

陈小婷,黄波林,李滨,等.三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏[J].中国岩溶,2020,39(4):567-576.
DOI:10.11932/karst20200412

三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏

陈小婷¹,黄波林¹,李滨²,张鹏¹,秦臻¹

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室三峡大学,湖北宜昌 443002; 2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

摘要:三峡水库峡谷区矗立着大量岩溶不稳定库岸,危及长江黄金水道安全。采用野外勘查和力学分析,对三峡库区碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏关系进行深入研究。野外勘查发现,三峡库区碳酸盐岩库岸存在许多与溶洞、溶隙、溶蚀带、溶槽、溶沟等表层岩溶作用有关的斜坡不稳定现象。巫峡段库岸内共发育岩溶地质灾害及隐患点186处,其中滑坡隐患点37处,大型以上危岩体6个。岩体力学分析表明:强降雨、蓄水和岩体劣化会因为有效应力减少、强度下降而造成破裂的节理/裂隙逐渐扩大。同时,水位变动带岩体劣化的裂缝扩展速率比三峡的平均溶蚀率高出约1300倍,极大地加快了已经进入屈服状态的不稳定岩体的演化进程。溶蚀作用是岩溶岸坡中最基本的作用,库水长期波动加快了岩溶岸坡演化。本次研究将为三峡库区峡谷段不稳定库岸识别和防灾减灾提供技术支撑。

关键词:三峡库区;岩溶岸坡;溶蚀作用;岩体劣化;滑坡;地质灾害

中图分类号:P642.2 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)04-0567-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

三峡工程库区在构造上属于扬子陆块,构造复杂多变。区内地层齐全,从前震旦系至第四系均有出露。从震旦系到三叠系碳酸盐岩广泛分布;除了寒武系石牌组(C_{1sp})、泥盆系(D)—志留系(S)和上三叠(T_3)—侏罗系(J)为非岩溶层外,其余地层均为岩溶层(图1)。三峡峡谷岸坡深切险峻、奇峰突兀,岩溶作用发育。

针对三峡地区的岩溶地貌及溶蚀问题的研究已取得了大量成果。例如卢耀如^[1]提出黄陵穹窿上升导致西翼瞿塘峡和巫峡的喀斯特地貌由溶蚀类型转为侵蚀类型,而东翼的西陵峡则主要表现为重叠溶蚀作用过程。景才瑞等^[2]讨论了长江三峡岩溶峡谷地貌特征,分析了发育条件和岩溶现象。张加桂^[3]提

出三峡地区泥灰质岩石区对岩溶作用具有控制作用。夏凯生等^[4]分析了三峡地区乌江下游的岩溶地貌形态特征及演化过程。陈如冰等^[5]采用室内静水溶蚀实验测定了三峡地区香溪河流域震旦—三叠系碳酸盐岩的化学溶蚀速率,试验发现较纯碳酸盐岩的溶蚀速率受到CaO、SrO的促进作用和MgO的抑制作用。

同时,三峡岩溶区的地质灾害与表层岩溶作用存在密切关系。殷跃平等^[6]对巫山分布较广的松散堆积体进行研究,认为它是构造和岩溶作用下形成的滑坡体、崩塌体、泥石流堆积体和岩溶坍塌堆积体的复合体。邓珊珊等^[7]分析了巫溪县海螺湾危岩群的岩溶过程与崩塌形成机制。黄波林等^[8]调查发现了望霞危岩体顶部的岩溶塌陷坑,与大型裂缝联通形成了危岩体的部分边界。张加桂等^[9]调查了巫山

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504806)

第一作者简介:陈小婷(1979—),女,高级工程师,主要从事水文地质及工程地质方面的教学与研究工作。E-mail:344582786@qq.com。

收稿日期:2020-05-20

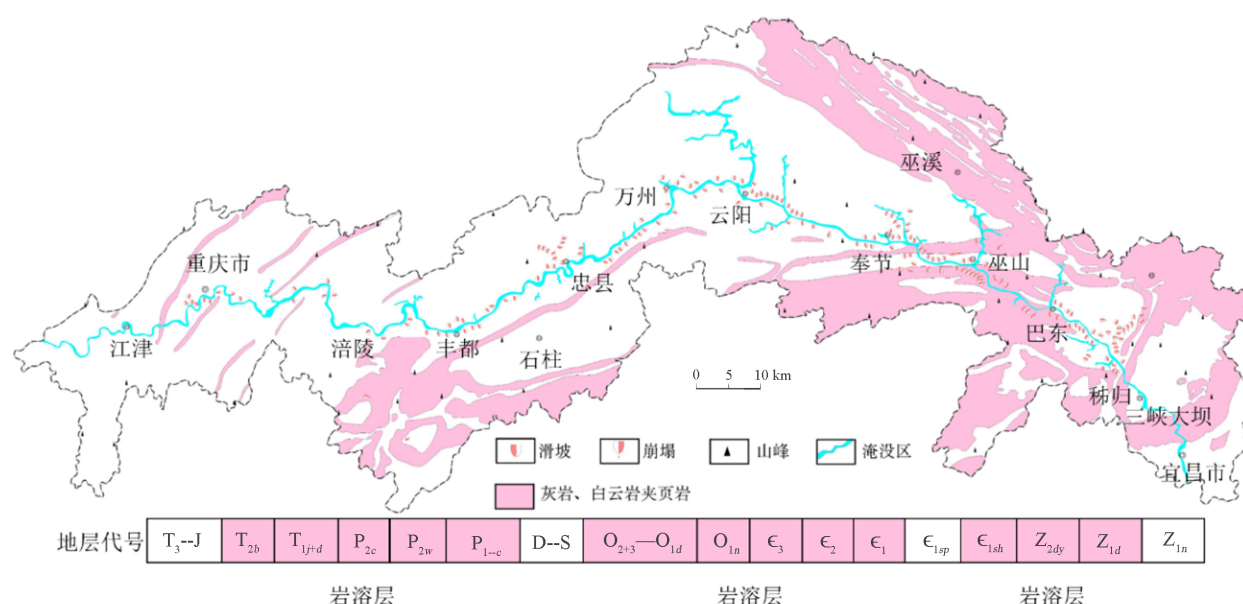


图1 三峡库区岩溶层组及碳酸盐岩分布区图

Fig. 1 Map showing distribution of karst formations and carbonate rock in Three Gorges Reservoir area

