塌滑坡带两个滑坡区为例, 通过水文地质调查、水动力场分析、水化学和流量动态对比分析, 得出结论(1)天然条件下, 崩塌滑坡带存在3个相对独立的地下水系统, 采煤活动改变了局部地下水径流排泄方向, 使上部基岩裂隙水、中部岩溶水补给到下部基岩裂隙水中, 最后从坑道或泉排泄出地表。(2)流量动态和钙离子含量变化表明, 雨季中部岩溶水灌入式补给到了采空区坑道中, 同时也表明老鬃岭镇滑坡区山体浅部垂直裂缝发育, 左家寨滑坡区山体浅部至深部垂直裂缝均有发育。(3)鬃岭崩塌滑坡体内部地下水以非饱和水下渗运动为主, 不存在饱和地下水水流场, 故而不存在水动力驱动滑坡影响作用。(4)在鬃岭崩塌滑坡孕灾或灾害触发过程中, 地下水对垂直裂缝、滑动结构面的发展和岩体破坏、失稳主要起到加速和促进作用。本文对岩溶石山区类似滑坡机理研究有一定意义。

关键词: 岩溶石山; 高位滑坡; 非饱和地下水; 致灾作用; 钙离子

中图分类号: P641; P642.22 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2020)04-0559-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 前言

自2000年以来, 鬃岭崩塌滑坡带先后发生了20余次地质灾害, 造成较大人员伤亡和巨额财产损失, 其中鬃岭镇左家营村岩脚组于2004年12月3日凌晨3时40分发生山体崩塌, 造成44人死亡。近年来, 受暴雨和人类工程活动的影响, 滑坡等地质灾害越发突出, 鬃岭崩塌滑坡带多处出现大型滑坡, 2015年6月6日凌晨3时, 岩脚组再次发生山体崩塌, 造成了3人死亡。目前, 崩塌滑坡带的后缘山体严重撕裂, 坡顶随处可见地面裂缝、塌陷坑, 裂缝沿山体陡崖顶部边缘展布, 多条裂缝长数百米甚至达千米, 裂缝宽度达2~6 m, 多处存在发生大规模崩塌滑坡的可能。

众多学者^[1-10]对鬃岭崩塌滑坡的形成机理进行

了研究, 在自然影响因素方面认识基本相同, 大体可归纳为: ①良好的崩塌滑坡临空面。鬃岭崩塌滑坡体所在坡体为一东西绵延数公里、相对高差大于30 m的近直立陡崖带, 陡崖的临空面岩体凹凸相间分布, 向外突出岩体有利于形成崩塌滑坡。②有效结构面。崩塌滑坡体后缘灰岩发育有平行于临空面的裂隙结构面, 伴随长期风吹、日晒、雨淋和强烈的风化、溶蚀侵蚀, 造成岩体破碎, 裂隙越来越大, 越来越深, 最后导致崩塌滑坡的发生。③重力失衡是崩塌滑坡首要触发因素。由于崩塌滑坡体后缘裂隙的发育, 逐渐与山体脱离, 同时由于下伏软弱地层的风化, 无法支撑上覆危岩体的重力, 发生重力卸荷而产生崩塌滑坡。

自上世纪60年代以来, 该区域一直进行煤矿开

基金项目: 国家重点研发计划项目“岩溶山区特大滑坡成灾模式与风险防范技术”(2018YFC1504800)和课题一“岩溶山区岩溶过程与孕灾机理”(2018YFC1504801)

第一作者简介: 易连兴(1963—), 男, 学士, 研究员, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: yilx79@karst.ac.cn。

收稿日期: 2020-05-20

采,进入 21 世纪,由于矿山地质环境问题日趋严重^[11-15],沿崩塌滑坡带已禁止采煤活动。目前,因采煤等人为因素对崩塌滑坡产生影响有两种认识,第一种观点认为鬃岭崩塌滑坡属于自然因素为主的大型地质灾害,地下深部开采煤炭或放炮振动等可能对灾害有一定的影响,但不是直接影响因素;并用历史上存在崩塌滑坡佐证该观点:在数公里长凹凸相间分布的陡崖带,凡凹形陡崖下方都存在残坡积碎石土,说明历史上这些地方都可能产生过崩塌。残坡积碎石规模较大处还保留了一些相对平台,这些古滑坡体与人为活动无关。第二种观点认为煤炭采空区对鬃岭崩塌滑坡地质灾害具有决定性作用。陡崖带有 13 家煤矿,长时间、大规模地开采使得山体采空,导致陡崖上部拉应力集中,下部压应力集中,为上部岩体提供了一个下挫变形空间和变形应力条件,造成上部岩体破碎并发育众多走向平行于临空面的拉裂缝;随着下挫变形增大和陡倾结构面裂缝的扩展,拉裂缝外侧岩体失稳逐渐脱离母体,整体向临空面倾倒形成崩塌滑坡。依据山体顶部裂缝位移或变形实时监测资料表明地下采矿对危岩的形成起到了决定性的作用。

