

三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨

鲍玉海, 贺秀斌

(中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要:三峡水库蓄水运行后将出现一个落差达 30 m 的消落带, 由于库水涨落和水文地质条件改变, 导致沿岸植被破坏, 地表裸露, 在降水、库水位周期性地涨落和涌浪的作用下, 土壤侵蚀强烈, 对当地的经济及环境产生影响, 故对消落带的土壤侵蚀问题应予以重视。根据三峡水库 2007—2010 年试验性蓄水产生的消落带实地调查, 在总结消落带土壤侵蚀主要影响因素的基础上, 分析了三峡水库消落带几种典型的土壤侵蚀形式: 波浪侵蚀、降雨径流侵蚀、崩塌及滑坡, 其中波浪侵蚀和崩塌最为突出, 其次为消落带成陆期的降雨溅蚀和径流冲刷, 而滑坡主要以蠕滑和前缘崩塌为主。同时, 针对岸坡的不同物质构成和地形地貌, 提出了不同土壤侵蚀类型的主要分布特点, 可以给库区消落带土壤侵蚀的防治提供借鉴。

关键词:三峡水库; 消落带; 库岸崩塌; 波浪侵蚀; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0190-06

Preliminary Study on Soil Erosion at the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three-Gorges Reservoir

BAO Yu-hai, HE Xiu-bin

(Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: There will be the annual change of 30 m in water level after the Three-Gorges Reservoir is completed, and thus there will be a water-level-fluctuating zone. Because few plants can grow well in such environment that is either very wet or very dry, usually the belt appears as a bare slope and has serious soil erosion problem. Characteristics of soil and water loss are primary obtained through field survey in the existing water-level-fluctuating zone. The preliminary investigation result indicates that the phenomenon of the soil and water loss is comparatively serious in the water-level-fluctuating zone, the influence factor of the soil and water loss is complicated and various, and the main soil erosion forms are surge erosion, slope erosion, bank collapse, and landslide. Furthermore, the results also showed that surge erosion and bank collapse are more prominent than other soil and water loss forms, the main forms of the slope erosion are rainfall splash erosion and runoff scouring, and the main forms of the landslide are creep and collapse.

Key words: the Three-Gorges Reservoir; water level fluctuating zone; bank collapse; surge erosion; soil erosion

三峡工程建成后, 采取“蓄清排洪”的运行方式, 在水库周边形成高差 30 m、面积达 349 km² 的消落带。三峡水库的消落带面积和水位涨落幅度均创国内已建水库之最, 消落带对移民生存与区域经济发展有重要影响^[1]。消落带边坡受干湿交替的周期性影响, 地面植被和土壤结构被严重破坏, 在生态系统的稳定、抗外界干扰能力及对生态环境变化的适应性

上, 均表现出明显的脆弱特性^[2-3]。再加之消落带水位涨落反自然洪枯规律, 出露成陆时期天气炎热潮湿, 大雨、暴雨频繁, 在波浪淘蚀和降雨径流冲刷的共同作用下发生严重的土壤侵蚀。消落带土壤侵蚀不仅降低土壤质量, 影响消落带植被恢复, 破坏拦沙截污的生态服务功能, 影响水库水质安全, 而且造成库岸持续后退并加剧库岸的失稳, 对库岸带居民生产

收稿日期: 2011-05-22

修回日期: 2011-06-14

资助项目: 中国科学院西部行动计划“三峡库区水土流失与面源污染控制试验示范”(KZCX2-XB3-09); 国家科技支撑计划课题(2011BAD31B03); 国家水专项课题(2009ZX07104-001)

作者简介: 鲍玉海(1981—), 男, 山东成武人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: byh@imde.ac.cn

