

三峡库区滑坡与河谷协同演化机制

唐辉明^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉)湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 武汉 430074

E-mail: tanghm@cug.edu.cn

2024-11-15 收稿, 2025-01-04 修回, 2025-02-13 接受, 2025-02-25 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(42090050)资助

摘要 我国是世界上滑坡灾害最严重的国家. 由于强烈的内外地质动力作用、特殊的地貌演化过程、矛盾的人地耦合关系等因素, 长江三峡库区滑坡灾害多达4000余处, 严重威胁居民点和重大基础设施的安全. 面向国家防灾减灾重大战略需求, 围绕长江流域滑坡防控关键科学问题, 从气候变化、地质构造、地表过程和滑坡孕育着手, 系统归纳了三峡库区地质环境背景和地质灾害空间分布特征, 阐述了在气候变化背景条件下长江三峡库区地质构造活动驱动地表过程的内外动力耦合作用, 揭示了长江三峡库区地貌演化和河流演变的历史. 通过三峡库区全流域滑坡的系统统计分析, 揭示了滑坡坡脚和后缘高程分布规律, 发现“地壳抬升-气候驱动-地表过程”三者高度关联条件下滑坡生成规律, 揭示了滑坡与河流阶地生成协同演化机制. 厘清了气候变化驱动下河谷演化与地质构造的关系, 阐明了气候和河谷演化引起的地表过程响应规律. 成果对保障人民生命财产安全、长江大保护重大战略顺利实施、国家重大工程安全运营具有重要意义.

关键词 滑坡灾害, 地质构造, 气候变化, 地表过程, 滑坡生成, 协同演化

大河流域是人类文明的重要发源地, 长江和黄河是中国两大重要的河流, 它们不仅仅是自然地理的范畴, 更是承载着中国悠久的历史、丰富的文化和经济发展的印记. 以其活跃的地质构造、强烈的内外地质动力作用、特殊的地貌演化过程、复杂的灾害发育规律、多变的水土水文特征、矛盾的人地耦合关系, 使其成为研究中国乃至亚洲地貌演化、地表响应、水土流失及成灾机制、人地关系及人地系统评价的重点、难点区域^[1].

我国地形地貌多样、地质条件复杂, 是世界上地质灾害最为严重的国家之一^[2,3]. 地壳隆升及大江大河的强烈切割, 造就了山高坡陡的“V”形河谷地形^[4-6], 构造运动和外动力作用极其活跃^[7,8], 有利于滑坡、崩塌等地质灾害的发生^[6,9-16]. 据不完全统计, 长江三峡库

区范围内已查明滑坡地质灾害4000余处^[4], 对长江三峡水利枢纽安全运行和库区人民生命财产安全造成了严重威胁. 如2003年7月13日, 位于三峡库区长江支流青干河左岸的湖北省秭归县沙镇溪镇千将坪村因连日暴雨诱发的千将坪滑坡, 共造成14人死亡、10人失踪、346间房屋倒塌、1067亩农田毁坏, 造成直接经济损失超过5735万元^[17]; 2014年9月2日, 位于长江支流锣鼓洞河上的杉树槽滑坡发生失稳, 完全摧毁了位于坡脚的大岭水电站和G348国道, 造成了约3200万的经济损失^[18]. 滑坡是浅表岩石圈与大气圈和水圈等多圈层协同演化的产物, 是各个圈层相互作用的重要纽带. 因此, 从地球系统多圈层角度研究滑坡, 方能系统全面揭示滑坡演化地质过程.

当前, 我国正在实施“长江经济带发展”和“一带一

引用格式: 唐辉明. 三峡库区滑坡与河谷协同演化机制. 科学通报, 2025, 70: 3505–3515

Tang H. Mechanism of the coevolution of landslides and river valleys in the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3505–3515, doi: 10.1360/TB-2024-1225

路”倡议等国家发展战略,面临着重大滑坡预测预报与防控难题.如何科学地应对滑坡地质灾害带来的挑战,破解长江流域滑坡防控关键科学问题,已迫在眉睫,也是国家重大战略实施的重要保障.滑坡地质灾害的发生与河谷地貌的形成演化密不可分,科学应对滑坡灾害需要与流域地貌演化相结合.在全球气候变化的背景条件下,长江三峡库区地质灾害的分布规律与内外动力耦合作用关联密切.滑坡坡脚和后缘高程分布规律表明,地壳抬升、气候变化、地表过程之间存在高度关联性,亟需从“地壳抬升-气候驱动-地表过程”关联性切入,厘清地质构造、气候变化与河谷演化与滑坡成生之间的关系,进而分析气候变化背景下河谷演化引起的地表过程,从而揭示长江三峡库区滑坡群发多发的孕灾机制,为长江大保护战略和广大居民城镇地质安全提供科学支撑.

1 三峡库区地质背景与灾害发育概况

长江三峡库区的地貌景观主要由一系列的构造事件(内力)和地表侵蚀(外力)所共同塑造.晚侏罗世燕山造山运动形成了山地的地形骨架,在新近纪喜马拉雅造山运动之后,长期的侵蚀作用使该地区逐渐形成了现今的中低山脉和河谷地貌.从奉节到秭归以西的一段地势最高,形成了著名的三峡(瞿塘峡、巫峡、西陵峡),海拔从最高处向西和向东下降,分别形成丘陵景

观和中山山脉,山脉走向受主要地质构造控制(图1).除上志留纪、下泥盆世、上石炭世地层年代缺失,从震旦纪到第四纪地质单元均有出露.红层在三峡库区广泛分布,约占三峡库区总长度的72%,该地层中滑坡灾害最为发育.红层包括形成于侏罗纪和三叠纪的砂岩、泥岩以及砂岩与泥岩层互层沉积岩.三峡库区侏罗系的红层主要出露在奉节西部和秭归中部,该类地层是典型的易滑地层(图1).三叠系红层仅在巴东和秭归(巴东组)的部分地区出现.在奉节至秭归之间,除红色地层外,还存在其他沉积岩(灰岩、泥灰岩和白云岩).这些坚硬的岩石形成了奉节-秭归地区陡峭的峡谷和山谷^[19].

三峡库区褶皱发育,是多期次构造活动的结果.从三峡库区西部开始,褶皱带走向由近南北向变为近东西向,并在东部与秭归向斜交汇.区域的主要构造包括瞿塘峡背斜、巫山背斜、黄陵背斜、秭归向斜、万县向斜、仙女山断裂、九畹溪断裂、牛口断裂、黄草峡断裂等大型构造.