县城三叠系嘉陵江组灰岩的岩溶作用,认为岩溶地貌和其他次生营力导致该区地质灾害的发育。

三峡水库 175 m 蓄水后,30 m 的水位变动使得库岸岩溶水流系统的动水压力增大,导致岩体稳定性下降。同时,一些碳酸盐岩层中有页岩、泥灰岩等夹层,易于发育层间岩溶,导致上覆岩溶化岩体发生大规模破坏。因此,卢耀如^[10]认为边坡稳定性是长江三峡水库岩溶区重要的地质—生态环境工程效应问题之一。2008 年以来,峡谷段岩溶库岸发生了龚家坊滑坡、青石滑坡等地质灾害,造成了巨大经济损失。溶蚀岩体独特的岩性和岩体结构使得它与库水的相互作用方式特殊;溶蚀岩体岸坡防治面临巨大挑战,亟待关注^[11]。

在野外调勘的基础上,本文通过典型案例分析表层岩溶及带来的不稳定斜坡发育特征,系统地总结了三峡库区巫峡段的不稳定岩溶岸坡;采用岩体力学方法来分析岩溶库岸的破坏判据;最后讨论库水长期作用下库岸岩溶区稳定性演化进程。本次研究将为三峡库区峡谷段库岸防灾减灾提供技术支持。

1 表层岩溶与不稳定库岸特征

三峡库区的三个峡谷段和九畹溪、大宁河等支流基本为碳酸盐岩分布区,大量的不稳定碳酸盐岩库岸都与表层岩溶作用有关。表层岩溶带改造或形

成了滑坡/危岩体隐患点的物理边界、岸坡结构和水力条件,加剧或促进了这些岸坡的演化。

1.1 典型不稳定岩溶库岸

1.1.1 岩溶洞穴库岸

库区干支流内岩溶洞穴较多。有些洞穴岩屋很大,与上部岩溶管道或漏斗相连,如瞿塘峡的七道门。有些洞穴较小,洞顶与上部溶隙相连。岩溶洞穴,尤其是仍然有活跃岩溶作用的洞穴,其斜坡存在破坏失稳可能性。根据野外调勘查,岩溶洞穴库岸破坏现象包括洞穴崩塌和斜坡崩塌,以青岩子危岩体和黄南背西危岩体为例,说明岩溶洞穴库岸的变形破坏特征。

青岩子危岩体位于巫峡抱龙河口,在构造上位于青石背斜核部。地层岩性为三叠系下统嘉陵江组二段(T_{2j})浅灰色薄层泥质灰岩,产状为约 320°∠10°,存在局部褶曲。斜坡主要发育两组优势构造裂隙:a) 271°~341°∠75°~85°,延伸长 6~15 m,呈闭合状,发育间距 2~5 m,裂面平整;b) 358°~30°∠54°~86°,延伸长 6~20 m,张开 1~3 cm,裂面较光滑,局部碎块石充填,间距 3~7 m。岩溶洞壁由 a 和 b 两组结构面控制(图 2)。溶洞底部高程约为 150 m,洞顶高程为 195 m;整体立面形态近梯形。危岩体以逆断层为下游边界,上游边界以洞壁(a 组裂隙面)为界,危岩体的后缘高程约为 235 m。危岩体高约 60 m,宽约 32.0 m,厚度约 18 m;方量约 3.5×10⁴ m³。

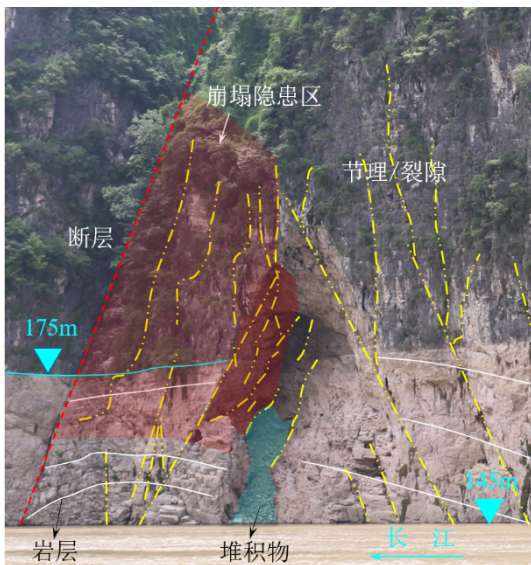


图2 岩溶洞穴和青岩子危岩体

Fig. 2 Karst cave and Qingyanzi dangerous rock mass

野外调查显示,由于卸荷作用青岩子危岩体下部岩溶洞穴侧壁及顶部岩体已出现长度不等的裂缝。下游侧壁裂缝宽2~8 cm,延伸长1.5~5 m,可见深度3~25 cm,局部块石充填,薄层泥质灰岩在侧壁处局部剪断、压裂弯曲。顶部岩体局部出现压裂弯曲。斜坡岩体溶蚀现象明显,发育有直径约5~35 cm不等的溶蚀孔穴。受岩溶洞穴临空和裂隙影响,库水周期性变动导致基座岩体强度逐步下降和进一步的溶蚀,青岩子岩体有崩塌坠落的可能。

青岩子岩溶洞穴是青岩子危岩体的一个边界,或者说青岩子危岩体崩塌其实是岩溶洞穴崩塌。很多大型溶洞的库岸崩塌与青岩子危岩体类似。还有一种岩溶洞穴位于隐患点的下部,从而影响斜坡的稳定,例如黄南背西危岩体。