生活、城镇安全及水库运行产生严重影响。目前国内有关水库消落带的研究主要集中在消落带土地利用模式、消落带功能、消落带管理等方面^[4-7],而对消落带土壤侵蚀问题缺乏系统深入的认识。本文根据三峡水库2008年初期运行蓄水位156 m和2009年试运行蓄水位175 m形成消落带的调查研究,对三峡水库消落带土壤侵蚀现状进行了分析。

1 三峡水库消落带概况

按照三峡水库运行方案,将在每年汛期(6—9月),长江上游来沙量最大之前,将水库水位降至最低的145 m,并开闸放水排沙,而在汛期后开始蓄水,将水位升至最高的175 m,以拦蓄清水发挥水库效益。三峡水库达到正常蓄水位之后,从三斗坪到江津县,将形成全长5 578 km(包括各支流岸带),面积349 km²的消落带,涉及重庆市、湖北省的26个区县,淹没城市2座、县城11座、集镇116个。消落带地处大巴山褶皱平行岭谷地带,山地占74%,丘陵占21%,河谷平坝占5%。主要为长江干支流河谷岸坡以及冲积平坝、阶地和河滩等,局部地段为峡谷。地形以坡地为主,消落带地表坡度15°以上的区域面积占整个消落带总面积的54.2%^[8]。

2 消落带土壤侵蚀影响因素

消落带土壤侵蚀产生的原因复杂多样,内因主要有岸坡形态、物质组成、地质构造等区域自然条件因素,外因主要有降雨、水位涨落、波浪、重力和人类活动等因素。尤其是库水涨落、水文地质条件的改变一方面导致岩土抗剪强度的降低,而且还会引起岩土自重及动、静水压力的变化,加上库区风成浪和船行波形成的涌浪对库岸不间断的冲刷淘蚀,使岸坡失稳,引发库岸土体崩塌、滑坡等重力侵蚀;另一方面长期淹水引起消落带地表植被大面积消亡,成陆初期降雨及径流直接作用于裸露土壤,诱发土壤侵蚀。

2.1 气候特征

消落带具有河谷气候的特点,是库区年热量条件最好的区域。在成陆期间,消落带具有典型的亚热带气候特征:光照强,热量多,雨水足。据观测资料统计^[8],5—10月期间,消落带能接受到阳光照射的日照时数超过700 h,太阳辐射量在 2×10^5 J/cm²以上。降水量超过700 mm,占年均降雨量的70%,且多暴雨,一日降雨量可达200~250 mm,成陆期间的日均温在18~30℃之间,活动积温可达2 200~3 500℃,光热水资源量占全年总量的60%以上。消

落带成陆以后,在暴雨和高温的作用下,岩土体含水量发生饱和—一饱和—一饱和的快速变化,其内部应力及理化特性发生明显改变,凝聚力和抗剪力大幅度下降,加之地表植被因为周期性淹没被反复破坏,生态功能大幅度下降,成陆初期不易恢复,更容易遭受降雨溅蚀和径流冲刷。

此外,水库蓄水后,降雨对滑坡等重力侵蚀的作用也将明显增加^[13]。在天然状态下,降雨大多通过地表径流而排入江中,渗入消落带坡体内的雨水相对较少。随着库水位升降过程导致消落带坡体产生变形和裂缝后,降雨沿裂缝的入渗量明显增强,一方面在坡体内形成了较高的孔隙水动、静水压力,增加了坡体的下滑力;另一方面降低了滑带及滑体的力学强度,从而加剧了滑体的变形。

2.2 地形地貌

对水蚀来说地形的高低和侵蚀基准的高差是其必要条件,而地形地貌在重力侵蚀发生临界条件中也是最为重要的因素之一^[9-10]。长江三峡库区处于中国三大地貌阶梯的第二阶梯东缘,奉节以东地区以中山、低山和峡谷为主,岸坡坡度一般较陡,局部近直立,河谷地区断续分布残留阶地;奉节以西地区属川东山地,以低山丘陵和谷地为主,河谷比较开阔,沿江断续分布有5~6级阶地。此外,三峡库区层状地貌明显,地质灾害频繁,库岸沿线崩滑体和塌岸分布广、密度大,大多数处于不稳定状态^[3]。坡度直接影响径流冲刷和波浪淘蚀的能力,消落带地形坡度以15°以上坡度为主,其次为7°~15°^[8,11],致使消落带存在土壤侵蚀的潜在危险。

