

三峡库区土质岸坡塌岸发育分布 特征与易发性评价

王力 刘婷 王世梅 陈琦珊 李玉¹

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

【摘要】: 土质岸坡塌岸是目前三峡库区最为普遍和日益严重的地质灾害, 确定塌岸特征和发育分布规律是库区地质灾害防治的关键工作之一。在三峡水库低水位运行期开展了库首秭归-重庆涪陵区段的全面塌岸调查, 确定了库区典型的土质岸坡塌岸段, 总结了土质岸坡塌岸的主要影响因素, 并以巫山库岸段为例进行了土质岸坡塌岸易发性评价。结果表明: 塌岸多发库岸的物质组成以粘性土夹碎块石为主, 巴东、巫山、奉节等库岸段的土质岸坡塌岸最为发育; 土质岸坡塌岸的内因为地质构造、地层岩性、岸坡及岸线形态, 外因为水作用因素, 库水位变动和波浪作用是导致土质岸坡坍塌和渐进式侵蚀的最主要原因; 调查确定的塌岸影响因素与塌岸情况有显著的相关性, 塌岸易发性预测结果与现场调查吻合度较好, 研究将为三峡库区地质灾害防治提供必要基础资料和技术支撑。

【关键词】: 三峡库区 地质灾害 塌岸 易发性评价

【中图分类号】: P694 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)08-1853-13

三峡工程建成后, 库水位在 145~175m 间周期性波动, 变幅高达 30m。长期的库水位变动不仅改变了库岸岩土体的动力作用系统, 而且使岸坡岩土体物理力学性质发生了显著变化, 产生了大量的滑坡变形失稳和岸坡塌岸等地质灾害现象^[1]。随着滑坡复活机理及预测评价等重大问题研究的深入^[2,3], 以及大量滑坡灾害专业监测的开展和滑坡治理工程的实施^[4], 重大滑坡灾害已经得到了有效预防和控制, 从而使得岸坡塌岸成为当今乃至今后三峡库区最为普遍和日益严重的地质灾害问题。滑坡的前缘塌岸, 不仅导致水土流失和生态环境恶化, 还会不断加剧岸坡破坏特别是复活型滑坡的复活进程, 甚至引发严重的灾难性后果。通过开展三峡库区的塌岸调查, 从而确定土质岸坡塌岸的发育特征和规律, 是库区塌岸防治工作的首要任务, 也是库区防灾减灾和环境保护国家战略的重大需求。

在三峡水库蓄水之初, 早已有学者注意到三峡水库的塌岸问题^[5], 目前的关注重点是特定岸坡的塌岸预测和塌岸预测方法的改进^[6,7]。也有学者对水库岸坡塌岸机理开展研究^[8,9,10,11,12,13]。这些方法多是对单体岸坡的相关研究, 对于库区干流、支流长总长约 2500km 的库岸来说, 确定塌岸易发的区段从而针对性的开展治理是目前的首要工作。相关部门组织分别于 2008 和 2012 年在库区 175m 高水位时开展了塌岸调查和评估, 初步确定了土质岸坡塌岸的分布特征^[14]。然而, 高水位状态时难以确定 30m 范围内消落带塌岸的真实情况, 而且, 库岸再造是一个具有时间效应的渐进式过程^[10], 在经历十多年的库水位运行期后, 三峡库区的塌

¹作者简介: 王力(1988~), 男, 讲师, 主要研究方向为地质灾害机理、预防与评价。E-mail:wangli_ctgu@126.com;王世梅, E-mail:284480957@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A2031);中国博士后科学基金项目(2021M701969);宜昌市大学科学研究与应用项目(A20-3-11)

岸问题也愈发严重。通常认为在山区河道型水库影响极小的风浪作用对岸坡的侵蚀也越来越显著^[15,16],因此,很有必要对低水位状态时库区消落带进行全方位的调查。

鉴于上述,本项研究在2020年7~8月三峡库区低水位运行期开展了库首秭归-重庆涪陵区段的全面塌岸调查,确定库区典型的土质岸坡塌岸段,总结土质岸坡塌岸的主要影响因素,选取地形地貌、地质构造、地层岩性、岸坡及岸线形态及水作用等6个影响因子,以库区塌岸最为发育的巫山岸坡段为对象,利用ANN模型进行信息量计算,基于ArcGIS软件的空间分析功能,计算塌岸灾害的易发性。本项研究结果将为三峡库区地质灾害防治工作提供基础资料,为三峡库区长江大保护的实施提供治理依据。

1 研究区概况

长江三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北临大巴山、南依川鄂高原。位于长江上游的宜昌市三斗坪至重庆江津区之间,涉及湖北省及重庆市26个行政区县,干流回水总长662.9km。

三峡库区出露地层较齐全,除缺失泥盆系下统、石炭系上统、白垩系的一部分和第三系外,自前震旦系至第四系均有出露,其地层分布示意如图1所示。按组成岸坡区内地层建造类型,将岸坡划分为松散软土岸坡、红层岸坡、层状碳酸盐岩岸坡和块状结晶岩岸坡等四大类型。其中,红层岸坡(砂岩、泥岩及砂岩与泥岩互层)约占三峡库区总长的72%。据不完全统计,三峡库区的滑坡崩塌等地质灾害多达4256处^[1],绝大部分分布于红层岸坡中,因此,本文的塌岸调查也主要集中在红层岸坡中。