关于三峡形成的年代,存在较大的争论,从白垩纪到第四纪都曾被提出是三峡下切形成的年代.2021年,Zhang等人^[20]综合分析了以前的证据结合新生成的长石Pb同位素数据提出三峡下切可能介于10~3 Ma.河流的侧蚀下切导致三峡库区存在多级阶地^[21,22],是三峡形成后构造气候共同作用的结果,阶地的存在为滑坡

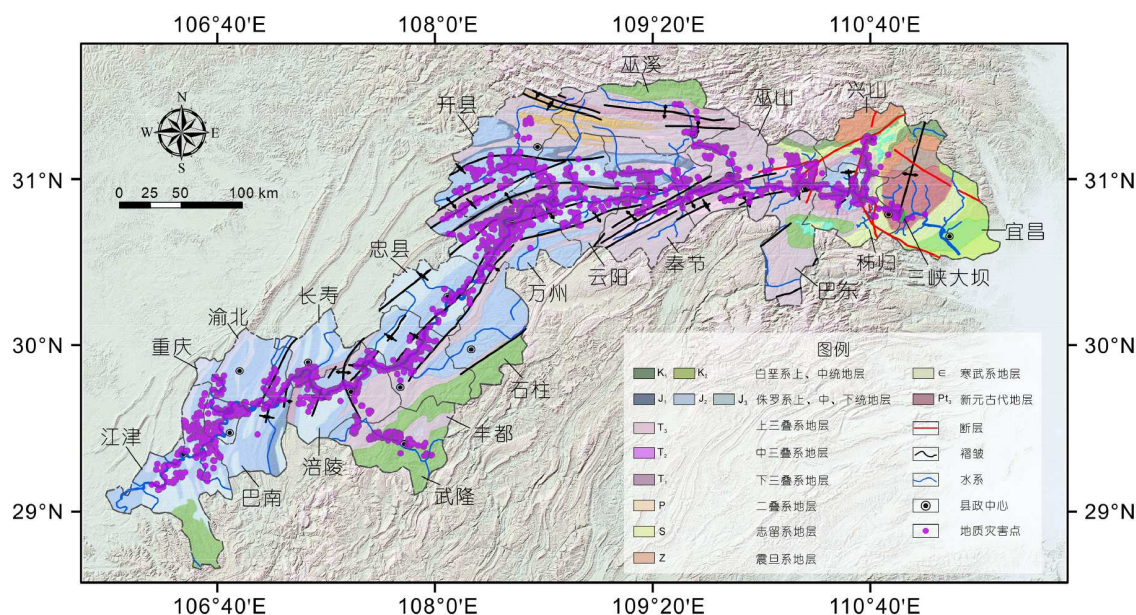


图1 长江三峡库区地质灾害分布与地质背景

Figure 1 Distribution and geological background of geological hazards in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River

的发生提供了条件。

滑坡、岩崩、泥石流、地裂缝和地面沉降是三峡库区的主要地质灾害类型。三峡库区宜昌至江津段共存在4429处地质灾害点。其中滑坡、岩崩4256起,总量约42.4亿立方米,其余包括泥石流58起、地裂缝42起、地面沉降73起^[23]。

地质灾害集中于长江干流及其部分支流,滑坡和崩塌在秭归县和巴东县尤为多发(图1)。在支流中,香溪、归州、青干、草塘、梅溪和乌江流域地质灾害最为频繁,占长江流域各支流滑坡岩崩总数的44.3%,地质灾害总量的63.4%。

2 内外动力驱动地表过程

三峡库区地质灾害呈现数量多、分布广的特点,其分布规律与易滑地层的地质岩性和区域地质构造有关。本课题组^[19]依托三峡库区科研课题进行了30余年的系统研究,结果表明三峡库区滑坡的形成演化是该区域大气圈、水圈、工程扰动圈和岩石圈共同作用的结果(图2)。岩石圈内的构造活动是滑坡演化的内动力,自新构造运动以来,三峡库区一直处于间歇性大面积抬升状态^[24],在东西向挤压应力的控制下,形成了南北构造形迹,并向北逐渐延伸,与川东南陷褶带一起形成了复合的构造体系。在此过程中,区域地表不断抬升,河流持续侵蚀下切,河床加深,在河流侵蚀与地质构造的双重作用下,岸坡逐渐增高和变陡,增大了坡体的重力驱动失稳风险,为滑坡孕育提供了良好的外部条件^[25]。大气圈、水圈、工程扰动圈的共同作用是滑坡演化的外动力。受季风气候控制,快速隆升地区的河流阶地受控于气候变化和构造隆升的耦合作用,地质构造隆升提供河谷下切的背景,而气候变化影响河流堆积-切割行为的转换,阶地的形成与冰期-间冰期气候转换密切相关^[26]。阶地形成过程中的侵蚀、堆积和应力调整为滑坡的孕育提供了必要的地形地貌和力学条件。此外,大气圈通过水汽输送参与了地表与地下水圈的循环作用,导致岩土体含水量的周期性变化,加速了岩土体的裂解与风化,有利于滑坡体的形成。工程扰动圈通过大量开挖与工程修筑活动改造了地表与地下结构,驱动原有的地表/地下水圈发生改变,同时导致坡体内部结构和力学状态发生重构,从而加速了潜在滑坡的形成与古滑坡的复活,成为人工影响滑坡演化不可忽视的因素。

岩性是控制三峡库区地质灾害分布的主要因素。

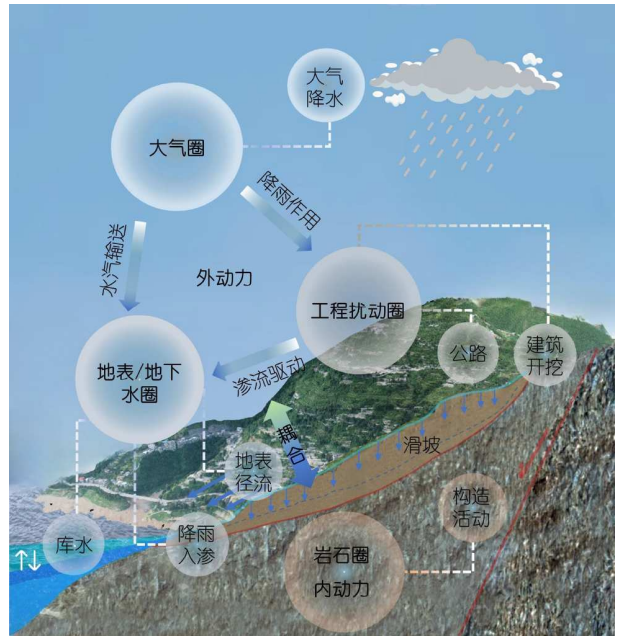


图2 内外动力驱动滑坡地表过程示意图

Figure 2 Schematic diagram of landslide surface process driven by internal and external forces