已有文献大部分是从工程地质角度分析鬃岭崩塌滑坡成因,仅个别学者提出了大气降水及其入渗对崩塌滑坡的影响,但没有深入分析滑坡区的地下水补给、径流、排泄等水文地质条件及其对崩塌滑坡影响。

通过野外调查、水动力场分析、水化学数据分析等综合分析,在讨论地下水补给、径流、排泄条件及

其对崩塌滑坡影响的同时,探讨鬃岭高位崩塌滑坡形成机制及研究意义。高位滑坡^[16-20]在西南岩溶石山区是比较频发的一种地质灾害,本文论述的地下水对高位滑坡影响的分析方法对类似地质灾害机理研究具有一定参考意义。

1 自然条件

崩塌滑坡带位于纳雍县西南部鬃岭镇境内,距纳雍县城 15 km,地理坐标东经 105°12′41″~105°16′50″,北纬 26°40′18″~26°44′48″。地貌类型为侵蚀剥蚀地貌,地势总体东高西低、南高北低,海拔 1 623~2 334.5 m;山体最高点为马中岭,海拔 2 334.5 m,崩塌滑坡带分布高程 2 208~2 300 m。受构造、侵蚀作用影响,形成北东走向、坡度 50°~80°、高 100~300 m 的长约 6 km 陡崖,陡崖下部斜坡变缓,坡度约 30°~45°;陡崖以北区域为侵蚀丘陵。

在构造上,崩塌滑坡带地处纳雍—百兴复杂褶皱变形区白岩脚向斜与包谷山背斜交接部位,属纳雍—百兴复杂褶皱变形区白岩脚向斜南东翼,构造总体发育以南西—北东向为主。所处区域的地层有二叠系中统茅口组(P_2m),二叠系上统峨眉山组($P_3\beta$)、龙潭组(P_3l)、长兴大隆组(P_3c+d),三叠系下统飞仙关组(T_1f)、永宁镇组(T_1yn^1)和第四系(Q),主要地层岩性特征见表 1。地层总体倾向北西,产状 320°~350°∠10°~18°。受区域构造影响,崩塌滑坡带节理裂隙发育,有 2 组优势节理裂隙:一组为北东东向,平行于陡崖面;另一组为北西向,垂直于陡崖面。

表 1 地层岩性一览表
Table 1 Stratigraphic lithologies

地层		岩性主要特征
二叠系	中统 茅口组(P_2m)	厚层块状灰岩,厚 158~647 m
	峨眉山玄武岩($P_3\beta$)	隐晶或拉斑玄武岩,杏仁及气孔构造发育,夹火山角砾岩、凝灰角砾岩及凝灰岩、灰岩,偶夹燧石层及砂泥岩,厚 131~342 m
	上统 龙潭组(P_3l)	主要由泥岩、砂质泥岩、砂岩、粉砂岩及炭质页岩、(多层)煤等组成,厚 156~378 m。多被坡残积层覆盖,地貌上多呈缓坡、沟谷。
	长兴大隆组(P_3c+d)	粉砂岩、砂质页岩、炭质页岩夹硅质灰岩及燧石灰岩,厚 30~69 m。
三叠系	下统 飞仙关组(T_1f)	总厚 537 m,按岩性可分为 3 段: 第 1 段(T_1f^1)杂色泥岩为主,及砂质泥岩、粉砂质泥岩,厚度约 110~125 m。 第 2 段(T_1f^2)中厚层灰岩,厚度 10~18 m。 第 3 段(T_1f^3)为粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩,厚度大于 300 m。
	永宁镇组(T_1yn^1)	中厚层灰岩,厚度 10~120 m。

2 地下水补径排特征及滑坡影响作用

2.1 地下水补径排特征

根据岩性和地下水补径排特征,崩塌滑坡区域

可划分上部基岩裂隙水、中部岩溶裂隙管道水、下部基岩裂隙水等3套地下水系统。上、中部地下水主要向北、北东方向径流排泄,下部地下水系统则向崩塌滑坡临空面方向径流排泄(表2,图1)。