黄南背西危岩体位于三峡库区巫峡右岸培石乡。岩性以厚层状白云质灰岩为主,地层为下三叠统嘉陵江组第三段(T_3^j),岩层产状为 $0^\circ \angle 13^\circ$ 。其上游边界为斜切临江坡体的1条裂缝,总体产状为 $90^\circ \angle 75^\circ$,该边界裂缝上部陡立,底部变缓;裂缝内填充少量碎石土。下游边界为一陡崖临空面,产状为 $95^\circ \angle 85^\circ$ 。危岩体的后缘为2条近平行的裂缝,产状大致为 $20^\circ \angle 83^\circ$,裂缝的最大宽度达1.5 m,自上至下宽度逐渐变窄,裂缝底部堆积着从危岩体顶部坠落而下的石块。黄南背西危岩体的三维切割边界十分清晰,其几何形态呈不规则塔柱状,底部边界为白云质灰岩与岩溶角砾岩的界面^[12]。两者岩性交界处还发育着一个长4 m,高2 m,深约4 m的溶洞(图3)。

危岩体后缘高程为185 m左右,底部边界高程在155 m附近。危岩体横宽约20 m,高约30 m,厚约6 m,危岩体总方量约为3 600 m^3 。

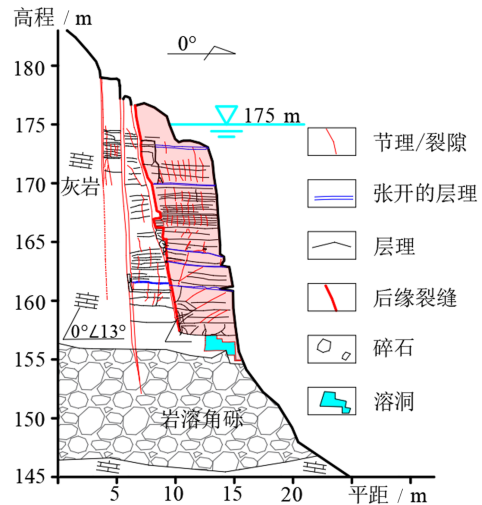


图3 黄南背西危岩体剖面图

Fig. 3 Cross section of Huangnanbeixi dangerous rock mass

在重力作用下,危岩体底部岩体承受上方岩体荷载,导致底部岩体和基座的溶洞洞顶和帮边破碎严重。在库水长期波动下,溶洞顶板塌落和溶洞边帮岩体垮落会导致危岩体整体失稳。

1.1.2 岩峰与柱状危岩体

在三峡库区峡谷段和许多支流峡谷中,很多不稳定岩溶岸坡形态以板状或柱状岩峰为主,耸立或贴在悬崖上。它们集中发育在平缓倾角的岩层中,具有相交的高倾角节理组;或者发育在陡倾角的岩层中,具有高倾角的切割节理组。这些节理或层面有一组是平行于坡面(崖面)。由于卸荷裂隙和垂直岩溶作用,很多危岩体发育在崖壁上,一些残留的岩体则形成塔柱或尖塔状。流动的雨水和地表水主要的侵蚀溶液。水在穿过节理时对裂隙岩体产生持续的溶解和剥蚀作用;岩溶可能伴随着热和楔形劈裂现象导致垂直裂隙持续破裂。当垂直裂隙贯通一定长度,柱状或板状被切割开,形成较大的高厚比时,岩峰易发生崩塌。

黄岩窝危岩群基岩由三叠系嘉陵江组第三段(T_3^j)薄—中厚层状灰岩、泥质灰岩构成,产状为 $20^\circ \sim 25^\circ \angle 5^\circ \sim 10^\circ$ 。主要发育两组优势构造裂隙:a) $320^\circ \sim 5^\circ \angle 70^\circ \sim 90^\circ$ 和b) $75^\circ \sim 95^\circ \angle 70^\circ \sim 85^\circ$ 。a组结构面平行于崖壁面,共有大于5条的该组大型结构面切割了岸

坡,形成了多层板状和柱状的危岩群(图4)。利用潜孔钻水平钻进,钻孔成型清孔后采用孔内高清摄像技术查看钻孔内部地质情况。在多个钻孔中发现有多处明显的裂隙和岩体破碎区段。例如在SPZK2钻孔深度在0.7 m、5.5 m、6.3~6.7 m、10.1~10.4 m段有明显裂隙发育,在23.1~24.8 m段出现一宽度约1.7 m的裂缝,25.4~27.6 m孔内岩体较破碎,壁面粗糙,泥质成分较重,为破碎带发育区段,其余区段孔

壁面较光滑,岩体较完整。

部分裂隙和层面溶蚀强烈。一些危岩的下游侧边界出露在崖壁转折处;在该处可清晰看到危岩体底界线受溶蚀裂隙控制。175 m至水面发育溶蚀裂隙及破碎带,倾向350°,倾角约45°,宽度约2~4 m,延伸至水面以下,长度约50 m(图4c);在高程240 m处岩体风化破碎,后缘裂隙处溶蚀形成凹腔掉块(图4d)。