三叠系巴东组和侏罗系地层的砂岩、泥岩是最容易发生滑坡的地层,发育着大量的崩塌和滑坡灾害。在这些地层岩崩和滑坡体积分别占三峡库区崩塌和滑坡总量的87.3%和91.1%。前寒武纪岩浆岩和变质岩中未发生大型岩崩或滑坡,在三峡大坝附近风化物质中仅发生过小规模岸坡滑塌。此外,在三峡所在的碳酸盐岩地区,崩塌和滑坡发育较少。三峡库区的滑坡多发生于倾向河谷中等角度的顺向坡结构中,特别是在背斜的侧翼和向斜的核部。顺向坡结构是大型顺层滑坡发育的理想地质环境。典型代表为秭归向斜和巴东的官渡口向斜,该地质结构中发育了大量的大型顺层滑坡^[19]。

因此,三峡库区滑坡的发育是区域内外动力因素叠加耦合的结果,大气圈、水圈、工程扰动圈及岩石圈的相互作用决定了该区域独特的地质背景与地质过程,为库区滑坡的发育提供了优势条件。

3 三峡库区地貌演化过程

如前所述,三峡库区滑坡的孕育形成是大气圈、水圈、工程扰动圈以及岩石圈共同作用的结果,其中地质构造和地貌演化对滑坡的孕灾过程具有十分重要的影响。三峡库区的地貌单元复杂,主要包括中低山地和丘陵地带。库区大致以奉节为界,横跨两大地貌单元。

库区东段主要位于三峡谷区, 西段为低山丘陵区, 滑坡主要分布在构造侵蚀中低山峡谷地貌单元. 滑坡的形成和发展与区域地貌演化密切相关. 地貌演化过程中的侵蚀、剥蚀作用为滑坡提供了物质来源, 而滑坡活动又进一步改造了地貌形态^[27]. 库区位于我国第二级地形阶梯的东缘, 经历了多次构造运动, 形成了复杂的地质构造, 包括褶皱和断层, 这些构造活动对地貌形态和地质灾害的发生有着重要影响^[28]. 如图3(a)所示, 新构造运动在三峡库区活动强烈, 导致地形高差增大, 河流深切, 形成峡谷地貌, 为滑坡提供了良好的临空面和滑坡体, 其中包括了黄陵背斜、秭归向斜等构造单元. 库区水位波动、降雨和地震等因素都会对滑坡稳定性产生影响, 如库区水位的波动可能会弱化阶地基部岩土体的稳定性, 从而导致斜坡体应力重分布, 增加滑坡的风险. 因此, 三峡库区地貌单元的格局对库区滑坡的孕育有着重要的影响, 地貌演化过程促使了滑坡的生成(图3).

地质测年对于揭示三峡库区内外力相互作用具有重要的意义, 可以揭示地貌演化和河流演变的历史. 随着地质测年方法的精度和准确度的提升, 为利用年代进行阶地对比提供了更为有利的条件. 例如, 通过测定堆积阶地上沉积物中有机质的碳十四同位素含量(^{14}C)和石英或长石的释光年代(OSL), 可以估算阶地的形成年代^[29-31]. 此外, 从峡谷地段采集不同高程的样品并通过热年代方法可以测定河谷的下切年代, 为理解高原隆升、气候变化与河流发育的关联关系提供了重要途径^[32].

根据三峡地区阶地测年资料^[33-37], 该地区发育多级河流阶地, 这些阶地是由水流先侧向侵蚀然后下切形成. 阶地的形成与构造活动、气候变化密切相关^[26,27,33]. 通常, 可在三峡地区重庆-宜昌段识别出五级河流阶地(图3(b)-(d)). 整体上, 第一到第五阶地年龄在0.012~0.740 Ma之间. 其中, 第一级阶地为全新世早期, 第二级阶地为晚更新世晚期, 第三级阶地为晚更新世

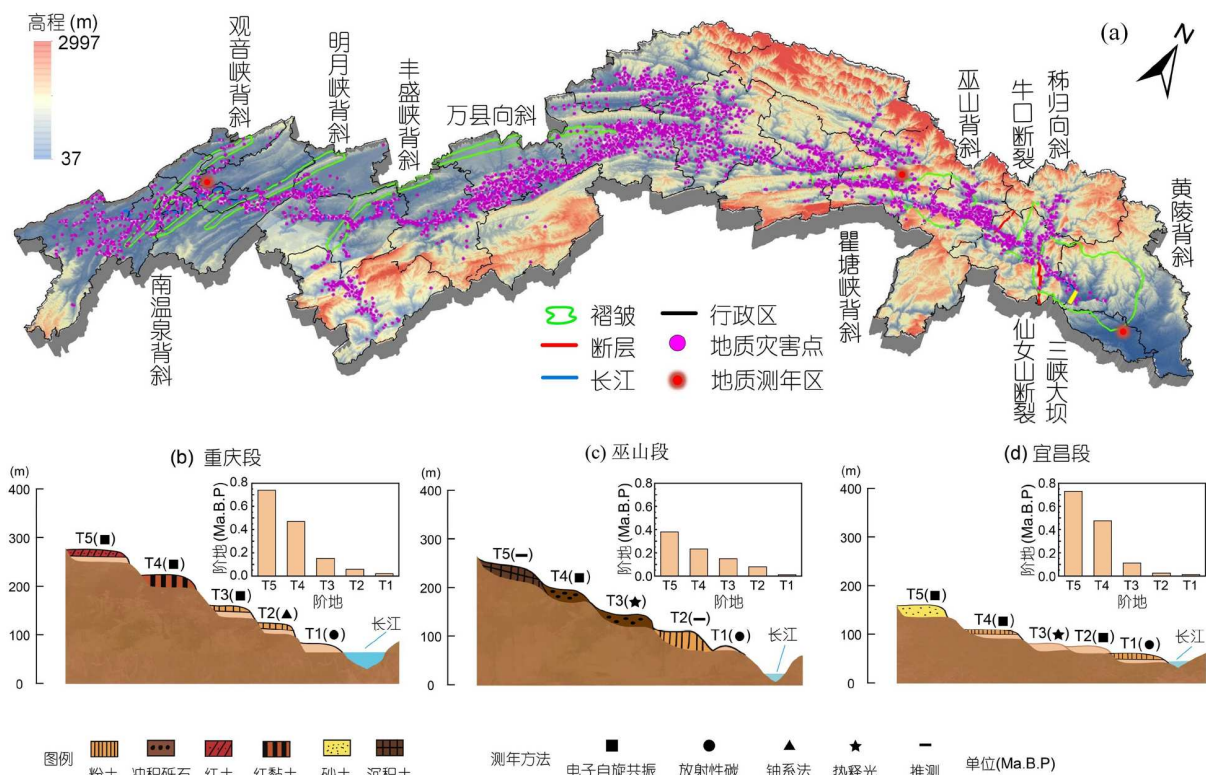


图3 三峡库区典型地貌单元与阶地分布. (a) 三峡库区地质灾害点与地形地貌; (b) 重庆段典型阶地剖面图; (c) 巫山段典型阶地剖面图; (d) 宜昌段典型阶地剖面图