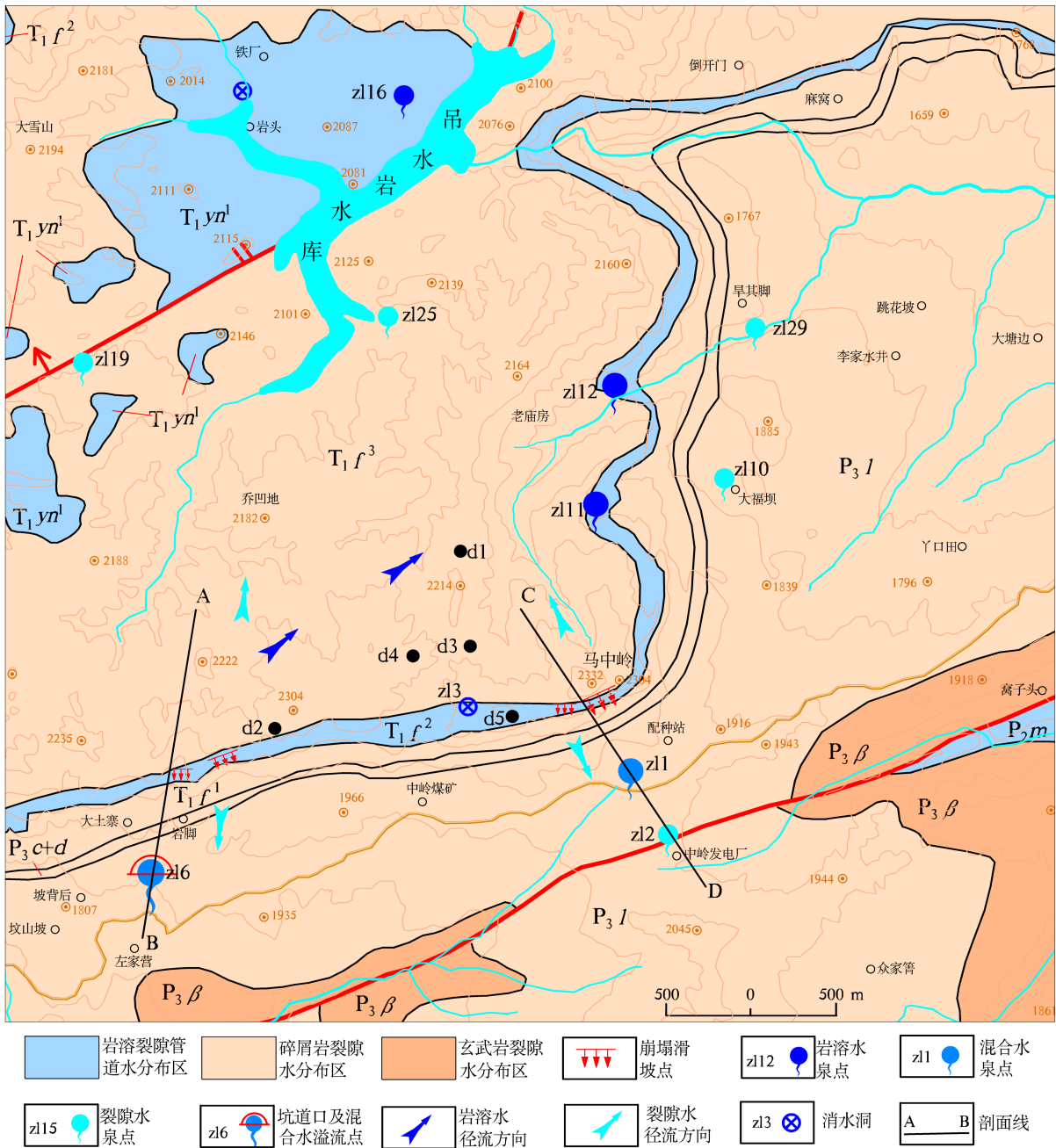


图1 水文地质简图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogeology

在垂直方向上,上、中、下3个含水岩组存在一定的地下水补给关系,上部碎屑岩地下水下渗补给中部岩溶地下水,中部岩溶地下水进一步下渗补给下部碎屑岩地下水。区域地质调查资料和地质勘查经验表明,该地区的碎屑岩基岩裂隙深部不发育,导水

性差,天然条件下三者之间地下水垂直补给量小。区域内的吊水岩水库就以上部碎屑岩良好的隔水性能作为成库条件。

本次研究于2019年7月24日和12月10日分别对该区进行了雨季、枯季水文地质调查及取样分析。

表2 地下水系统一览表
Table 2 Groundwater systems

序号	地下水系统	地层岩性	天然条件下主要补径排特征
1	上部基岩裂隙水系统	飞仙关组3段(T ₁ f ³)碎屑岩	分布于滑坡体上部及以北区域;浅部基岩裂隙有一定发育,深部不发育,为相对隔水层。滑坡体后缘山顶为地表分水岭,其平行于临空面展布,地下水径流排泄主要受分水岭控制。分水岭以北区域或北坡主要顺地形向北、北东方向径流排泄;分水岭以南或朝向临空面区域,地形陡,出露面积小,垂直入渗水量小,未形成独立的地下水补径排系统。因此,上部地下水系统总体向北、北东径流为主。
2	中部岩溶裂隙管道水系统	飞仙关组2段(T ₁ f ²)灰岩	含水介质以岩溶裂隙和小型管道为主,尽管厚度小,但岩溶还是较发育,如:与碎屑岩(T ₁ f ³)接触带发育大型消水洞zl3。通过调查和访问,在临空面方向,与下伏碎屑岩(T ₁ f ¹)接触带未发现有泉点发育,降水期也未见有短期溢洪点,因此,天然条件下,岩溶地下水总体往北东方向zl11、zl12径流排泄。
3	下部基岩裂隙水系统	飞仙关组1段(T ₁ f ¹)、长兴大隆组(P ₃ c+d)、龙潭组(P ₃ l)碎屑岩	这套含水岩组含基岩裂隙水,地下水受地形控制,向南坡(滑坡临空面)zl1泉、zl2泉以及zl6坑道排水点等径流排泄;该含水岩组在北部区域深埋大,水文地质条件不明,且与滑坡无关,不予讨论。