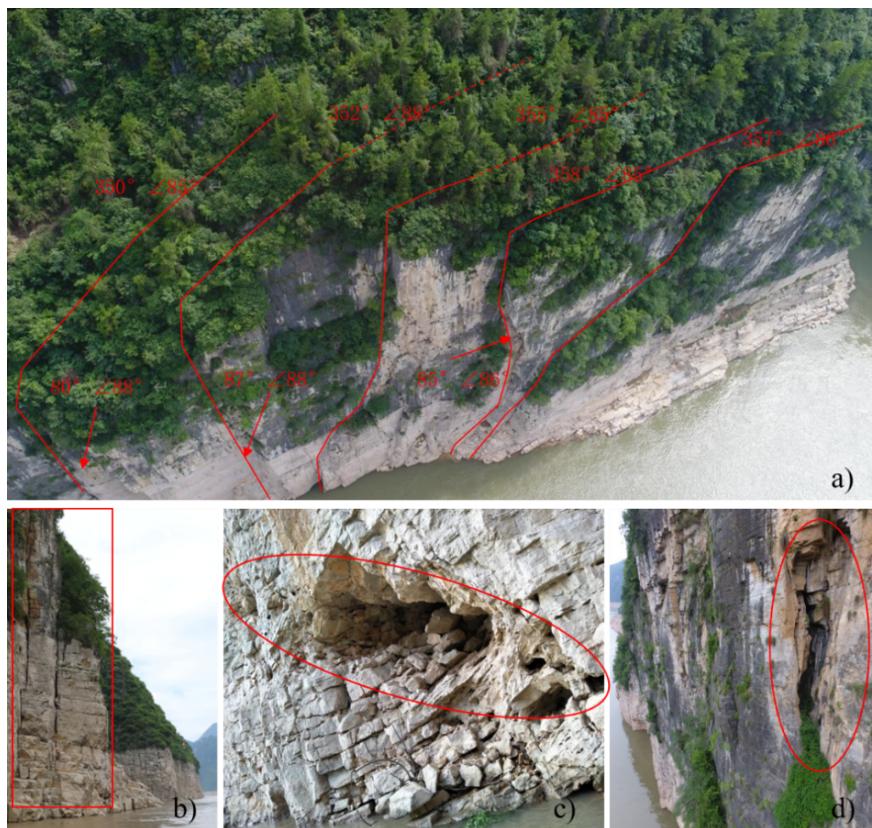


图4 黄岩窝危岩群照片(a—黄岩窝危岩群的切割裂隙 b—板状/柱状危岩体侧面照片 c—危岩体基座斜向溶蚀岩体照片 d—危岩体后缘裂缝的溶蚀凹腔照片)

Fig. 4 Photos of Huangyanwo dangerous rock mass group

危岩群有6处危岩单体,危岩单体方量5 200~540 000 m³,危岩带总体方量约为95.5万m³,危岩单体宽度约20~300 m,高度约30~120 m,厚度约4~41.3 m,主崩方向约352°~4°。受库区消落带水位涨落影响,卸荷裂隙外倾及岩体劣化破碎。危岩体受重力式压裂溃屈滑移和渐近式倾倒破坏复合变形控制。随着时间的推移,外侧和顶部的孤立岩体会逐渐崩塌。

1.1.3 节理化岩质库岸

滑坡或崩塌现象可能发生在高度节理化和破碎的碳酸盐岩岩质岸坡中,这些岸坡中可能没有明显

的岩溶洞穴或溶蚀带,但也是非常易于发生变形破坏的。水在经过节理化的碳酸盐岩时,化学溶解导致在基岩中沿着裂隙形成小的空隙,大小从几毫米到几分米不等,部分岩体仅靠很小的岩桥相连。当岩桥受到的力超过岩桥的刚度后就会发生局部破坏,导致岩体的变形。而当小变形(岩桥破坏)累计到一定程度,岸坡的抗滑力小于下滑力时,岸坡就会发生破坏。顺层的碎裂或节理化岩质岸坡易发生顺层滑移—拉裂破坏,而逆向的碎裂岩体则易发生倾倒或倾倒—滑移变形破坏。2008年11月12日发生的龚家坊崩塌就是逆向的碎裂岩体。



顺向碎裂岩体



逆向碎裂岩体

图 5 典型节理化岩质库岸

Fig. 5 Typical jointed rock mass on reservoir bank

龚家方崩塌体位于巫山向斜的南东翼、横石溪背斜的西北翼。岩层呈单斜产出,岩层产状 $348^{\circ} \angle 40^{\circ}$,斜坡坡向 160° ,为逆斜向岸坡。崩塌体主要由下三叠统大冶组三段(T_3d^3)薄层—极薄层灰岩与泥灰岩互层、下三叠统大冶组四段(T_3d^4)厚层灰岩和下三叠统嘉陵江组(T_3j^1)底部薄层白云岩等组成。该库段优势结构面有二组(图 1),A 组 $185^{\circ} \angle 73^{\circ}$ 组,平均迹长 0.3 m,张开度 0.5~2 cm,间距约 40 cm;B 组 $91^{\circ} \angle 88^{\circ}$,平均迹长 1.5 m,张开 3~10 cm,夹碎石,间距约 60 cm。层面的发育和结构面的近垂直相交发育造成坡内岩体形成破碎的互层结构。

通过对崩塌体水上部分测量,上部宽 45 m,水面处宽 194 m,上游腰长 267 m,下游腰长 272 m,高差 210 m。坡度上部 64° ,下部 44° 。崩塌总体积约为 $38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。崩塌后的钻探和地面调查显示,岩体内发育溶蚀现象,尤其是崩塌体的中上部。钻孔溶蚀现象说明基体岩溶裂隙较发育,张开度及连通性较好。岩溶地下水的流动会加剧碳酸盐岩溶蚀,促进岸坡变形。

1.1.4 其他岩溶现象的库岸

在一些碳酸盐岩地块中,沿着构造裂缝或层面的岩溶作用会缓慢地扩大地表不连续面的宽度,从而形成长约几十米、宽度较大的张开裂缝。这种岩溶现象有利于岩体破坏演化。岩溶过程沿着裂缝壁的地表水流进行侵蚀。地表腐殖质填充后,使得流水更具侵蚀性。在一些顺层斜坡中,由于岩溶作用沿着页岩或泥灰岩层发生,导致顺层形成侵蚀性凹

槽。斜坡则会沿着饱水的页岩或泥灰岩层发生蠕滑。青石 17 号斜坡就是这样的案例(图 6)。



图 6 青石 17 号斜坡的软弱层上层侵蚀现象

Fig. 6 Erosion phenomenon of the upper layer of the weak layer on Qingshi 17# slope

青石 17 号斜坡的 145~175 m 段可以很清晰的看见弯曲隆起段,岩层揉皱强烈。在冲沟内则可看见泥灰岩被侵蚀形成凹腔,凹腔深度约 5 m,最高开度达 2.5 m。水流长期作用下,泥灰岩的灰质已经被析出,泥灰岩变成了黄色的泥岩。翻开部分新鲜的泥岩,在表面有非常清晰的擦痕印膜和镜面。这说明岩体沿着这一软层发生了蠕滑。

同时,残留的古岩溶也会成为影响斜坡稳定性的因素。譬如大宁河小三峡内的船棺危岩体,其基座是原来水平岩溶管道的侧壁,危岩上厚下薄(图 7),而其后的垂直裂隙,也是垂直岩溶改造卸荷裂隙形成。