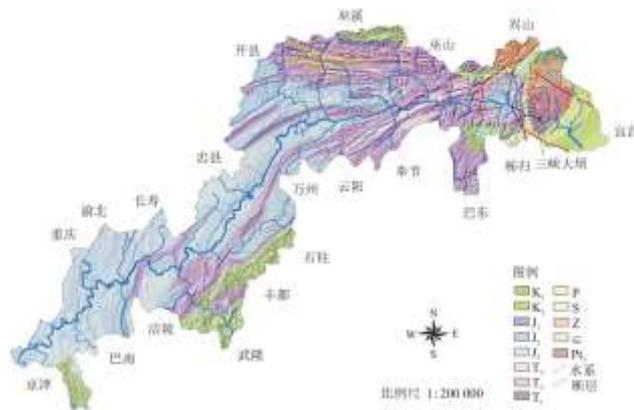


图1 三峡库区地层分布示意图

2 三峡库区土质岸坡塌岸调查

三峡库区土质岸坡塌岸除库首秭归段分布少量花岗岩风化砂土边坡(图2,已于2020年治理完成),其它区域塌岸主要以松散软土岸坡塌岸为主。本次对三峡库区秭归-重庆涪陵区段的土质岸坡进行了全面的调查与分析,查明库区主要分布有4段典型土质岸坡塌岸段,各塌岸段的概况与特征分述如下。

2.1 秭归县郭家坝镇东门口塌岸段

(1) 塌岸区概况

东门口塌岸段为典型均质粉质粘土岸坡,该塌岸段位于秭归县郭家坝镇长江干流右岸,塌岸段长度约1.2km,行政区划位于

楚王井村、擂鼓台村和邓家坡村。区内基岩地层岩性有侏罗纪中统沙溪庙组(J_{2s})紫红色泥岩与黄褐色石英砂岩、粉砂岩,不等厚互层状构造,力学强度较低,岸坡近断层,节理裂隙发育,岩体破碎,表层强风化。调查区地形相对平缓的斜坡表部为第四系湖积物(Q₂₁)覆盖,预估厚度3.0~30.0m不等,岩性主要为粉土,土石比9:1~8:2,结构稍密-中密,浅黄色,碎石块成份主要为砂岩和粉砂岩,直径1~4cm不等,亚圆状为主。



图2 凤凰山库岸段典型塌岸特征

注: a. 139m 蓄水时形成的冲刷浪坎; b. 波浪冲蚀使全风化花岗岩裂隙扩大产生坍塌。

(2) 塌岸进程

从2006年的航片可发现135m蓄水间发生3处塌岸,其中2#、3#塌岸从2003年6月出现剧烈塌岸,长度达200余米,塌岸壁高达25m,如图3a黄线处所示,显然东门头库岸对三峡水库蓄水响应明显。2008年三峡库区干流塌岸调查发现,该段新增塌岸4处,如图3a中红线所示,由于蓄水位的提升至172m,原有2#、3#塌岸向两侧及深部方向扩大规模。图3b为2008年调查发现新增塌岸规模最大的4#塌岸,塌岸呈陡立状坍塌。2012年12月完成了第二次三峡库区干流塌岸调查,发现东门头库岸段的塌岸规模进一步扩大,其中1#、3#塌岸因两侧扩张形成一个整体,2#塌岸相对稳定,如图3c所示。2014年8月,笔者参与的塌岸调查发现,4#塌岸进一步向深部扩张,岸坡变形主要发生在蓄水阶段,如图3d所示。笔者于2020年8月参与完成了三峡库区的第三次塌岸调查,东门头库岸段整体处于基本稳定状态,发现一处2014年后新增的8#塌岸,具体位置见图3a,目前处于稳定状态,照片如图3e所示。最早于2006年开始坍塌的1-3#塌岸目前已整体稳定,如图3f所示。东门头塌岸段主要受库水高水位时浸泡软化作用影响,波浪侵蚀加剧该库岸段的变形发生,塌岸模式为典型的坍塌型,经三峡水库进入正常蓄水期数年周期性蓄水作用后,目前该岸段变形已趋于稳定,局部变形主要受坡体自重和降雨作用影响。

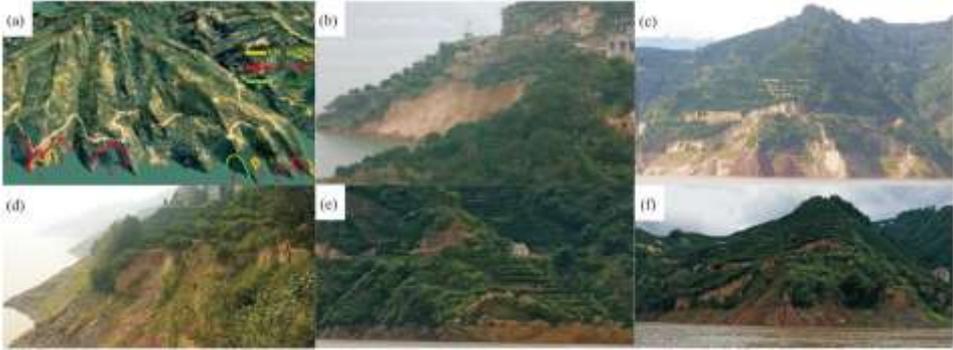


图3a. 东门头塌岸段示意图, 2006年航片; b. 4#塌岸照片, 2008年; c. 1-3#塌岸照片, 2012年; d. 4#塌岸照片, 2014年; e. 东门头库岸段新增8#塌岸, 2020年; f. 1-3#塌岸照片, 2020年

2.2 巴东县东壤口镇-大坪库岸段

(1) 塌岸区概况

巴东县东壤口镇-大坪库岸段为典型粉质粘土夹块石岸坡。行政区划位于巴东县东壤口镇，库岸线长约 4km，大规模塌岸主要集中于长江左岸。岸坡段内基岩主要为三叠系中统巴东组碎屑岩，第二段到第四段($T_2b^2 \sim T_2b^4$)均有分布，出露岩层主要为紫红色泥岩，灰黄色、灰绿色泥灰岩。一实测性质不明断层横穿该库岸段，岸坡岩体较破碎，力学强度低，易风化，表层分布为第四系滑坡堆积物，主要由粉质粘土夹块石组成，中上部土体呈紫红色，下部呈灰黄色、黄色，粘性土呈硬塑~坚硬状，块石含量占 20%~70%不等。