Figure 3 Typical geomorphic units and terrace distribution in the Three Gorges Reservoir area. (a) Geological hazard points and topography in the Three Gorges Reservoir area; (b) typical terrace profile map of Chongqing section; (c) typical terrace profile of Wushan section; (d) typical terrace profile of Yichang section

早中期,第四级阶地为中更新世早中期,第五级阶地为早更新世晚期。从五级阶地的高程位置看,目前巫山段和宜昌段处分别于最高位置和最低位置。此外,在三峡部分地区,也发现了更高级别的河流阶地^[20,22,38]。图4显示了三峡库区重庆段、巫山段和宜昌段阶地高程与形成年代关系,阶地年龄和阶地高程二者之间均呈现很好的线性关系;同时三峡地区阶地的类型及其分布也反映了不同河段的水动力条件和后期地表径流的侵蚀能力,库区河流具有强大的下切能力和快速的流速等特点。因此,在三峡区内,以基座阶地和堆积阶地分布为主,例如巴东和秭归段,特别在黄陵背斜的河谷两岸,有较多结晶岩出露,这种岩石的抗风化能力较差,风化壳很厚,利于地表水的下渗,导致其易被侵蚀。

4 河流阶地与滑坡成生协同演化模式

随着地壳的抬升,三峡地区形成了观音峡背斜、南温泉背斜、明月峡背斜、丰盛峡背斜、瞿塘峡背斜、巫山背斜、黄陵背斜等诸多背斜构造,以及万县向斜和秭归向斜等向斜构造^[39](图5(a))。在区域气候变化影响下,地形切割与地层剥蚀作用强烈,形成了三峡库区著名的三大峡谷—瞿塘峡、巫峡、西陵峡^[40]。如图5显示,大多数滑坡发生在向斜构造部位,区域滑坡最大频数出现在秭归向斜处,涪陵-奉节段也属于向斜构造,滑坡分布较密集。从三峡库区上游至下游,滑坡前缘最低高程和滑坡后缘高程呈现出逐渐降低的趋势,与河流高程呈现出相同的趋势,由此说明滑坡的产生与长江河谷地貌密切相关(图5(b))。而如前所述,三峡地区地貌过程又是与区域地壳运动和区域气候紧密相

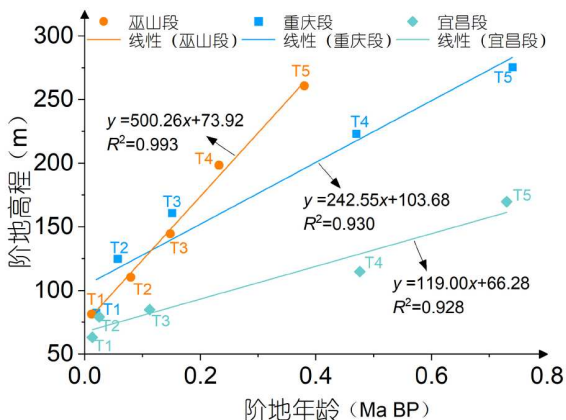


图4 三峡库区典型区段阶地高程与形成年代关系图
Figure 4 Relationship between terrace elevation and formation age in typical sections of the Three Gorges Reservoir Area

关。由此可见,在气候变化背景条件下“地壳运动-地表过程-滑坡成生”三者高度关联,即河流阶地高程与滑坡演进过程、滑坡群发时间、滑坡前缘高程存在明显的对应关系。

由于长江三峡不同库段斜坡坡度、斜坡结构以及地层岩性的差异,造就了不同滑坡演化模型。本文从三峡库区典型滑坡代表性案例出发,总结三种典型协同演化模式。

(1) 近水平状滑坡演化模式(以塘角1号滑坡为例)。塘角滑坡为典型的近水平状滑坡,岩层产状近水平,滑床为侏罗系中统地层。在滑坡形成初始阶段,随着河谷开始下切,长江两岸山体遭受强烈的卸荷、风化剥蚀作用。伴随着地形剧烈切割、河流持续侵蚀,侏罗系地层出露地表,约70万年前河流五级阶地 T_5 形成,产生新的临空面。受岩层中软弱夹层控制,塘角1号滑坡发生第一次大规模滑动。河谷继续下切,河流进一步侵蚀山体,约47万年前形成河流四级阶地 T_4 ,为滑坡的第二次滑动提供了新的临空条件^[41,42]。对比深海氧同位素记录数据,推测两期滑坡发生于间冰期时期^[21]。河谷继续下切,河谷逐渐由“U”型演变为“V”型。受地层岩性和地形控制,塘角1号滑坡第三次滑动于三级河流阶地 T_3 形成后。塘角滑坡经历三次大规模滑动所形成的三级平台(滑床)与三级阶地在高程上具有较好的一致性。揭示了诸如塘角滑坡这类的近水平状滑坡的发生主要受地层岩性控制,且在漫长的地质历史时期与河流阶地的形成体现出较好的协同性。

(2) 顺层滑坡演化模式(以藕塘滑坡为例)。藕塘滑坡为三峡库区典型的顺层单斜结构多级多期次滑坡,滑坡主要受顺向结构控制。在河谷快速下切作用下,三峡库区整体表现为地壳阶段性的隆升和长江侵蚀下切,库区表现为高山峡谷、多夷平面、多级阶地特征。库区剖面图显示地层主要呈层状构造,区域褶皱、断裂构造发育。约31万年前藕塘滑坡发生第一次大规模滑动^[43],此前长江侵蚀下切使深埋易滑软弱夹层逐渐裸露于坡面,河漫滩逐渐形成 T_5 阶地。加之受顺层单斜结构控制,滑坡倾向长江,为滑坡提供了必要内在条件。在此后的多期次滑动中,长江侵蚀下切与 T_4 、 T_3 阶地的抬升为藕塘滑坡提供了动力基础和运动空间^[44]。复杂的构造运动孕育了坡岸滑坡的顺层结构,河流阶地的演化加剧了顺层滑坡的运动,同时滑坡的多级多期次滑动也改变了河谷阶地地貌。