图7 船棺危岩体的古岩溶管道

Fig. 7 The ancient karst channel in the dangerous rock mass at Chuanguang

1.2 巫峡段不稳定岩溶库岸发育特征

显然,发育在岩溶岸坡的滑坡/崩塌隐患点都与岩溶作用有关联,有些甚至是非常密切的关系。三峡库区碳酸盐岩区地质灾害发育以危岩体为主,但也有滑坡,甚至是巨型滑坡,例如巴东黄土坡滑坡。下面以巫峡段(巫山大宁河口至培石)为例,说明岩溶岸坡地质灾害发育特征。

根据野外详细调查,巫峡段库岸内共发育岩溶地质灾害隐患点186处,其中滑坡隐患点37处,危岩体(群)149处。图8展示了这149处不稳定岩溶库岸的空间分布。

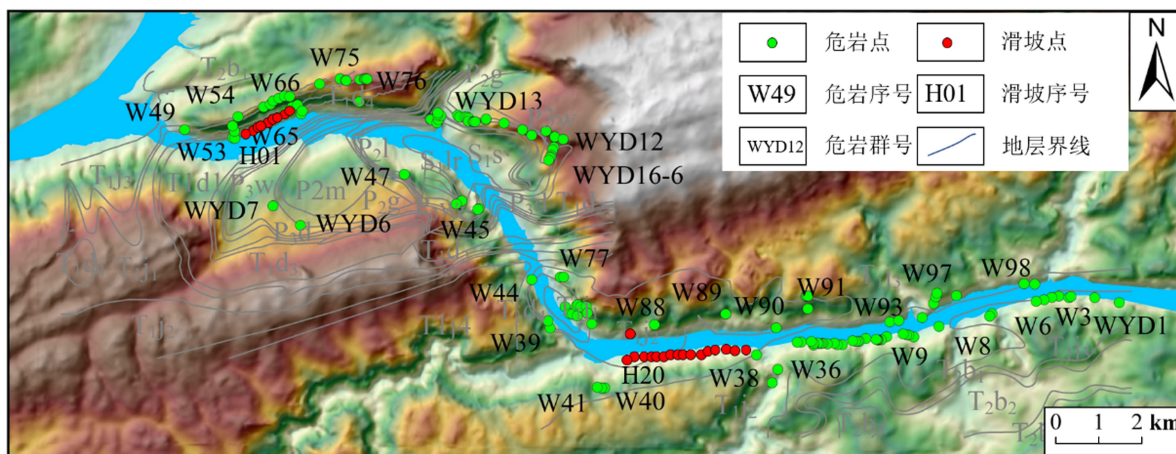


图8 巫峡岩溶地质灾害隐患点分布图

Fig. 8 Distribution of karst potential geo-hazards in Wu Gorge

滑坡隐患点主要分布在龚家坊—独龙一带的逆向岸坡区域(19个)和青石—抱龙河顺向岸坡区域(18个)。这2个区域沿河长度分别为3 km和3.4 km,总体积分别约为 $2\ 100 \times 10^4\text{ m}^3$ 和 $2\ 300 \times 10^4\text{ m}^3$ 。由于滑坡所处的构造位置和地层岩性差异不大,这些滑坡的前后缘高程和厚度差异不大。危岩体(群)在巫峡右岸有63处,左岸发育有86处。右左岸危岩体(群)的总体积分别约为 $281 \times 10^4\text{ m}^3$ 和 $131 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

统计这些危岩体(群)的体积可以发现,危岩体体积差异较大,从不到 100 m^3 到 $72 \times 10^4\text{ m}^3$ 都有分布。统计数据显示,50%的危岩体体积分布小于 $1\ 500\text{ m}^3$;78.5%的危岩体分布小于 $1 \times 10^4\text{ m}^3$;仅4%的危岩体分布大于 $10 \times 10^4\text{ m}^3$ (图9)。从这些危岩体的失稳模式来看,45%的危岩体会发生滑移式破坏,33%的危岩体属于倾倒式破坏,20%的危岩体属于坠落式破坏(图10)。这些危岩体的形态主要是板状和柱状,

分别占总数的19%和63%。可见,岩溶岩峰和柱状危岩体在岩溶区广泛发育。

岩溶岸坡的变形模式主要受层面、大型结构面和岸坡结构等因素控制。从岸坡结构和变形破坏特

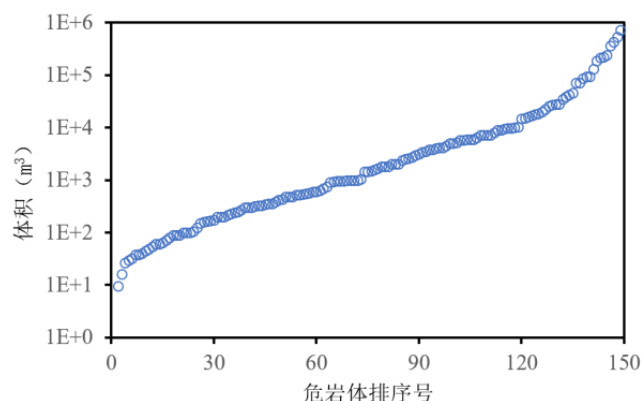


图9 危岩体体积分布情况

Fig. 9 Volume distribution of dangerous rock masses

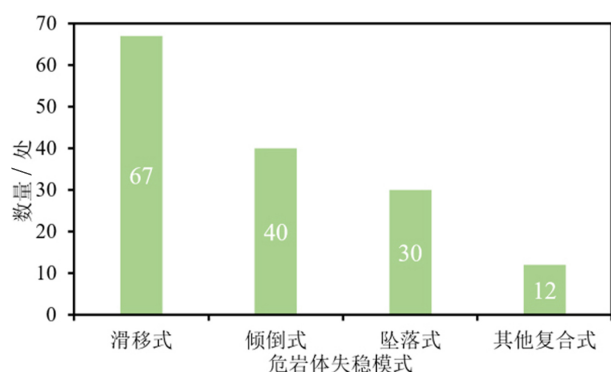


图 10 危岩体失稳模式统计图

Fig. 10 Statistics of failure modes of dangerous rock mass

征来看,三峡库区岩溶岸坡滑坡隐患点和危岩体的变形破坏模式包括倾倒、倾倒—滑移、滑移、滑移—弯曲—溃曲和坠落等。图 11 为主要的变形破坏模式

示意图。例如,板壁岩危岩体属于滑移破坏,神女峰至剪刀峰顺向岸坡区属于顺层滑移模式,龚家坊至独龙逆向岸坡属于倾倒模式。

2 岩溶岸坡岩体稳定影响因素

由于碳酸盐岩岩体中孔隙—溶隙和其他不连续面发育,完整岩石、不连续面或二者的组合岩体都可能发生破坏而导致岩体缺失。根据莫尔—库仑准则,完整岩石、宽大裂隙带充填物、窄裂隙带填充物、多裂隙等工况下的岩体破坏可采用不同的破坏包络线表征分析^[13]。但是,上述工况并不适合本文情况。在岩溶岸坡稳定性分析中,应更多地考虑诱发因素或环境工况,本文库岸需要考虑的工况包括周期性水位波动、降雨、温差和岩体劣化等因素。