(2) 塌岸进程

2020 年 8 月对巴东县库岸段的岸坡地质灾害进行了调查，其中最典型塌岸段为东壤口镇-大坪库岸段，共发育大规模典型塌岸段 13 处，集中于长江左岸，其分布点见图 4。该库岸段坡度整体较陡，坡度分布在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 间。

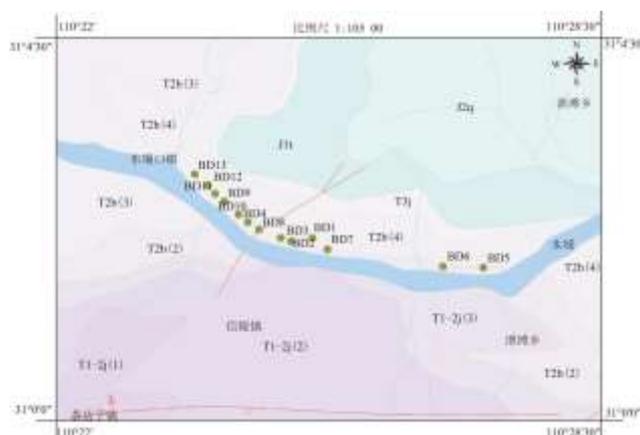


图 4 巴东东壤口镇-大坪库岸段塌岸位置图

库岸段较陡处主要发生坍塌型塌岸，如图 5a 为巴东大坪滑坡西侧前缘的坍塌型塌岸，库水浸泡和波浪侵蚀联合作用下岸坡与水面相交处细颗粒流失，碎块石脱离岸坡形成浪蚀龛，陡坡沿浪蚀龛滑移或坍塌。岸坡坡度较缓处以波浪掏蚀作用为主，形成浪蚀龛和冲刷浪坎，如图 5b 为区段中典型的浪蚀龛型塌岸，波浪掏蚀形成多个浪蚀龛，浪蚀龛进一步扩展连通，岸坡表层成片剥落。



图 5 巴东库段典型塌岸

注：a. 坍塌滑移塌岸；b. 浪蚀龛型塌岸。

2.3 巫山县县城-大溪镇塌岸段

(1) 塌岸区概况

巫山县县城-大溪镇塌岸段为典型碎石土岸坡。县城~大溪镇岸坡长约 25.32km, 塌岸广泛分布于长江两岸。岸坡段内基岩主要为三叠系中统巴东组碎屑岩, 第一段到第四段($T_2b^1 \sim T_2b^4$)均有分布, 出露岩层主要为紫红色、浅灰色中厚层粉砂岩、粉砂质泥岩夹泥灰岩, 浅灰、灰黄色中厚层状泥灰岩。岸坡位于巫山向斜核部, 岩体较破碎, 力学强度低, 易风化, 表层分布为第四系崩坡积松散土体, 形成土质岸坡, 易发生滑坡、塌岸等灾害。

(2) 塌岸现状

2020 年 8 月对巫山段的岸坡地质灾害进行了调查, 巫山县县城-大溪镇库岸共发育典型塌岸段 25 处, 其中长江左岸 15 处, 右岸 10 处, 其分布点见图 6。该库岸段的塌岸模式为主要有坍塌型、冲刷浪坎型以及分散的浪蚀龛型。

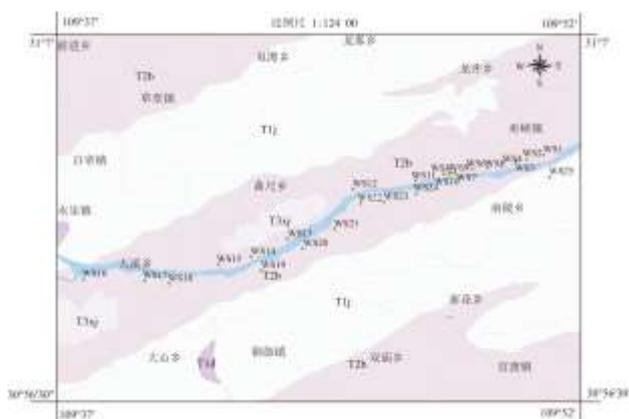


图 6 巫山县县城-大溪段塌岸位置



图 7 巫山县县城-大溪镇库岸典型塌岸

注：a. 坍塌型塌岸；b. 浪蚀龛型塌岸；c. 冲刷浪坎型塌岸。

该库岸段发育的坍塌型塌岸如图 7a 所示, 地理位置位于巫山县曲尺乡下马滩, 长江干流左岸。库水浸泡作用下, 岸坡与水

相交处土体软化，在波浪作用下形成浪蚀龛，由于重力作用以及降雨等诱发条件下，岸坡发生坍塌或坍滑，随库水和波浪的联合作用，塌岸区可进一步向深部扩展。该库岸段发育的浪蚀龛型塌岸如图 7b 所示，地理位置位于巫山县巫峡镇小下马，长江干流左岸。该塌岸段约 300m 长，物质组成主要为粉质粘土夹碎块石，在波浪作用下细颗粒被掏蚀，粗颗粒流失，碎石或块石滚落，分散发育有大量浪蚀龛。在库水位浸泡和波浪作用下，浪蚀龛可进一步扩展连通，大范围剥落。该库岸段发育的冲刷浪坎型塌岸如图 7c 所示，地理位置位于巫山县曲尺乡上关，长江干流左岸。该塌岸段约 150m 长，土层主要为碎石土和块石土，在库水浸泡和波浪冲刷作用下，岸坡不断被侵蚀，侵蚀位置随库水位调度变动，形成多级坎状塌岸。