根据下部基岩裂隙含水层排泄点的流量和水化学变化特征,讨论煤层开采条件下上部、中部、下部地下水系统之间的补给、径流、排泄关系^[21]。

2.1.1 流量变化特征

zl6 为一个被封的采煤坑道口,雨季地下水从坑道口以微承压方式冒出,7月24日流量约51.0 L·s⁻¹,枯水季12月10日流量为2.2 L·s⁻¹,据往年资料推算,降雨期流量大于160 L·s⁻¹。zl1 为一个裂隙泉,位于已经搬空的老鬃岭镇镇医院西侧80 m山坡下,主泉口修建成水井,雨季7月24日,地下水从井口及附近多处流出,在下游溪沟测量流量为18.5 L·s⁻¹,枯水季12月10日井内有水,井口断流,地下水从井口水泥硬化坎下渗出,流量约1.0 L·s⁻¹。zl6、zl1 流量变化系数分别为23.2、18.5倍,该变化系数尽管不是很大,但具有岩溶地下水快速补给、快速排泄特征。

表3 2019年流量变化特征表
Table 3 Flow variation characteristics in 2019

泉点编号	7月24日 流量/L·s ⁻¹	12月10日 流量/L·s ⁻¹	变化系数
zl1	18.5	<1.0	>18.5
zl2	6.7	1.5	4.5
zl6	51.0	2.2	23.2

2.1.2 水化学及其补径排特征

坑道口 zl6 雨季地下水中钙离子含量达107.60 mg·L⁻¹(表4)。根据区域资料和经验,在没有岩溶区来水补给条件下,长兴大隆组(P₃c+d)、龙潭组(P₃l)等碎屑岩裂隙水中钙离子含量通常比较低,然而,zl6 雨季地下水钙离子含量与碳酸盐岩地区岩溶泉或岩溶地下河等排泄的地下水基本相当,甚至比部分岩溶水点还高。因此,雨季水化学特征表明有大量的飞仙关组第2段(T₁f²)岩溶水补给到zl6所处的坑道里,且所排泄的地下水以岩溶地下水为主。枯水季,zl6 地下水钙离子含量为45.00 mg·L⁻¹,一方面反映出岩溶地下水垂直补给量大幅减少,另一方面反映了下部含水岩组的碎屑岩岩性特征以及自身地下水的水化学特征。

根据zl6 流量和水化学变化可以推出下列过程。人为采煤活动形成大面积采空区并导致岩层下沉,垂直裂隙发育,部分垂直裂隙贯穿至采空区(如图2中Y1和Y2),增加了上部基岩裂隙水、中部岩溶地下水的下渗径流量。雨季强降水时期,上部碎屑岩、中部灰岩出露区域的拉裂缝,拦截了绝大部分地表产流,并使其垂直补给到中部岩溶地下水系统内,伴随着大量降水入渗补给,大部分灰岩体内充满地下水,考虑南坡临空面没有泉点和溢洪点,即地下水位没有达到灰岩与下伏碎屑岩接触带(a点)高程,最高水

表 4 崩塌滑坡区水样测试结果($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 4 Groundwater test results in collapse-landslide area($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

取样位置	SiO ₂	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	PO ₄ ³⁻	OH ⁻	COD _{Mn}	游离 CO ₂	取样时间
zl1	12.02	0.75	14.52	48.98	8.23	<0.02	0.47	119.70	61.49	0.00	6.74	<0.002	0.068	0.040	0.00	<0.5	5.89	12月 10日
zl2	10.29	0.93	24.65	28.44	9.15	<0.02	16.83	61.62	49.74	0.00	34.04	<0.002	0.072	0.030	0.00	<0.5	19.44	
zl6	9.77	1.34	328.87	45.00	18.68	<0.02	7.58	404.08	589.60	1.78	2.39	<0.002	0.70	0.12	0.00	<0.5	0.00	
zl1	10.41	0.88	13.00	39.49	6.97	<0.02	3.25	101.54	55.48	0.00	9.14	<0.002	0.084	0.080	0.00	<0.5	3.88	7月 24日
zl2	9.45	1.07	25.97	31.29	9.75	<0.02	20.74	66.92	47.29	0.00	49.69	<0.002	0.069	0.100	0.00	<0.5	14.53	
zl6	8.03	1.66	215.14	107.60	52.17	<0.02	8.62	667.52	264.66	0.00	18.32	<0.002	0.26	0.040	0.00	<0.5	0.97	