(3) 顺层-切层滑坡演化模式(以黄土坡滑坡为例)。

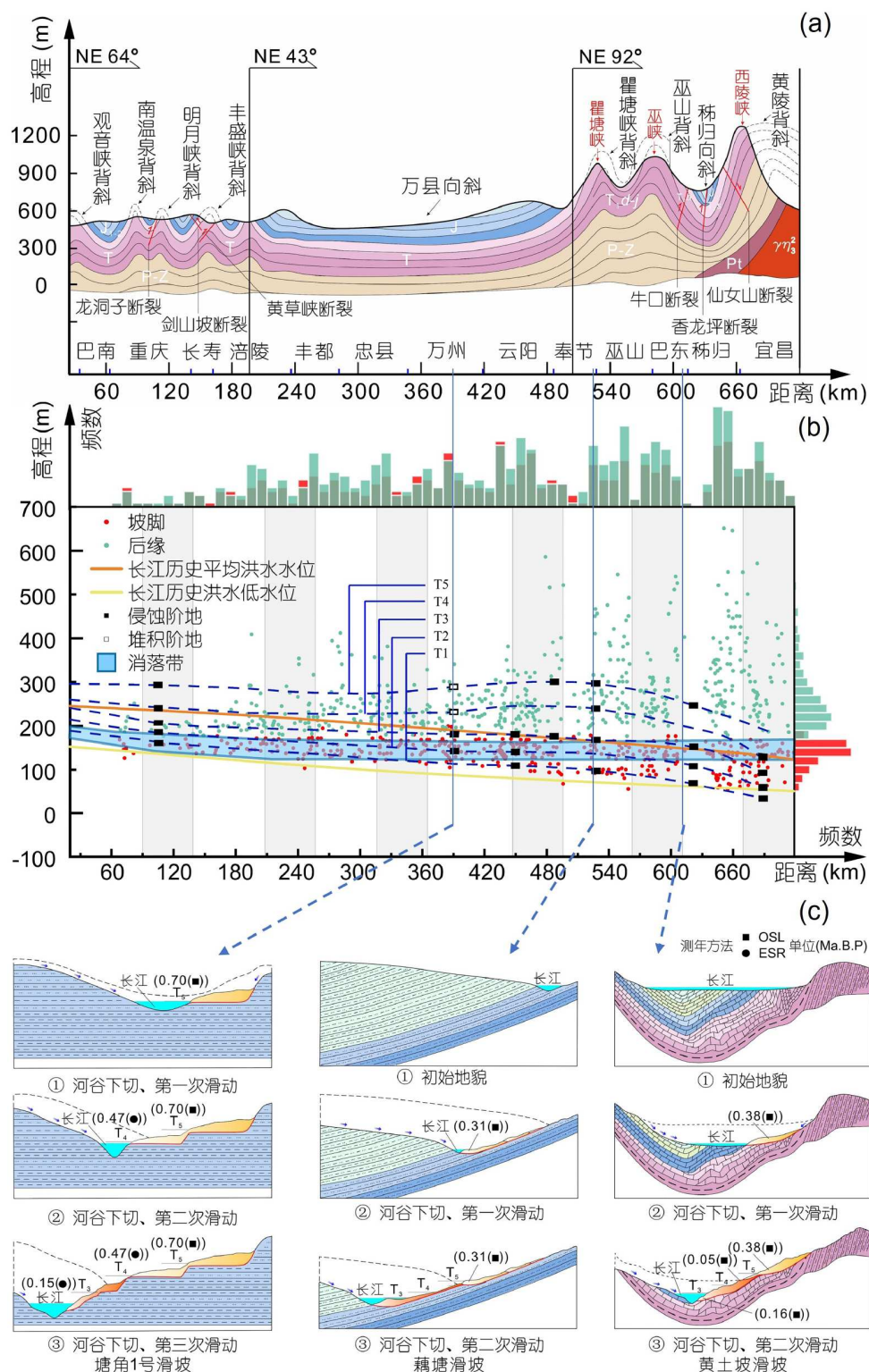


图 5 河流阶地特征与滑坡成生协同演化模式. (a) 三峡库区地质剖面图; (b) 三峡库区滑坡沿江分布图; (c) 三峡库区典型河流阶地与滑坡成生协同演化模式图

Figure 5 The characteristics of river terraces and the synergistic evolution mode of landslide formation. (a) Geological profile map of the Three Gorges Reservoir area; (b) distribution map of landslides along the Three Gorges Reservoir area; (c) typical river terrace and landslide co-evolution model in the Three Gorges Reservoir area

长江不断侵蚀河床,河漫滩逐渐形成了 T_3 阶地,并伴随河谷的侧切作用形成临空面。此后, T_3 阶地临河斜坡在各种地质营力作用下逐渐风化,并在斜坡内部潜在顺层向软弱面逐渐形成潜在滑动面。距今约38万年,黄土坡滑坡潜在滑动面在降雨、地震和地下水等外地地质营力耦合作用下贯通形成顺层基岩切层滑坡,产生第一次较大规模的滑动^[45]。距今大约在38万年至14万年之间,上一次滑动形成堆积于河漫滩上的滑体进一步遭受河流侵蚀、风化作用。与此同时,长江进一步下切形成 T_2 阶地,并在地地质营力作用下,逐渐沿着既有顺层软弱结构面形成潜在滑动面。距今约5-14万年,滑动面沿顺层面贯通,黄土坡滑坡发生第二次大规模滑动^[10],并形成堵江事件,滑动滑坡前缘剪出口位于 T_2 阶地之上。对比深海氧同位素记录数据,推测这一次滑坡时间发生于间冰期时期^[21]。河谷继续冲蚀下切,在切穿河谷中堆积的堰塞坝体,河流贯通。三峡水库蓄水后,堆积体滑坡进一步复活变形,并逐渐形成了黄土坡滑坡现今地貌。

可见,三类滑坡的演化与河流阶地的出现具有很强的关联一致性。虽然三类滑坡所处的地质结构不同、斜坡的坡度也有一定差异,但河流阶地形成的临空条件,仍是触发滑坡产生的重要关键因素。

通过搜集三峡库区滑坡与阶地测龄数据绘制了滑坡发生时间与阶地年代关系图(图6)。结果表明,滑坡发生与阶地形成具有较强的协同性。图6的数据点均落在曲线的下方,说明滑坡发生的时间滞后于阶地形成的年代。阶地的形成为后期滑坡孕育发展提供了几何临空条件。滑坡发生的时代与位置与阶地的时空演化具有密切的关系。对比深海氧同位素记录数据,部分滑坡主要发生于间冰期时期^[21]。这进一步验证了河流阶地受控于气候变化和构造隆升的耦合作用,先期地质构造隆升促进了河谷下切斜坡临空面形成,而气候变化影响了河流侧蚀-下切行为的转换。