2.4 奉节-云阳塌岸段

(1) 塌岸区概况

奉节县城-云阳县城库岸段塌岸较为发育，其中塌岸最为频繁的是沿云阳故陵镇王爷庙开始上游约 8km 的碎石土岸坡，塌岸广泛分布于长江两岸。区内基岩主要为侏罗系蓬莱镇组(J_p)紫红色泥岩、泥岩夹块状细-中粒长石石英砂岩；侏罗系遂宁组(J_s)紫红色、砖红色泥岩，薄层粉砂岩，粉砂质泥岩，库岸段位于故陵向斜核部，岩体较破碎，力学强度低，易风化，表层分布为第四系崩坡积松散土体，主要为棕红色粉质粘土，砂、泥岩块体夹粘土，形成土质岸坡，易发生滑坡、塌岸等灾害。

(2) 塌岸现状

2020 年 8 月对奉节-云阳段的岸坡地质灾害进行了调查，其中较为典型的一段为安坪-新津库岸段，共发育典型塌岸段 25 处，其中长江左岸 12 处，右岸 13 处，尤其以故陵镇上下游高度发育，其分布点见图 8。该库岸段位于故陵向斜核部，斜坡整体坡度较缓，发育的塌岸模式为主要为冲刷浪坎型以及分散的浪蚀龛型。

该库岸段发育的典型冲刷浪坎型塌岸如图 9a 所示，地理位置位于云阳县故陵镇蚂蝗溪，长江干流左岸，塌岸长度约 300m，塌岸物质为粉质粘土。在库水浸泡和波浪冲刷作用下，岸坡不断被侵蚀，侵蚀位置随库水位调度变动，形成多级坎状塌岸，波浪进一步掏蚀作用下，多级坎状贯通坍塌。该库岸段发育的浪蚀龛型塌岸如图 9b 所示，地理位置位于云阳县故陵镇放牛场，长江干流右岸。该塌岸段约 250m 长，物质组成主要为粉质粘土夹碎块石，在库水浸泡和波浪掏蚀作用下，岸坡细颗粒不断流失，形成多个窝型浪蚀龛，浪蚀龛扩展连通时发生小规模塌岸。

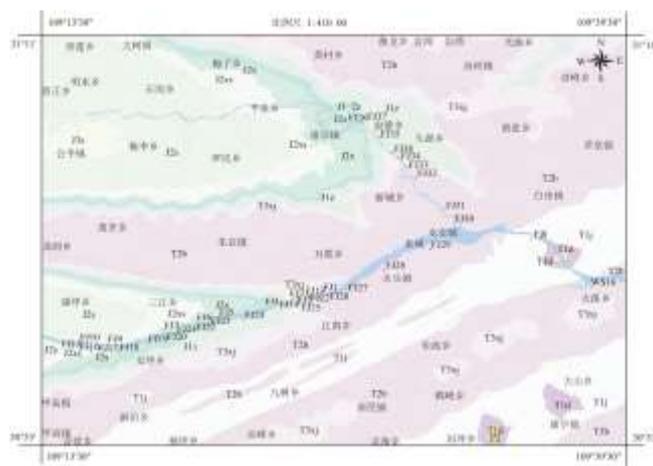


图 8 安坪-新津库岸段塌岸位置图

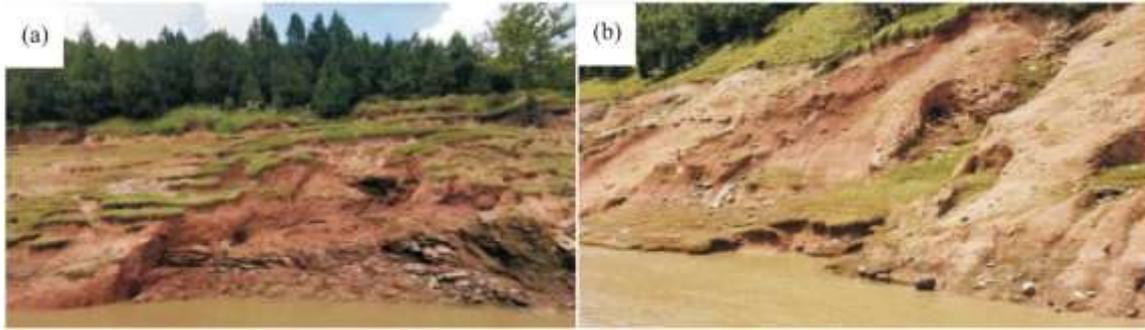


图9 奉节-云阳库岸典型塌岸注

注：a. 冲刷浪坎型塌岸；b. 浪蚀龛型。

3 三峡库区土质岸坡塌岸主要影响因素分析

总结本次塌岸调查的情况和历年来的塌岸调查结果^[14,17],对库区塌岸多发库岸段的发育分布特征进行归纳分析,总结出其塌岸频发的主要影响因素如下:地质构造、地层岩性、岸坡及岸线形态及水作用等,以下将详述各类因素的影响。

3.1 地质构造

三峡库区岸坡塌岸与地质构造的关系密切。总体来看在奉节-万州河谷段、巫山-奉节河谷段,近向斜河谷是塌岸最为频繁的部位,如巫峡库岸段广泛发育的岩质塌岸(图10),主要因为巫峡段沿岸岸坡位处一系列NEE方向平行展布褶皱的核部,岩石破碎,如横石溪背斜、穿箭峡向斜、神女峰背斜、神女溪-官渡口向斜及青石背斜(如图11所示),其中位于老鼠挫断层近处的岸坡塌岸更为发育。



图10 巫峡段岩质塌岸

巫山段的土质岸坡是库区中塌岸最为发育的库岸,其中位于巫山向斜核部(如图11)的曲尺-大溪约13km长的库岸段发育长度数十米到数百米间不等的塌岸多达20余处,且塌岸规模较大。

奉节-云阳库岸段是受波浪侵蚀作用显著的碎石土塌岸,其中位于故陵向斜近核部(如图12)的故陵镇王爷庙以上8km长的库岸段发育有20余处规模较大的冲刷浪坎型塌岸,此库岸段波浪侵蚀岸坡的规模及密度均为库区中的典型。