位应该在滑坡山体内部(如b点),此时,一部分岩溶地下水向zl11、zl12径流排泄,一部分通过垂直裂隙(缝)直接补给到坑道内,并通过坑道口排出地表。枯水季,上部碎屑岩、中部灰岩出露区域接收地面的降水入渗补给量大幅减少,并随着北东方向的zl11、zl12岩溶泉的排泄消耗,灰岩体内部最高水位逐渐往

北消退,并超越垂直裂隙Y2的范围(如c点),此时,沉降变形区大面积为包气带,仅有部分包气带岩溶水垂直下渗补给到坑道内。因此,雨季岩溶水补给量大,坑道口zl6排泄量大和钙离子浓度高,枯水季岩溶水补给量小,坑道口zl6排泄量和钙离子浓度也大幅减小。

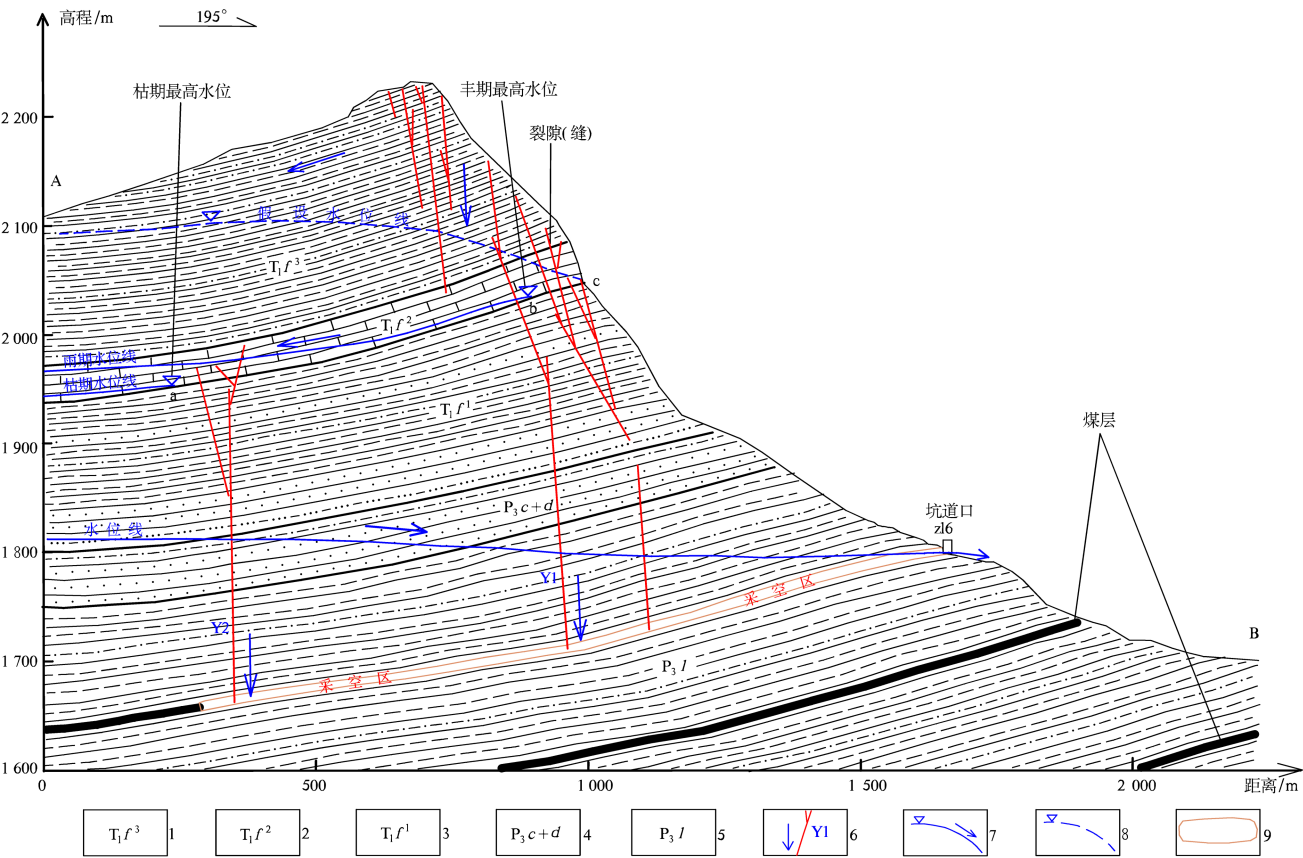


图2 AB段剖面水文地质结构简图

Fig. 2 Hydrogeological structure sketch of section AB

1—飞仙关组3段碎屑岩 2—飞仙关组2段灰岩 3—飞仙关组1段碎屑岩 4—长兴大隆组碎屑岩 5—龙潭组碎屑岩 6—拉裂缝和垂直入渗方向,其中Y1、Y2分别表示水平方向上浅部、深部拉裂缝 7—实际水流方向水位线 8—假设水位线 9—煤矿采空区

zl1 裂隙泉的钙离子含量相对稳定,雨季、枯水季分别为 $44.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $48.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。zl1 的钙离子含量与 zl6 枯季含量比较接近,但比 zl2 泉同期含量分别大 $13.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (30.0%) 和 $20.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (42.0%), 结合流量变化和钙离子含量综合比较认为上部岩溶地下水对 zl1 有一定影响。这个区域采空区小、深度也小,在山体深部灰岩饱水带不发育垂直裂隙 Y2(图2),