在地质和区域气候共同作用下,地层不断沉积、剥蚀、再沉积、再剥蚀,河流两岸山体局部形成临空面。而当临空面切割出含软弱夹层较多顺坡向结构地层时,如侏罗系地层和巴东组地层等,滑坡相继形成。由此可见,河流阶地与滑坡两者具有协同演化特点。

5 库区滑坡灾害防灾减灾与人地协调的思 考讨论

长江三峡水利枢纽工程是世界上规模最大的水电

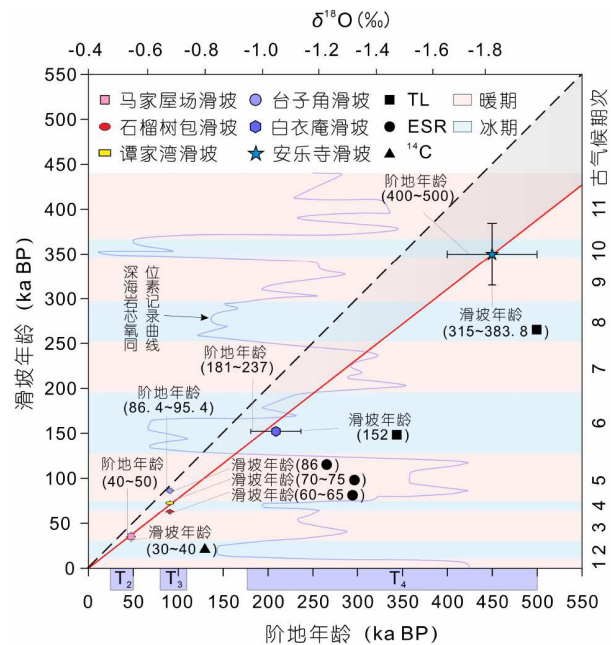


图6 三峡库区典型滑坡与阶地年龄关系图

Figure 6 Typical landslides and age relationship of terraces in the Three Gorges Reservoir area

站,也是有史以来建设规模最大的水利工程项目。三峡水库干流库段长约667 km,干支流库岸线总长约5014 km。三峡水库运行后,库首至三峡库段长江水位提升超过100 m。每年库水位在145与175 m之间涨落,水位波动30 m。库水位变化打破了库区原有地质环境平衡状态,各种地质灾害在水库运行条件下呈现出一种新的态势。上述灾害包括崩塌、泥石流、滑坡、地裂缝、岩溶地面塌陷、塌岸和库岸再造等,对库区人民生命财产安全以及三峡水库的安全运行造成不利影响或严重威胁。

通过前述河流阶地与滑坡成生协同演化分析,研究了气候变化背景下河谷演化引起的地表过程,阐明了不同期次的河谷演化、易滑岩组、河流阶地高程与滑坡演进过程、滑坡群发时间、滑坡前缘高程存在明显的对应关系。受地质构造和地貌过程的影响,地质灾害主要集中在长江及其部分支流沿岸区域,但长江沿岸的城镇主要依托沿江一级岸坡进行建设,居民区灾害点位置一般位于地势较低的区域,也即长江三峡库区居民点城镇居民点也主要聚集在沿长江及其支流两岸岸附近。因此,在降雨、库水波动、工程扰动等内外营力作用下,这些城镇居民点聚集区域往往也是滑坡地质灾害易发区。

经过近20多年三峡库区多批次地质灾害治理工程,成体系的削坡减载、抗滑桩、抗滑挡墙、地表与地下排水、格构护坡等系统治理已顺利实施,岸坡整体稳定性得到了较大提升。但近年来,长江三峡库区城镇发展速度快,居民建房、公路建设等工程扰动活动剧烈,对地质环境产生了重要影响。因此,在城镇发展方面,亟须制定相应的建设发展规划,规范化相关流程。如进行城镇地质安全分区与评价,对于地质安全性差的地区加强安全监测与巡查工作;加强地质灾害防控标准化工作,推进风险管理体系建设;制定城镇居民自建房建设管理办法,强化规划审批,严禁大挖大填,多部门联合攻关,提出科学评价方案。

总之,三峡库区地质灾害主要集中在长江及其部分支流沿岸区域,同时也是城镇居民点聚集区,人地矛盾问题仍需重视。亟须以宜居地球和人地协调思想为指导,系统开展三峡库区滑坡与河谷协同演化规律研究,结合将今论古的地质演化过程和现今人类工程活动合理评价岸坡稳定性,实现三峡库区人地协调可持续发展的新格局,为长江大保护和广大居民城镇地质安全提供科学支撑,对保障人民生命财产安全、长江大保护重大战略顺利实施、国家重大工程安全运营具有重要意义。

6 结论与展望

(1) 三峡库区地质灾害呈现数量多、分布广的特点,其主要地质灾害类型为滑坡、岩崩、泥石流、地裂缝和地面沉降。灾害分布规律与易滑地层的地层岩性和区域地质构造有关。三峡库区滑坡的形成演化是该区域工程地质条件叠加多圈层耦合作用的结果。在三峡库区重庆段、巫山段和宜昌段阶地年龄和阶地高程二者之间均呈现很好的线性关系。

(2) 三峡库区河流及阶地的演变过程对滑坡成生过程具有控制效应。河谷下切与气候等各类内外地质营力作用下协同演化,表现出时间尺度的多阶段性与空间尺度的多模式性。滑坡发生与阶地形成具有较强的协同性,进一步验证了河流阶地受控于气候变化和构造隆升的耦合作用,先期地质构造隆升促进了河谷下切斜坡临空面形成,而气候变化影响了河流堆积-切割行为的转换。

(3) 三峡库区地质灾害主要集中在长江及其部分支流沿岸区域,同时也是城镇居民点聚集区,人地矛盾问题仍需重视。亟须以宜居地球和人地协调思想为指导,系统开展三峡库区滑坡与河谷协同演化规律研究,实现三峡库区人地协调可持续发展的新格局,为长江大保护和广大居民城镇地质安全提供科学支撑。