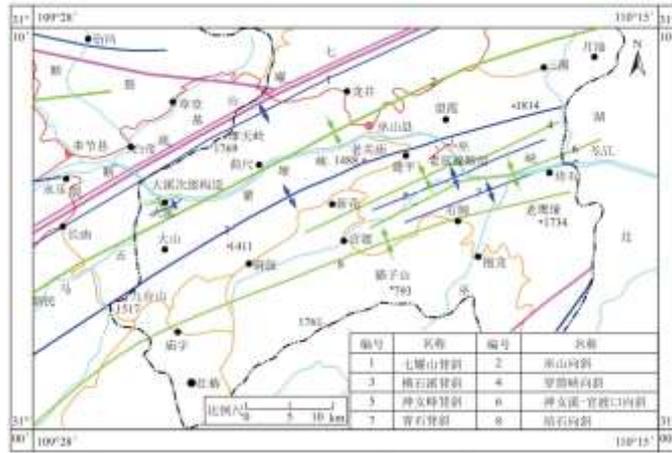


图 11 三峡库区巫山段地质构造图^[18]

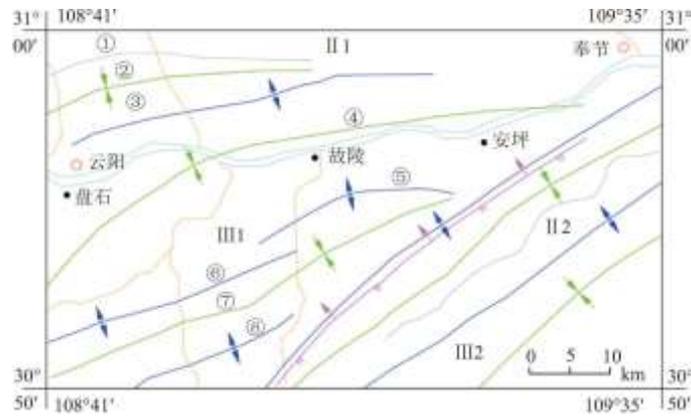


图 12 三峡库区奉节-云阳段地质构造简图

注：大地构造单元：II 1-四川台坳；II 2-上扬子台坪；III 1-川东陷褶皱；III 2-八面山台店褶皱①铁峰山背斜；②杨柳湾向斜；③桐村背斜；④故陵向斜；⑤黄连峡背斜；⑥方斗山背斜；⑦赶场向斜⑧龙驹坎背斜。

3.2 地层岩性

地层岩性是影响塌岸的最主要内因，不同岩性的岸坡具有不同的抗风化能力，以致不同库岸段塌岸发育特征不同。本次库区塌岸调查时发现，不同地层、岩性的土质岸坡塌岸发育密度、规模相差较大，调查总结各土质塌岸高发段的地层岩性、物质组成如下表 1 所示。

从塌岸表层物质组成成分来说，以粉质粘土夹碎块石为主的第四系松散堆积层塌岸最为发育，规模大、密度大。其主要原因除库水的长期软化浸泡及水动力作用外，波浪的冲刷、掏蚀影响非常大，波浪侵蚀致使细颗粒不断流失，粗颗粒包括碎石、块石失去支撑坍塌，岸坡容易形成大小不一的浪蚀龛，进一步产生坍塌或滑移。

从大规模塌岸所处地层来说，统计调查结果表明共有 11 种地层与岸坡塌岸明显相关，均为库区红层地层。其中 T₂b、J₃、J₂3 类地层对塌岸(滑坡)的贡献率高，是库岸塌岸的主要发育地层。统计表明，三叠系中统巴东组(T₂b 粘土岩砂岩互层、泥岩、粉砂岩、泥灰岩)占塌岸总数的 32%，侏罗系上统(J₃s、J₃p, 砂岩泥岩互层含煤线)占塌岸总数的 23%。侏罗系中统沙溪庙组(J₂s、J₂xs,

砂岩泥岩互层)占塌岸总数的18%,其余地层的塌岸数量如图13。

表1 三峡库区典型土质塌岸段地层岩性特征表

库岸	地层时代	地层岩性	物质组成	大规模塌岸数量
秭归西-巴东段	T _{2b} ² 、T _{2b} ³	紫红色、灰绿色中厚层状粉砂岩、泥岩夹灰绿色页岩；灰、浅灰色中厚层状灰岩、泥灰岩夹页岩、泥岩	崩坡积、残坡积、堆积成因的粉质粘土夹碎块石	18
巫山段	T _{2b} ¹ ~T _{2b} ⁴	紫红色、浅灰色中厚层粉砂岩、粉砂质泥岩夹泥灰岩；浅灰、灰黄色中厚层状泥灰岩	崩坡积、残坡积、堆积成因粘土、粉质粘土、碎块石土	25
奉节西-云阳段	J _{2s} 、J _{2xs} 、J _{3p} 、J _{3s}	泥岩、粉砂质泥岩与长石砂岩不等厚互层；紫红色泥岩、泥岩夹块状细-中粒长石石英砂岩；紫红色、砖红色泥岩，薄层粉砂岩，粉砂质泥岩	冲洪积：粘土、砂、卵砾石；残坡积：粘土、碎石质粘土、粘土质碎块石；崩塌堆积、滑坡堆积：碎石、块石土、碎块石等	32