仅在山体浅部发育裂隙 Y1(图3);降水期间,接收地面补给后,地下水在灰岩地层内没有长距离运移和长时间赋存,就快速地通过裂隙 Y1 直接下渗到坑道或 zl1 的排泄系统内通过 zl1 排出地表。因此,尽管降水期地下水补给量大,但由于地下水对灰岩溶蚀作用时间短、携带的钙离子少,导致 zl1 泉钙离子含量不高。枯水季,岩溶地下水对 zl1 裂隙泉影响则与 zl6 相同。

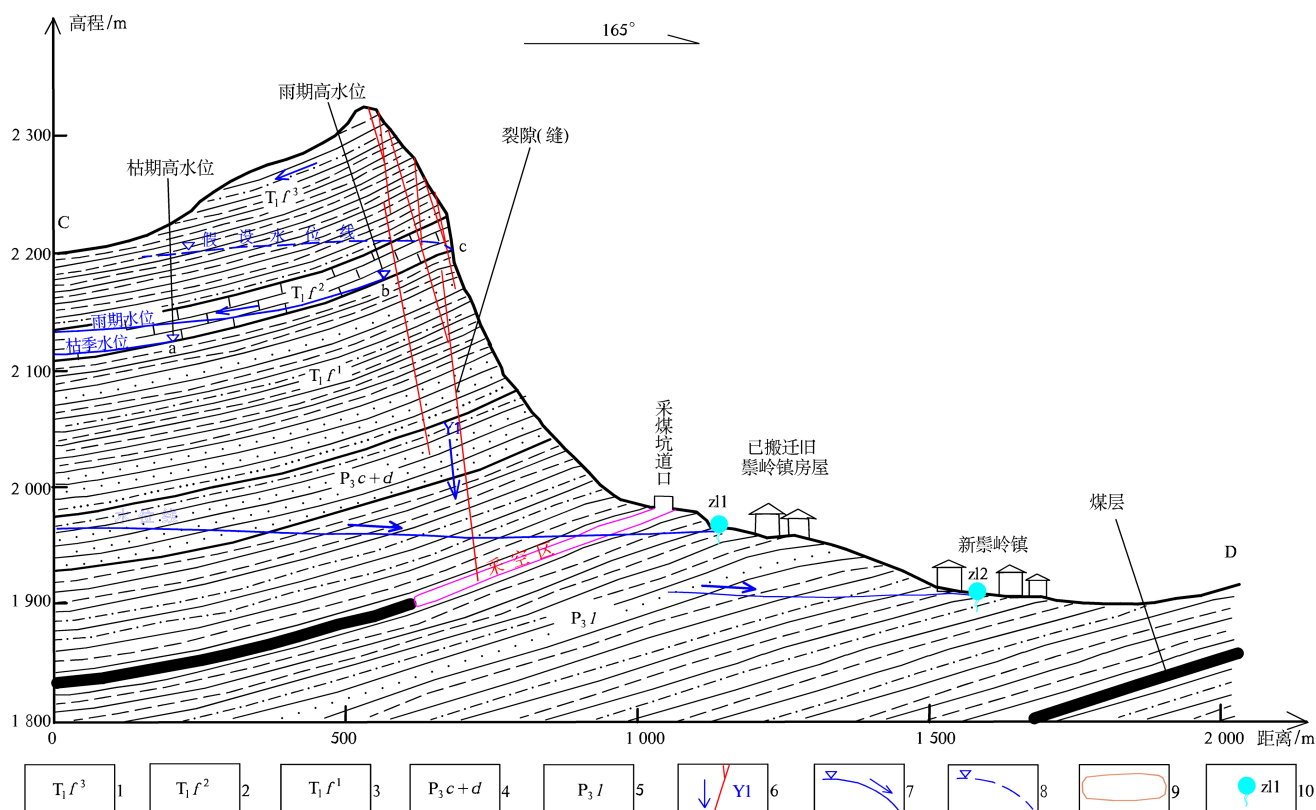


图3 CD剖面水文地质结构简图

Fig. 3 Hydrogeological structure sketch of section CD

1—飞仙关组3段碎屑岩 2—飞仙关组2段灰岩 3—飞仙关组1段碎屑岩 4—长兴大隆组碎屑岩 5—龙潭组碎屑岩 6—拉裂缝和垂直入渗方向,其中Y1、Y2分别表示水平方向上浅部、深部拉裂缝 7—实际水流方向水位线 8—假设水位线 9—煤矿采空区 10—泉