参考文献

- 1 Peng J, Lan H, Qian H, et al. Scientific research framework of livable Yellow River (in Chinese). *J Eng Geol*, 2020, 28: 189–201 [彭建兵, 兰恒星, 钱会, 等. 宜居黄河科学构想. *工程地质学报*, 2020, 28: 189–201]
- 2 Tang M. *Engineering Geological Study on Prediction and Prevention of Slope Geological Hazards* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [唐辉明. 斜坡地质灾害预测与防治的工程地质研究. 北京: 科学出版社, 2015]
- 3 Li J. Geomorphic outline and formation mechanisms of the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Mount Res*, 1983, (1): 7–15 [李吉均. 青藏高原的地貌轮廓及形成机制. *山地研究*, 1983, (1): 7–15]
- 4 Tang H, Zou Z, Xiong C, et al. An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China. *Eng Geol*, 2015, 186: 17–27
- 5 Chen J P, Li H Z. Catastrophic characteristics and mechanisms of complex structural rock masses in the rapidly uplifting reach of the upper Jinsha River (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2016, 46: 1153–1167 [陈剑平, 李会中. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46: 1153–1167]
- 6 Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, et al. Geological hazards effects of uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2004, 19: 457–466 [彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应. *地球科学进展*, 2004, 19: 457–466]
- 7 Tang M, Zhang G. A study on slope stability during reservoir water level falling (in Chinese). *Rock Soil Mechanics*, 2005, 26: 11–15 [唐辉明, 章广成. 库水位下降条件下斜坡稳定性研究. *岩土力学*, 2005, 26: 11–15]
- 8 Cheng Q G, Peng J B, Hu G T, et al. *Dynamics of High-Speed Rock Landslides* (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999 [程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡动力学. 成都: 西南交通大学出版社, 1999]
- 9 Tang H, Zhang Y, Sun Y. A Study of equivalent deformability parameters in rock masses (in Chinese). *Earth Sci*, 2007, 32: 389–396 [唐辉明, 张宜虎, 孙云志. 岩体等效变形参数研究. *地球科学*, 2007, 32: 389–396]
- 10 Tang H, Li C, Hu X, et al. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on *in situ* tunneling and monitoring. *Landslides*, 2015, 12:

511–521

- 11 Huang R, Chen G, Guo F, et al. Experimental study on the brittle failure of the locking section in a large-scale rock slide. *Landslides*, 2016, 13: 583–588
- 12 Tang H, Yong R, Ez Eldin M A M. Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. *Bull Eng Geol Environ*, 2017, 76: 839–853
- 13 Ge Y, Tang H, Li C. Mechanical energy evolution in the propagation of rock avalanches using field survey and numerical simulation. *Landslides*, 2021, 18: 3559–3576
- 14 Yin Y, Huang B, Zhang Z, et al. Geological Disaster Prevention and Control in the Three Gorges Reservoir Area (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [殷跃平, 黄波林, 张枝华, 等. 三峡工程库区地质灾害防治. 北京: 科学出版社, 2022]
- 15 Wang Y, Wang H, Cui P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 286–300 [王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战. 科学通报, 2024, 69: 286–300]
- 16 Liu C Z, Li T F, Cheng L P, et al. Progressive analysis theory and methodology for regional geological hazard assessment and early warning (in Chinese). *Hydrogeol Eng Geol*, 2004, (4): 1–13 [刘传正, 李铁锋, 程凌鹏, 等. 区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法. 水文地质工程地质, 2004, (4): 1–13]
- 17 Wang F W, Zhang Y M, Huo Z T, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 2004, 1: 157–162
- 18 Xu G, Li W, Yu Z, et al. The 2 September 2014 Shanshucao landslide, three gorges reservoir, China. *Landslides*, 2015, 12: 1169–1178
- 19 Tang H, Wasowski J, Juang C H. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China – Lessons learned from decades of research. *Eng Geol*, 2019, 261: 105267
- 20 Zhang Z, Daly J S, Li C, et al. Formation of the Three Gorges (Yangtze River) no earlier than 10 Ma. *Earth-Sci Rev*, 2021, 216: 103601
- 21 Zhang N X. Study on Bedding Bank Slope in the Three Gorges Reservoir Area (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993 [张年学. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究. 北京: 地震出版社, 1993]
- 22 Yang D Y. Geomorphic Processes of the Yangtze River (in Chinese). Beijing: Geology Press, 2006 [杨达源, 长江地貌过程. 北京: 地质出版社, 2006]
- 23 Tang M, Lu S. Research on the spatial distribution of slip zone of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area (in Chinese). *J Eng Geol*, 2018, 26: 129–136 [唐辉明, 鲁莎. 三峡库区黄土坡滑坡滑带空间分布特征研究. 工程地质学报, 2018, 26: 129–136]
- 24 Chen G, Li C, Chen S, et al. Landslide development and the geological process of watercourse evolution in the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). *Earth Sci*, 2013, 38: 411–416 [陈国金, 李长安, 陈松, 等. 长江三峡库区滑坡发育与河道演变的地质过程分析. 地球科学, 2013, 38: 411–416]
- 25 Zhao D J. Study on effective reconnaissance and control of Badong-type landslides in the region of western Hubei-eastern Chongqing (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2017 [赵德君. 鄂西–渝东巴东组滑坡的有效勘察与防治研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2017]
- 26 Pan B, Burbank D, Wang Y, et al. A 900 k.y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China. *Geology*, 2003, 31: 957–960
- 27 Liu X M. A study on geomorphologic character and landslide evolution in Wanzhou City, Three Gorges Reservoir (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2010 [刘雪梅. 三峡库区万州区地貌特征及滑坡演化过程研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2010]
- 28 Liang X Z, Tang H M. Analysis on macro geography background of landslide development at Three Gorges Reservoir area and nearby (in Chinese). *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)*, 2009, 28: 100–104 [梁学战, 唐红梅. 三峡库区及邻近地区滑坡发育宏观地质背景分析. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28: 100–104]
- 29 Pan B, Wu, G, Wang Y, et al. Age and genesis of the Shagou River terraces in eastern Qilian Mountains. *Chin Sci Bull*, 2001, 46: 509–513
- 30 Cui Z, He M, Chen H, et al. A Study on the deformation mechanism of the bank slope system in the west district of the new town, Wushan County, Three Gorges reservoir area (in Chinese). In: Proceedings of the Academic Symposium on Ground Rock Engineering Anchoring and Grouting Techniques, 1997 [崔政权, 何满潮, 陈鸿汉, 等. 三峡库区巫山县新城西区岸坡系统变形机制研究. 见: 地面岩石工程锚固与注浆技术学术研讨会论文集, 1997]
- 31 Li J, Xie S, Kuang M. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 2001, 41: 125–135
- 32 Nie J, Ruetenik G, Gallagher K, et al. Rapid incision of the Mekong River in the middle Miocene linked to monsoonal precipitation. *Nat Geosci*, 2018, 11: 944–948
- 33 Tian L J, Li P Z, Luo Y. Development History of the Yangtze Three Gorges Valley (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1996 [田陵君, 李平忠, 罗雁. 长江三峡河谷发育史. 成都: 西南交通大学出版社, 1996]
- 34 Tan Z. Crustal Stability Assessment and Reservoir-Induced Earthquake Prediction in the Head Region of the Yangtze Three Gorges Project (in Chinese). Beijing: Geology Press, 1992 [谭周地. 长江三峡工程库首区地壳稳定性评价与水库诱发地震预测. 北京: 地质出版社, 1992]