注：本文中大规模塌岸指调查时塌岸长度在50m以上或塌岸规模大于100m³的塌岸段。

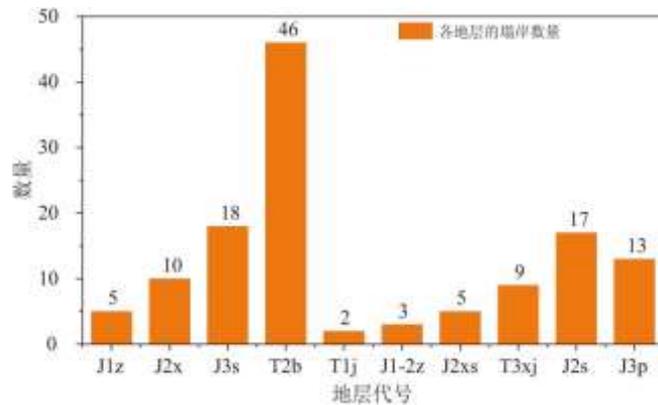


图13 调查典型塌岸所在地层分布

3.3 岸坡及岸线形态

岸坡剖面形态是导致塌岸发生的主要因素，塌岸调查中发现岩性相同的同一区段内，凸型坡塌岸发育频次及规模最为强烈(图14a)，相对于凹型坡下段坡度较缓，通常凸型坡坡度较陡，而波浪侵蚀对陡坡作用明显，主要发生坍塌型塌岸，且坍塌后的上部土体失去支撑易发生进一步的牵引破坏。

岸线形态同样是影响塌岸发生的主要因素，调查时发现岸线形态突变处易发生塌岸，受水流侧向侵蚀作用，图14b的外凸岸线及图14c的凹型岸线(冲沟底部)均较直线岸线塌岸规模更为明显。



图 14 不同岸坡及岸线形态塌岸

注：a. 凸型坡坍塌破坏；b. 岸线外凸处；c. 岸线内凹处。

3.4 水作用因素

由于三峡库区岸坡植被发育良好以及地表冲沟的汇水作用，降雨产生的坡面径流对岸坡的塌岸影响相对较小。库水和波浪侵蚀作用是影响三峡库区岸坡塌岸的最主要外部因素，库水的影响主要分为 3 类：(1) 沿岸线的侧向侵蚀，侧向侵蚀在流速较大的河段较为明显，如瞿塘峡下游的大溪-曲尺河段在同类地层中塌岸规模、频次均较大；(2) 对岸坡土体的浸泡软化作用，库水位浸泡软化作用对消落带岩土体的物理力学性质影响较大，周期性的干湿循环条件下岸坡土体颗粒及粒间胶结物产生润滑或泥化作用，土体抗剪强度参数显著劣化^[19]，从而影响到岸坡土体的稳定性；(3) 库水位升降产生的水动力作用，库水位升降会导致孔隙水压力变化，改变岸坡土体的地下水渗流场，从而导致岸坡稳定性降低。

三峡水库是山区河道型水库，通常认为波浪侵蚀作用不明显，事实上蓄水后水面开阔，库区水面浪高最可达 1m 以上，波浪对库岸的影响已不容忽视。塌岸调查时发现波浪对岸坡的侵蚀效应十分强烈，如巫山段碎石土岸坡受波浪侵蚀作用，广泛发育浪蚀龛和冲刷浪坎；奉节-云阳段泥岩砂岩互层状岸坡常见强风化泥岩被波浪掏蚀，岩层失去支撑塌岸频发(图 15a)。同时，船行波浪对岸坡的侵蚀作用也不容忽视，尤其是近岸航行的中小船只，如图 15b 所示，调查中观测到小型客轮产生的波浪沿岸爬高达到了 1m 以上。

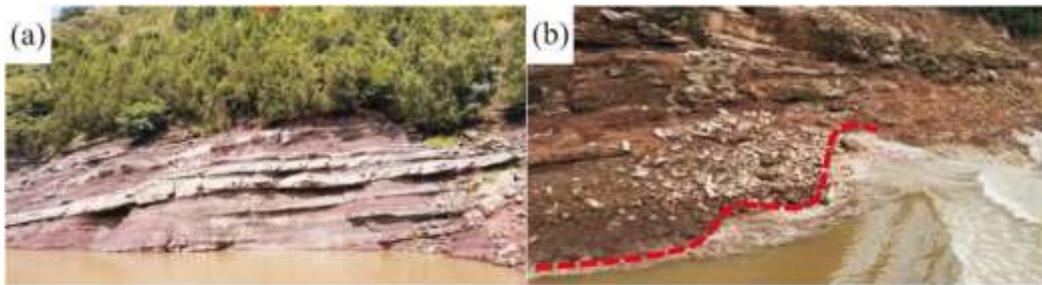


图 15 波浪对塌岸的影响

注：a. 奉节-云阳段岩土混合岸坡塌岸；b. 船行波浪侵蚀岸坡。

上述分别讨论了地质构造、地层岩性、水作用、岸坡及岸线形态等因素对岸坡塌岸的影响，分析总结库区土质岸坡塌岸的成因及发育分布规律如下：褶皱、断层等地质活动与红层软岩构成了岸坡松散堆积层的动力与物质来源，在此条件下，水动力作用直接导致土质岸坡侵蚀与塌岸的发生。因此，库区土质岸坡的分布与发育特征有以下规律，从地质构造来说，褶皱核部、近断层区域是塌岸发育密集处；从地层岩性来说，红层巴东组是塌岸的最易发地层；从岸坡形态来说，凸型坡与岸线形态变化处塌岸更为显著；而调查结果表明，波浪是土质岸坡发育的最主要水动力因素。

4 三峡库区土质塌岸易发性评价

前文总结分析了影响塌岸的主要因素，在此基础上考虑各影响因素与塌岸发育程度的关联，并对研究区进行塌岸易发程度预测也是本项研究的主要目的。前文塌岸的发育分布规律和成因分析已表明岸坡坡度、地层岩性、地质构造、岸线形态和波浪作用等因素是塌岸易发程度显著关联的影响因子，其中波浪作用主要以江面宽度大小及风速大小反映^[20]。将各影响因子进行分级，并将研究区划分为线性单元，利用 ArcGIS 软件的空间分析功能将影响因子与研究区内塌岸发育现状进行空间连接分析，得到研究区塌岸和各指标间的对应联系。采用 BP 模型训练出塌岸和影响因子间的响应关系，并预测得到整个研究区的塌岸发育概率 [0, 1]，采用统计学中的自然间断法以概率大小将预测结果划分为不易发区，低易发区，较高易发区和高易发区。本文将现场调查的 128 个塌岸点作为样本，以其中除巫山塌岸段的 103 个塌岸点作为训练集，以巫山段共 25 个塌岸点作为验证集，按上述方法进行研究区塌岸易发性评价，确定巫山段的塌岸易发性，并用验证其可靠性，最终绘制巫山段塌岸易发程度分布图。