根据表3和表4中zl2泉流量和钙离子含量,还可表明垂直裂隙Y1没有贯穿至该泉的排泄系统,或上部岩溶水没有进入zl2地下水系统内。

综合上述流量和水化学分析,采煤活动使三个相互独立的地下水系统之间产生了水力联系,在岩层变形区域形成了一种新的地下水补给排关系,上部碎屑岩(含中部裸露灰岩区)拉裂缝起到增大积雨和加大入渗补给量作用,中部灰岩体内强大的岩溶空间起到地下水储存及其对下层地下水输送运移作用,下部地下水系统则起排泄功能。

2.2 地下水滑坡影响作用

通常意义上,可概括为三种地下水崩塌滑坡致灾作用^[21-22],即力学作用(如:静水压力和动水压力作用)、物理作用(如:湿重增加及润滑、泥化软化作用等)和化学作用(如溶解、溶蚀等)。由不同作用方式结合不同水文地质工程地质以及地形地貌等条件,形成各种水—岩耦合致灾模式。对于鬃岭崩塌滑坡,部分学者提到了上述三种地下水滑坡影响作用,有学者特别论述了静水压力和动水压力对崩塌滑坡的影响,个别学者还提到了后缘中某条拉裂缝由于

下渗通道堵塞形成局部充水的影响作用,这种特殊影响作用在其他滑坡点也有讨论^[23]。

不容置疑,地下水对鬃岭崩塌滑坡孕灾过程、触发或启动过程起到了物理作用和化学作用。雨水形成的地表径流通过坡顶顶部的裂缝渗漏到坡体裂隙内,伴随长期的溶蚀侵蚀,一方面降低了裂隙的力学性能,对垂直裂缝、滑动结构面的发展和岩体破坏起到促进作用;另一方面雨水会使结构面的填充物软化,降低其抗剪强度,如果裂隙中存在大量的黏土填充,黏土被雨水液化后产生膨胀力,进一步破坏岩体的稳定性,对危岩体起到加快失稳作用。

综上所述,崩塌滑坡后缘区域,包括拉裂缝强发育区,上部基岩裂隙地下水、中部岩溶地下水主要向北、北东径流,径流方向与临空面方向相反。在崩塌滑坡体内部没有形成如剖面图2和图3中虚线水位线表征的饱和地下水水流场形态,只有地下水往滑坡临空面方向径流排泄这种情形,地下水才会对滑坡产生水动力力学作用。因此,鬃岭崩塌滑坡体内地下水主要以非饱和水垂直运动为主,没有地下水静水压力和动水压力滑坡影响作用。

假设 P 为滑坡体内岩溶区水头、 W 为滑坡岩层重力、 F 为滑动面摩擦阻力,地下水应力场 $\sigma(P)$ 和岩层应力场 σW 在滑动面上与摩擦阻力 F 的平衡关系,滑坡区水岩耦合模式一般关系为:

$$\sigma(P) + \sigma W = F \quad (1)$$

鬃岭崩塌滑坡体内没有 $\sigma(P)$ 水动力场作用,降水后的物理化学作用简化为岩层湿重增加 w 、滑动面阻力减小为 f 的平衡关系式:

$$\sigma(W+w) = f \quad (2)$$

上面公式(2)可理解为重力失衡是该区域滑坡的主要触发因素,地下水仅起到促进作用。

有关滑坡划分归类问题,相关文献^[22,24]专门讨论了静水压力和动水压力作用下的水动力型滑坡。尽管西南石山地区大部分高位滑坡或多或少与降水以及地下水活动有关,不少文献把这些滑坡归类于水动力作用下的滑坡,但实际上滑坡体内不一定都存在饱和地下水运动,有关本文实例鬃岭滑坡如何划分归类,涉及到是使用公式(1)还是公式(2)进行水岩耦合稳定性评价,本文提出这一问题与同行共同讨论。

3 主要结论

(1)天然条件下,鬃岭崩塌滑坡带存在3个各自

独立的地下水径流排泄系统,其中上部基岩裂隙水、中部岩溶水总体向北、北东方向径流排泄,下部基岩裂隙水顺坡向南径流排泄;

(2)采煤活动改变了局部地下水径流排泄方向,使上部基岩裂隙水、中部岩溶水补给到下部基岩裂隙水中,最后从坑道或泉排出地表;

(3) Ca^{2+} 含量和流量变化特征表明雨季中部岩溶水灌入式补给到了采空区坑道中。进一步分析得出老鬃岭镇山体浅部垂直裂缝发育,左家营岩村脚组山体浅部至深部垂直裂缝均有发育(即CD剖面和AB剖面);

(4)鬃岭崩塌滑坡体内地下水以非饱和水下渗运动为主。在孕灾或灾害触发过程中,地下水主要对裂隙(缝)以及滑动结构面起到溶蚀和侵蚀作用、增加岩层自身重力、降低滑动结构面的摩擦阻力等滑坡促进作用。