- 35 Deng Q, Wang X. Growth history of Huangtupo landslide: down-slope overlapping-landsliding-modification (in Chinese). *Earth Sci*, 2000, 25: 44–50 [邓清禄, 王学平. 黄土坡滑坡的发育历史: 坠覆-滑坡-改造. *地球科学*, 2000, 25: 44–50]
- 36 Qu B. Study on the steeped landform in the Yangtze Gorges area (in Chinese). Master Thesis. Chengdu: Southwest Normal University, 2005 [屈波. 长江三峡地区层状地貌研究. 硕士学位论文. 成都: 西南师范大学, 2005]
- 37 Tang H, Li C, Gong W, et al. Fundamental attribute and research approach of landslide evolution (in Chinese). *Earth Sci*, 2022, 47: 4596–4608 [唐辉明, 李长冬, 龚文平, 等. 滑坡演化的基本属性与研究途径. *地球科学*, 2022, 47: 4596–4608]
- 38 Wang K, Zhang F, Lin D, et al. Relation between Neotectonism and landslides in the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). *Clob Ceol*, 2007, 26: 26–32 [王孔伟, 张帆, 林东成, 等. 三峡地区新构造活动与滑坡分布关系. *世界地质*, 2007, 26: 26–32]
- 39 Jiang F Z. Discussions on the background of tectonic movement of Three-Gorge region (in Chinese). In: *Proceedings of Advances in Geodesy and Geodynamics*, 2004 [蒋福珍. 长江三峡地区构造运动背景探讨. 见: 《大地测量与地球动力学进展》论文集. 中国科学院测量与地球物理研究所, 2004]
- 40 Yang C, Zhu X, Wang L, et al. The formation of the east-flowing Yangtze Three Gorges: time, evidence and controversy (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2024, 39: 124–139 [杨超群, 朱祥峰, 王亮, 等. 长江三峡的形成: 时间、证据及争议. *地球科学进展*, 2024, 39: 124–139]
- 41 Cao Y. Risk assessment and early warning of individual landslide—Case study of the Tangjiaolandslide in Wanzhou (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2016 [曹颖. 单体滑坡灾害风险评价与预警预报——以万州区塘角1号滑坡为例. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2016]
- 42 Li X. Stability analysis of colluvial landslide in relation to variation of water level in Wanzhou District, Three Gorges Reservoir (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2021 [李喜. 三峡库区水位涨落变化对万州区库岸堆积层滑坡稳定性影响研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2021]
- 43 Dai Z W. Study on the deformation and failure mechanism of Outang large landslide in the Three Gorges Reservoir region, China (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Chang'an University, 2016 [代贞伟. 三峡库区藕塘特大滑坡变形失稳机理研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学, 2016]
- 44 Dai Z, Yin Y, Wei Y, et al. Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). *Hydrogeol Eng Geol*, 2015, 42: 145–153 [代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究. *水文地质工程地质*, 2015, 42: 145–153]
- 45 Hua S. Genetic Mechanism of multi-stages sliding and evolution law of the Huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2015 [滑帅. 三峡库区黄土坡滑坡多期次成因机制及其演化规律研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2015]

Summary for “三峡库区滑坡与河谷协同演化机制”

Mechanism of the coevolution of landslides and river valleys in the Three Gorges Reservoir area

Huiming Tang^{1,2}

¹ Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

² Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

E-mail: tanghm@cug.edu.cn

The Three Gorges Reservoir Area (TGRA) of the Yangtze River in China is a region of profound geological significance and human habitation; however, it is also highly susceptible to landslides because of its dynamic geological and climatic conditions. The area's propensity for landslides is not due only to natural conditions but is a complex interplay of various factors, including tectonic activity, climate change, and human influence. The aim of this study is to examine these factors and provide a comprehensive understanding of landslide formation in the TGRA, which is crucial for the safety and sustainable development of the region. The geological and climatic context of the TGRA is a long history of tectonic uplift, which, coupled with climatic variability, has shaped the unique geomorphology of the area. The incision of the Yangtze River and the development of its valleys have resulted in steep slopes and weak geological formations, making the area prone to slope instability. The initial phase of this study involves synthesizing this geological and climatic background to lay the groundwork for understanding landslide phenomena. This research employs a statistical analysis of landslide distribution, revealing that the occurrence of landslides is not random but is instead closely related to specific elevations, particularly those corresponding to ancient river terraces. This finding suggests that the evolution of the valleys and the occurrence of landslides are interconnected, with certain phases of valley development and climatic shifts increasing the susceptibility of the region to slope failure. A significant contribution of this study is the establishment of a coevolutionary framework between landslides and valley development. These findings demonstrate that multistage river incision and cyclic climatic transitions, such as glacial-interglacial periods, have led to the formation of stacked river terraces and slope structures that are prone to large-scale slope failure. The mechanism of “terrace-slope coupling” explains the spatial distribution of landslides and their recurrence. Moreover, in this research, how contemporary climate change exacerbates these geological risks is investigated. The increased rainfall intensity and fluctuating water levels in reservoirs reactivate ancient landslide structures, whereas human activities, such as urbanization on marginal slopes, further increase the vulnerability of the region. By examining representative landslides, in this study, their evolutionary modes are categorized into three types, which have significant implications for disaster mitigation strategies. The findings of this study have far-reaching implications for disaster prevention and risk management in the TGRA. This study advances the theoretical understanding of landslide genesis in active tectonic settings and under the influence of climate change. This research provides actionable guidelines for land-use planning, the development of early warning systems, and engineering interventions to mitigate landslide risk. By integrating geohistorical analysis with contemporary risk management, via this study, a model that can be replicated in other major river basins worldwide is proposed. Ultimately, this study's contributions are not confined to academic circles but have tangible benefits for the safety of the 20 million residents and the longevity of critical infrastructure in the Yangtze River Economic Belt. By understanding the complex interplay of geological and climatic factors that lead to landslides, the findings of this study equip policy-makers and engineers with the knowledge needed to implement effective measures to protect lives and property. The comprehensive approach taken in this research sets a precedent for future studies on landslide hazards and risk management, ensuring that the lessons learned from the TGRA can be applied to other regions facing similar challenges.

landslide geohazard, geological structures, climate change, surface processes, landslide genesis, co-evolution

doi: [10.1360/TB-2024-1225](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1225)