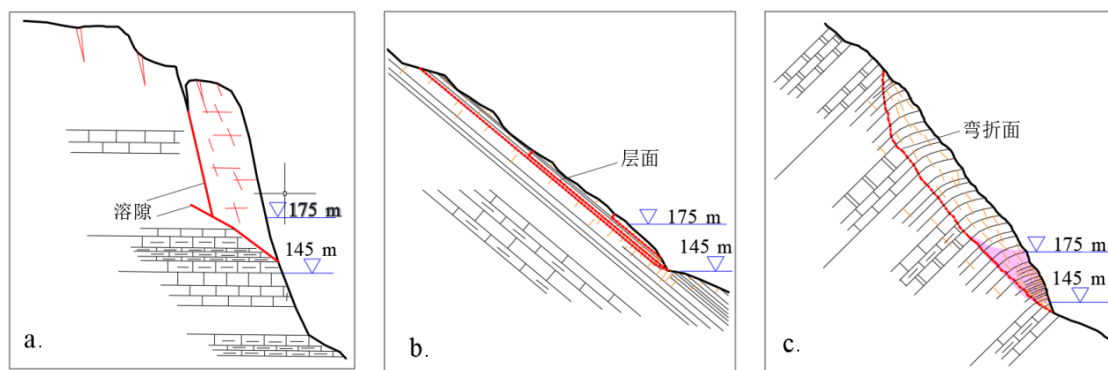


图 11 岩溶岸坡主要变形破坏模式示意图

Fig. 11 Main deformation and failure modes of karst bank slope

2.1 水位变化

三峡库区地形多变,降水时空也是多变的。以巫峡为例,日最大降雨量发生在 2016 年 6 月 24 日,达到了 155.2 mm。年最大降雨量为 2017 年,达 1 553.2 mm,一年中降雨分布不均,降雨主要集中在 5—9 月。从 2008 年以来,库区水位一直在 145~175 m 之间波动,夏季为低水位,冬季为高水位。

在强降雨期间和蓄水之后,水可能会填满裂隙和岩溶管道,从而抬高岩溶岸坡的地下水位。例如,在塞蒂纳河谷岩溶石灰岩上修建的 Peruca 水坝(克罗地亚)地区,强降雨后地下水位以高于 $3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度上升^[14]。更有甚者,在 Dubrovnik 地区(克罗地亚)的 Ombla 河喀斯特泉水周围的压力计记录到强降雨后水位上升超过 $29.2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[15]。伴随地下水位上升,水压持续增加,有利于不连续面的内部充水及侵蚀过程发育,导致裂隙填充物被冲刷,也会导致效应力发

生变化。裂缝孔隙介质的有效应力为裂隙表面的有效应力,它可由公式(1)表示:

$$\sigma' = \sigma_0 - p \quad (1)$$

式中: σ' 为有效应力; σ_0 为总应力; p 为裂隙水压力。

当处于高地下水位期间, p 值增加,则会导致 σ' 下降。图 12 说明了高水位条件下水压变化引起的裂缝有效应力变化,这一变化会导致裂隙更易扩展。

这种地下水位过程的重复会逐渐降低岩质斜坡的稳定性。很明显,不连续面抗剪强度的降低和渗透力的增加以及不连续面内的地下水溶解石灰岩,这些都会导致破裂的节理/裂隙逐渐扩大^[16],最终发生崩塌和滑坡。当水位下降时,超孔隙水压力也可能对表层岩溶区不稳定斜坡产生影响。

2.2 水位变动带岩体劣化

由于溶蚀岩体坡体内孔隙、裂隙与岩溶管道发育、水位变动带溶蚀岩体遭受的应力和环境条件周

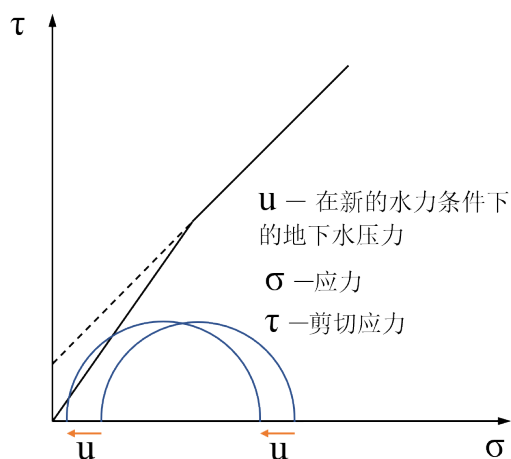


图 12 高地下水位期间裂隙压力变化引起的有效应力变化

Fig. 12 Variations of effective stress associated to changes in pore pressure during period with high groundwater level

期性变化、库水/地下水与溶蚀岩体岸坡的相互作用活跃^[7],造成溶蚀岩体损伤强烈。如果不采取有效的保护措施,这一劣化过程将危及斜坡安全。岩体劣化现象包括溶蚀/溶解、裂缝显化与扩展、机械淘蚀等,这些现象都会导致沿不连续面的岩桥长度减少,以及扩大现有节理,最终导致溶蚀岩体强度降低。这一过程在斜坡的表层最为明显。

大多数岩溶不稳定斜坡的岩体具有大量的非连续面。同时,发生岸坡岩体破坏时大多数都有岩桥或完整岩石被破坏,它们是岸坡被破坏前的主要抗力来源。因此,在大多数情况下,只有连续+不连续破坏准则才适用于岩质边坡的稳定性分析。