参考文献

- [1] 王尚彦,王纯厚,张慧,等. 贵州省纳雍县岩脚寨基岩顺层滑坡特征及研究意义[J]. 贵州地质, 2003, 20(4): 239-241, 252.
- [2] 刘传正,郭强,陈红旗. 贵州省纳雍县岩脚寨危岩崩塌灾害成因初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(4): 120-121.
- [3] 吴彩燕,乔建平,王成华. 贵州省纳雍县鬃岭镇“12.3”大型崩塌灾害分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 100-102.
- [4] 陈泽富,孔纪名,王成华. 贵州纳雍崩塌式滑坡成灾特征及其避灾警示作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 32-35.
- [5] 申太奇,李嘉雨. 贵州鬃岭镇崩塌形成机理研究[J]. 科技创新, 2015(35): 19-20.
- [6] 谭宁. 纳雍县鬃岭镇煤矿开采诱发地质灾害特征分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2013(3): 41-43.
- [7] 杨乐. 基于纳雍县中岭镇中岭危岩崩塌灾害成因的初步分析与防治[J]. 黑龙江科技信息, 2014(31): 157-159.
- [8] 程宇,张健,陈进,龙举. 贵州纳雍鬃岭镇危岩带稳定性及危害范围分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 9-15.
- [9] 徐一帆,何涛,雷勇. 纳雍鬃岭片区高位崩塌(危岩)带形成机制研究[J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2019, 37(3): 37-42.
- [10] 石元帅. 乡村崩塌地质灾害风险评价与管控研究[D]. 成都理工大学, 2019.
- [11] 龚兴祥,赵弦. 纳雍县地质灾害隐患的类型、成因及预防措施[J]. 贵州地质, 2009, 26(3): 235-237.
- [12] 黄家琰,杨绍章. 贵州矿山环境问题及防治对策的思考[J]. 能源与环境, 2011(6): 75-77.
- [13] 邵林,李军. 贵州矿山地质灾害类型及其基本特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 56-60.

- [14] 杨胜元. 贵州矿山地质环境[M]. 北京:地质出版社, 2012: 1-214.
- [15] 罗炳佳, 沈诚. 贵州矿山地质环境影响评估[J]. 水文地质工程地质, 2013(1):134-138.
- [16] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张湾镇普酒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1):223-240.
- [17] 殷跃平. 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, 2010, 29(2): 217-226.
- [18] 程鹏翔, 李宗发. 贵州武陵山区中二叠统崩塌地质灾害形成机理研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4):565-572.
- [19] 何潇, 陈洪凯, 赵鹏, 等. 长江巫峡岸坡座滑式危岩稳定性研究:以望霞座滑式危岩为例[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 411-418.
- [20] 刘康祥, 李景阳, 朱东平, 等. 贵阳蟠桃宫滑坡的稳定性分析和治理[J]. 中国岩溶, 2001, 20(4):284-289.
- [21] 王志兵, 申林方, 徐则民. 头寨滑坡地下水化学特征及其反映的水-岩(土)相互作用[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 111-116, 123.
- [22] 黄润秋, 徐则民, 许模. 地下水的致灾效应及异常地下水流诱发地质灾害[J]. 地球与环境, 2005, 33(3):1-9.
- [23] 杜常见, 易庆林, 张明玉, 等. 后缘裂缝充水对裂口山滑坡稳定性的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 13-21.
- [24] 周家文, 陈明亮, 李海波, 等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1131-1145.

Characteristics and the hazard-inducing effect of groundwater systems in Zongling high-level landslide areas

Yi Lianxing

(Institute of Karst Geology, CAGS, Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract Taking two landslide areas of the Zongling collapse-landslide zone in Nayong county, Guizhou province as examples, this work conducted hydrogeological surveys, hydrodynamic field analysis, hydrochemistry research and flow dynamic comparative analysis to examine the hazard-inducing effect of groundwater. Results show that, (1) under natural conditions, there are three relatively independent groundwater systems in the collapse-landslide zone, while coal mining activities have changed the groundwater runoff-discharge direction, making the upper bedrock fissure water and middle karst water recharge into the lower bedrock fissure water, finally discharging to the surface from the pit or spring; (2) Flow dynamics and the variation of calcium ion content indicate that middle karst water in the rainy season recharges into the goaf tunnel in a injection form. They also show that vertical fractures developed in the shallow part of the slope body in the old Zongling town landslide area, as well as in the shallow to deep part of the slope body in the Zuojiazhai landslide area; (3) The groundwater flow in the Zongling landslide body is dominated by unsaturated groundwater seepage movement, no saturated groundwater flow field, thus no effect of the hydrodynamic driving landslides; (4) In the process of hazard initiation or triggering of the collapses and landslides in the Zongling area, groundwater plays a major role in accelerating and promoting development of vertical fractures and sliding structural plane, rock mass failure and instability. These research results are of certain significance to studies of the mechanism of collapses-landslides in the Zongling area and other karst mountainous areas with similar conditions in southwest China.

Key words karst rock mountain, high-level landslide, unsaturated groundwater, hazard-inducing effect, calcium ions

(编辑 张玲)