4.1 BP 神经网络预测模型

人工神经网络模型模型 (ANN) 是一种非线性统计模型，通常应用于回归或者分类问题，其中 BP 神经网络最具普遍性与代表性，BP 模型属于监督式学习方法，采用前向式架构，具有很强的非线性映射能力。BP 模型采用梯度下降算法，将误差函数值最小化，其目的是降低输出单元目标输出值与推论输出值之间的差距，全称为基于误差反向传播算法的人工神经网络。BP 神经网络的结构分为 3 层：输入层、隐藏层、输出层 (图 16)。将塌岸影响因子作为网络输入层的变量，按式 (1) 进行训练计算，输出危险程度的具体数值。

$$y_i = f(\sum w_j x_i + b_j) \quad (1)$$

式中： y_i 为输出值； w_{ij} 为神经元权重； x_i 为输入值； b_j 为神经元偏置； f 为神经元激活函数。笔者将采用 BP 神经网络开展研究区塌岸的易发程度预测研究。

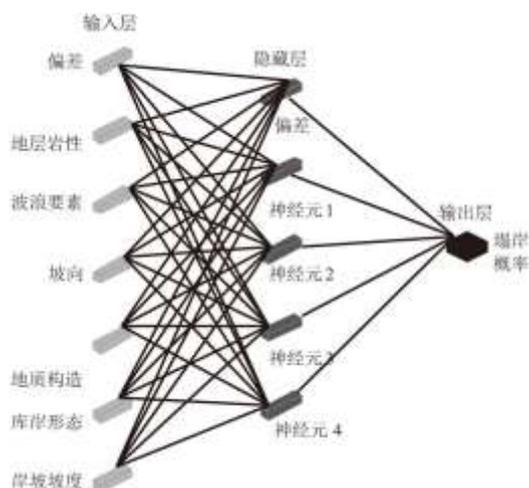


图 16 塌岸预测 BP 神经网络结构示意图

4.2 预测指标分级与显著性

选取的 7 个影响因子中，坡度、江面宽度和风速为连续型数据，其余为离散型数据，其中风速数据来源于中国气象局。对离

散型影响因子采用自然分组进行分级，对连续型影响因子结合分布规律采用自然断点法进行分级，影响因子分级如表 2 所示。通过坡度和坡向两个重点指标反映库区岸坡的地形地貌特征，波浪作用主要考虑风浪，同一区域可简化为江面宽度，利用 BP 神经网络模型可得出各因素的显著性，排序如图 17 所示。

4.3 预测结果

采用线性单元和 BP 模型计算的各影响因子显著性，计算模型的 ROC 曲线如图 18 所示，其中 AUC 值为 0.81，说明了研究区的塌岸易发预测是可靠的。并且以塌岸最为发育的巫山-大溪库岸段为例，利用训练完成的模型进行预测，可得巫山库岸段高易发区(31.1%)、较高易发区(29.6%)、低易发区(19.5%)和不易发区(19.8%)，如图 19 所示。对比图 6 和图 19，巫山-大溪段的 25 个大型塌岸段全部分布在高易发区和较高易发区，预测结果和调查的结果高度一致，再次验证了此塌岸易发性评价方法准确、可靠。

表 2 塌岸影响因子及其分类标准

影响因子	分类数量	分类标准
坡度(°)	5	1:0°~10°;2:10°~20°;3:20°~30°;4:30°~40°;5:>40°
坡向	9	1:平面;2:北;3:东北;4:东;5:东南;6:南;7:西南;8:西;9:西北
地层岩性	5	地层:1:T ₂ b;2:T ₁ ;3:J ₃ ;4:J ₂ ;5:其它。
地质构造	3	1:褶皱核部;2:褶皱翼部;3:断层
岸线形态	3	1:凹形;2:平缓;3:凸形
年平均风速(m/s)	6	1:0.52~0.8;2:0.8~1;3:1~1.15;4:1.15~1.25;5:1.25~1.5;6:1.5~1.89
江面宽度(m)	4	1:1100~1350;2:850~1100;3:600~850;4:350~600