这个组合作用力可以用以下方式描述:溶蚀岩体包括完整岩石和不连续结构面,潜在破裂面的总抗剪强度(T)由两个部分组成:岩桥中的抗剪强度(等同完整岩石的抗剪强度) T_{bridge} 和节理的抗剪强度 T_{joint} (图 13)。

$$T = T_{bridge} + T_{joint} \quad (1)$$

$$T_{bridge} = \tau_b \Sigma \Delta B \quad (2)$$

$$T_{joint} = \tau_{joint} \Sigma \Delta A \quad (3)$$

式中: τ_b 为完整岩石的抗剪强度; $\Sigma \Delta B$ 为潜在破裂面上岩桥的面积比; τ_{joint} 为节理的抗剪强度; $\Sigma \Delta A$ 为潜在破裂面上节理的面积比。

当潜在破裂面中没有岩桥时,总抗剪强度由节理强度控制。含填充物的节理有一定的粘聚力,不含填充物的节理则仅有摩擦力。显然,在高塑性黏土充填的节理中,其抗剪强度远低于完整岩石的抗剪强度,完整岩石的抗剪强度远高于含不连续面的岩体。

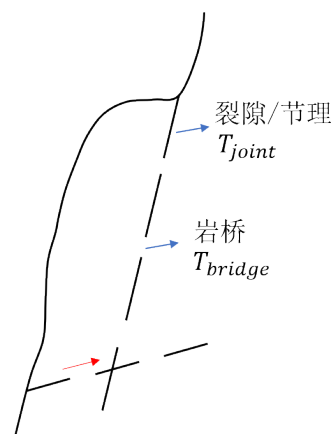


图 13 破裂面抗剪强度组成示意图

Fig. 13 Sketch of shear strength composition of potential failure surface

岩体劣化导致水位变动带裂缝扩展和溶蚀/溶解,增加了节理的百分比,减少了岩桥的百分比,意味着节理的总抗剪强度和抗拉强度的降低。根据节理裂隙定义,节理是没有抗拉性的裂隙构造。如果潜在不稳定块体由两个或多个岩桥系统联系着,岩桥的抗拉强度就是块体稳定力的一部分。在节理岸坡稳定系统中,岩桥的抗拉强度可以与抗剪强度相结合,形成一个整体的抗力应力。当岩桥范围减小时,其抗拉强度也降低,会导致块体稳定下降。因此,岩体劣化的后果就是潜在破裂面的整体强度下降,导致岸坡稳定性系数下降。

3 岩溶库岸演化讨论

许多岩溶地质灾害隐患点已经存在了很长时间,如果没有特殊外力(如强震等)影响,它们将继续稳定很长时间。假设库岸演化为变形体或真正成为地质灾害体的时间是长时间尺度(100 年以上的时间),那么这一库岸当前存在的问题可能并不值得十分关注。因此,确定岩溶库岸演化的时间尺度变得至关重要。

张倬元等^[17]从河谷发育的动力学过程出发,提出了自然河谷斜坡发育的三阶段,即表生改造、时效变形和失稳破坏。目前讨论岩溶库岸演化的时间尺度,就是讨论岩溶岸坡从表生改造转向时效变形的演化时间。对库区岩溶库岸,这一演化显然与岩溶速率和岩体劣化速率等有关。

景才瑞和刘昌茂^[2]提出宜昌长江南岸碳酸岩的溶蚀率可达 $84.99 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。卢耀如^[1]提出三峡地区碳酸岩的平均溶蚀率约为 $60 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。房金福等^[18]

计算的红河流域(云贵桂区域)碳酸岩的溶蚀率约为 $30\sim 80\text{ mm}\cdot\text{ka}^{-1}$ 。由此可见,仅仅依靠自然岩溶溶解来减少岩桥长度,增加节理长度,需要非常长的时间。三峡库区水位变动带岩体劣化导致裂隙扩展。黄波林等^[19]对比了2012年和2017年陡倾顺层表面岩体裂隙长度,年最大延伸率约为 $0.15\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,年平均延伸率约为 $0.08\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这一速率比三峡的平均溶蚀率要高约1300倍。如果按岩体劣化的裂缝延展率来计算减少岩桥长度,那么岸坡演化劣变会急剧加速。

并不是所有水位变动带都会发生岩体劣化。根据岩体劣化发生的地质条件,裂隙扩展仅发生在应力较大且应力集中区;譬如拉张应力集中的剪刀峰区域和压应力集中的箭穿洞基座等。这是因为周期性的水—化学—应力耦合作用,促使了岩体强度的下降,导致断裂更易发生^[20-22]。而水—化学—应力耦合发生断裂的条件是应力要超过一定限值(P_0)。冯夏庭等^[23]分析了弱酸碱溶液下有裂隙的灰岩、白云岩的裂缝扩展过程,发现弱酸碱溶液单轴抗压强度下降约20%~30%;裂缝扩展速率随时间呈上升趋势。这意味着 P_0 应该是峰值强度 $P_{\max}$ 的70%~80%。根据应力—应变曲线,70%~80%的峰值强度已经进入了屈服强度附近,岩体处于微破裂持续发展阶段。

由此,岩体劣化多发生在水位变动带岩体已经进入屈服状态的岸坡。这种岸坡此时已经有变形破坏迹象或应力集中现象,岩体劣化会极大地加快演化过程。而水位变动带岩体没有进入屈服状态的岸坡,可能不会发生水—化学—应力耦合导致的裂缝快速扩展。岩石劣化变形演化可能也是发生在中长时间尺度内的。

综上所述,当前值得关注的岩溶库岸应该是岩体劣化强烈的库岸和已经进入了时效变形的库岸。巫峡段的186处岩溶地质灾害隐患点,尤其是大中型地质灾害,需要进行甄别和判断是否处于时效变形阶段。

4 结论与建议

三峡库区碳酸盐岩库岸发育许多溶洞、溶隙、溶蚀带、溶槽、溶沟等表层岩溶地貌;溶蚀作用是岸坡节理扩展、空隙增加和粘结强度降低的最基本原因,是不利于岸坡稳定的作用力。

三峡库区岩溶岸坡区域地质灾害较为发育。以巫峡为例,区内库岸共发育岩溶地质灾害及隐患点

186处,其中滑坡隐患点37处,危岩体(群)隐患点149处;隐患体体积从不到万方到近百万方都有分布。

在强降雨期间和蓄水之后,伴随地下水位上升,水压增加,有利于沿不连续面的内部侵蚀过程和不连续面抗剪强度的降低,导致破裂的节理/裂隙逐渐扩大。水位变动带岩体劣化导致岩桥减少、节理增加,随之带来了溶蚀岩体的强度下降,导致岸坡稳定性的下降。

三峡地区碳酸盐岩自然岩溶作用缓慢,岩体劣化的裂缝扩展速率比三峡岸坡不稳定演化的平均溶蚀率高约1300倍,岩体劣化多发生在水位变动带中岩体已经进入屈服状态的岸坡,岩体劣化极大地加快了不稳定岸坡的演化进程。三峡库区岩溶地质灾害隐患点,特别是岩体劣化强烈的库岸,值得进一步研究和关注。

参考文献

- [1] 卢耀如. 中国喀斯特地貌的演化[J]. 地理研究, 1986, 5(4): 25-35.
- [2] 景才瑞, 刘昌茂. 论长江三峡岩溶(喀斯特)地貌特征[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 1985(3):88-95.
- [3] 张加桂. 泥灰质岩石区几种岩溶地貌形态及成因探讨:以三峡地区为例[J]. 地质科学, 2002, 37(3):288-294.
- [4] 夏凯生, 袁道先, 谢世友, 等. 乌江下游岩溶地貌形态特征初探:以重庆武隆及其邻近地区为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2):196-204.
- [5] 陈如冰, 罗明明, 罗朝晖, 等. 三峡地区碳酸盐岩化学组分与溶蚀速率的响应关系[J]. 中国岩溶, 2019, 38(2):258-264.
- [6] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪, 等. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2000(3):265-271.
- [7] 邓珊珊, 陈洪凯, 游来凤. 喀斯特山区危岩崩塌形成机制研究:以三峡库区巫溪海螺湾危岩为例[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2012(6):2,41-44.
- [8] 黄波林, 陈小婷, 刘广宁, 等. 巫山县望霞乡桐心村危岩体变形破坏机制分析[J]. 工程地质学报, 2008(4):459-464.
- [9] 张加桂, 殷跃平, 蔡秀华, 等. 三峡库区巫山县翠屏小区岩溶引起的地质灾害危险性研究[J]. 地球学报, 2008(4):495-501.
- [10] 卢耀如. 长江三峡及其上游岩溶地区地质:生态环境与工程效应研究[C]//喀斯特与环境地质——卢耀如院士80华诞祝寿, 2011.
- [11] 陈祖煜, 殷跃平. 国务院三峡枢纽工程质量检查小组报告地质灾害专题报告[R]. 北京:中国工程院, 2019.
- [12] 王健, 黄波林, 赵永波, 等. 三峡库区黄南背西危岩体变形机理研究及失稳模式预测[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(4):65-72.

- [13] Wittke W. Rock Mechanics—Theory and Applications with Case Histories[M]. Springer, Berlin, 1990.
- [14] Bonacci O. Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of river Zrmanja[J]. Hydrology Science of Journal, 1999, 44(3):373-386.
- [15] Bonacci O. Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia) [J]. Jouranl Hydrology, 1995, 165: 113-134.
- [16] Liu Z, Yuan D, Dreybrodt W. Comparative study of dissolution rate-determining mechanisms of limestone and dolomite [J]. Environment Geology, 2005, 49(2): 274-279.
- [17] 张倬元, 王兰生, 王士天, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [18] 房金福, 林钧枢, 李钜章, 等. 喀斯特区现代溶蚀强度与环境的研究[J]. 地理学报, 1993, 48(2): 122-131.
- [19] 黄波林, 殷跃平, 张枝华, 等. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1786-1796.
- [20] Gu Dongming, Huang Da, Zhang Wen Gang, Gao Xuecheng, Yang Chao. A 2D Dem-based approach for modeling water-induced degradation of carbonate rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020(126): 104188.
- [21] Li H, Zhong Z, Liu X, Sheng Y, Yang D. Micro-damage evolution and macro-mechanical property degradation of limestone due to chemical effects [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2018, 110:257-265.
- [22] Ciantia MO, Castellanza R, Di Prisco C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites[J]. Rock Mech Rock Eng, 2015, 48(2):441-461.
- [23] 冯夏庭, 丁梧秀, 姚华彦, 等. 岩石破裂过程的化学—应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

Karstification and slope failure in carbonate areas of Three Gorges Reservoir

CHEN Xiaoting¹, HUANG Bolin¹, LI Bin², ZHANG Peng¹, QIN Zhen¹

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China)

Abstract A large number of karst unstable banks in the gorge area of the Three Gorges Reservoir stand on both sides of the main stream of the Yangtze River, endangering the safety of the golden waterway. Based on field survey, exploration and mechanical analysis, this work analyzes the relationship between karstification and slope failure in the carbonate areas of the Three Gorges Reservoir. The field survey shows that there are many unstable slope phenomena related to karst caves, dissolution fissures, dissolution zones, dissolution troughs, dissolution ditches and other surface karstification on the carbonate bank slope. There are 186 karst potential geo-hazards in Wu Gorge, including 37 potential landslides and 6 large-scale dangerous rock masses. The mechanical analysis of rock mass indicates that the joints / cracks will gradually expand due to the decrease of effective stress and strength under heavy rainfall, impounding and rock mass degradation. At the same time, the crack growth rate of rock mass deterioration in the water level fluctuation zone is about 1,300 times higher than the average dissolution rate in the Three Gorges, which greatly accelerates the evolution process of unstable rock mass which has entered the yield state. Dissolution is the most basic action of karst bank slopes, and the long-term fluctuation of reservoir water accelerates the evolution of karst bank slopes. This study provides technical support for the identification and disaster prevention and mitigation of unstable banks in the gorge section of the Three Gorges Reservoir area.

Key words Three Gorges Reservoir, karst bank slope, karstification, rock mass degradation

(编辑 张玲)