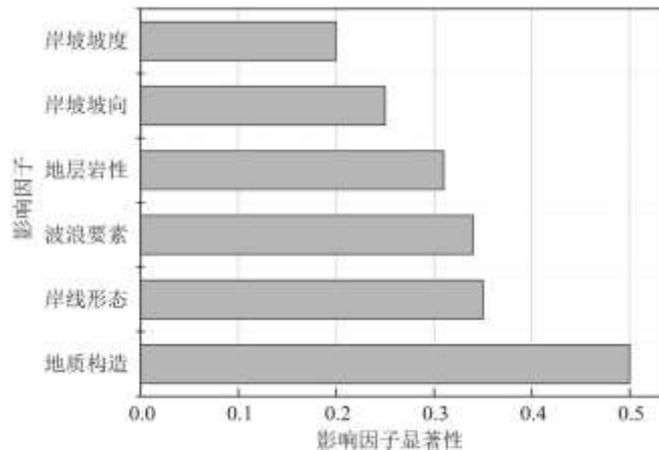


图 17 影响因素显著性排序

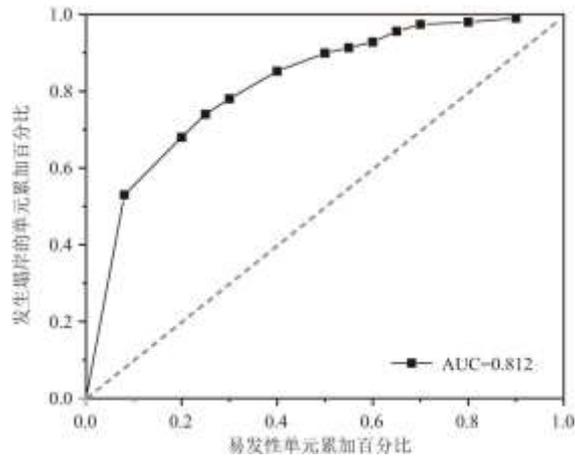


图 18 易发性指数的 ROC 曲线

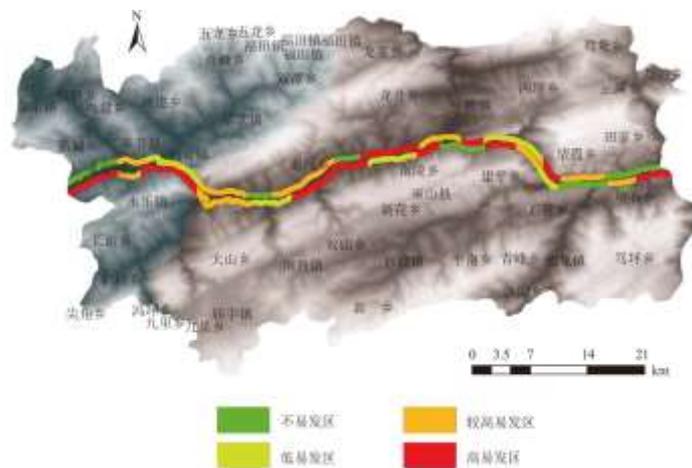


图 19 巫山段塌岸易发程度分区图

5 结论

(1) 通过对已有塌岸调查资料的收集分析与实地塌岸调查，查明了三峡库区典型土质岸坡的工程地质特性与塌岸特征。塌岸多发库岸的物质组成以粘性土夹碎块石为主，巴东、巫山、奉节等库岸段土质岸坡塌岸最为发育。

(2) 通过塌岸现场调查、统计与分析，总结出三峡库区典型土质岸坡塌岸的内因为地质构造、地层岩性、岸坡及岸线形态。向斜核部及近断层处的库岸段为土质塌岸易发段；巴东组地层是库区大规模塌岸的易发地层，塌岸数量约占总数的 32%；受岩土体自重影响，坡度较陡的凸型坡为土质塌岸易发坡型；长江岸线弯曲变化处是受水流横向切割作用明显，同样为塌岸的土质岸坡塌岸的易发地段。三峡库区典型土质岸坡塌岸的外因为水作用因素，库水位变动和波浪作用是导致土质岸坡坍塌和渐进式侵蚀的主要原因。

(3) 考虑影响塌岸的主要因素与塌岸发育程度的关联，以三峡库区巫山库岸段为例，采用 BP 神经网络结合 ArcGIS 软件的空间分析功能得到研究区塌岸和各指标间的对应联系，并对研究区进行了塌岸易发程度预测，塌岸易发性预测结果与现场调查吻合程度较好，本研究的塌岸调查和易发性评价将为三峡库区地质灾害防治提供基础资料和技术支撑。

参考文献:

- [1]TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China Lessons learned from decades of research[J]. *Engineering Geology*, 2019, 261:105267.
- [2]王世梅, 陈勇, 田东方, 等. 三峡库区滑坡复活机理及稳定性评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [3]许强, 黄学斌, 黄润秋. 三峡库区滑坡灾害预警预报手册[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [4]田盼, 霍志涛, 余祖湛, 等. 三峡库区地质灾害监测预警体系运行与成效分析[J]. *华南地质与矿产*, 2018, 34(4):354-359.
- [5]唐辉明. 长江三峡工程水库塌岸与工程治理研究[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6):648-656.
- [6]许强, 刘天翔, 汤明高, 等. 三峡库区塌岸预测新方法—岸坡结构法[J]. *水文地质工程地质*, 2007(3):110-115.
- [7]WANG L, GUO F, WANG S M. Prediction model of the collapse of bank slope under the erosion effect of wind-induced wave in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Environmental Earth science*, 2020, 79(18):421.
- [8]WANG Y, KUANG S, SU J. Critical caving erosion width for cantilever failures of river bank[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(3):220-225.
- [9]ZHAO J, ZHANG H, YANG C, et al. Experimental study of reservoir bank collapse in gravel soil under different slope gradients and water levels[J]. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 2020, 102:249-273.
- [10]JI F, SHI Y, ZHOU H, et al. Experimental research on the effect of slope morphology on bank collapse in mountain reservoir[J]. *Natural Hazards*, 2017, 86(1):1-17.
- [11]许强, 陈建君, 张伟. 水库塌岸时间效应的物理模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2008(4):58-61.
- [12]ZHENG J, YANG X J, FAN H H, et al. Experimental study on the failure process of the homogeneous bank slopes of reservoir during the water level's fluctuation[J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2018, 47(7):1430-1434.
- [13]JI F, LIU C, ZHOU H, LIU H, LIAO Y. Identifying the influences of geological factors on reservoir bank collapse by a model test[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(1):127-139.
- [14]叶润青, 付小林, 霍志涛, 等. 三峡库区 175 米试验性蓄水期间塌岸调查分析[J]. *华南地质与矿产*, 2019, 35(3):348-353.
- [15]BAO Y H, GAO P, HE, X B. The water-level fluctuation zone of three gorges reservoir—a unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150:14-24.
- [16]BAO Y H, TANG Q, HE X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J].

Hydrology Research, 2015, 46(2) :212-221.

[17]许强, 黄润秋, 汤明高, 等. 山区河道型水库塌岸研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009:1-150.

[18]刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7) : 1321-1332.

[19]邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9) :2629-2638.

[20]王力. 波浪作用下三峡库区土质岸坡塌岸预测方法与应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.