2.3 土壤因素

地表组成物质是侵蚀的对象,其性状直接影响水土流失的强弱。消落带基岩类型主要为紫色岩、碳酸盐岩和石炭系等地层的泥盆^[11]。紫色岩岩性松软,透水性强,岩石风化快,在高温多雨、周期性干湿交替以及库水侵蚀作用下,加速其风化过程,从而扩大了岩石风化的厚度,促进岩石分解,稳定性进一步降低,岸坡易形成崩塌和滑坡;碳酸盐岩对侵蚀的承载力很低,在坡度稍大的消落带,在水动力条件下具有崩塌和滑坡隐患,同时此类岩石风化成土过程较慢,原有土壤流失后,常导致消落带石质化和砾石化。

消落带土壤类型和分布受到母岩的控制,分布相对集中^[12];河流阶地、丘陵谷地和盆地土壤以冲积土、紫色土和水稻土为主;山地土壤主要是石灰土和以砂泥岩为母质的砂砾石,天然河漫滩上主要分布砾石裸地和沙滩。石灰土一般质地黏重,透水性差,易产生地表径流;而在紫色砂泥岩地区发育的紫色土结

构水稳性很差,遇水极易分散、崩解,为易蚀性土壤,且土层浅薄,耕作层以下即为母岩层,土壤容蓄水量少,径流系数高,当地面植被破坏后土壤侵蚀强烈。

2.4 水库水位涨落

三峡水库根据拟定的“蓄清排浊”的运行方案,水库水位将在 145~175 m 之间进行周期性的涨落,水库水位变化使消落带坡体内的地下水位发生升降变化,产生静水压力和动水压力,增加消落带土体荷载,湿化、软化消落带土体,容易发生崩塌、滑坡等重力侵蚀。此外,由于库水周期性反复升降,使消落带生境发生质变,原有陆地生态系统消失,短时间内难以恢复,岩土体直接出露地表,而水库消落带的成陆期与库区夏半年的光热雨资源集中期基本同步,使其更易遭受降雨侵蚀和径流冲刷的危害。

一般来讲,水库水位涨落对消落带土壤侵蚀的影响主要表现在库水上升和库水骤降两个过程。库水上升对消落带土体的影响主要表现在库水的浸泡常常导致消落带岩土体软化、泥化,抗剪强度降低,与基岩间的摩擦阻力大大减小,比如含有亲水性很强的页岩、黏土岩和含有有机质的黏土等构成的坡体的这种变化最显著^[13],被浸没的松散土体容易被波浪和流水淘蚀,并且从消落带底部开始渐渐坍塌,更有甚者使岩土体在浸泡的风化黏土层之上发生蠕动或滑移。库水位骤降对消落带土体的影响主要表现为渗透稳定性和力学作用的影响。国内外对退水塌岸现象的研究和报道很多^[14-17]。蓄水时库岸土体含水量达到饱和,库水位的下降使消落带岩土体减荷,特别容易发生崩落。库水水位的突然降低,使消落带坡体内地下水水位短期内高于库水位,一方面导致消落带地下水渗出或形成碎屑流,带走土体中的微细颗粒,产生潜蚀作用,将使本来就较松散的土体形成较大空隙,从而使土体下沉陷落;另一方面地下水富集地段的岸坡,由于水位的突然下降,一部分地下水排出,库岸所受到的浮托力突然减小,则可能激发很高的超孔隙水压力,使土体抗剪强度急剧降低而导致拉裂及小规模崩塌。

2.5 船行波及风浪

消落带区域土壤侵蚀的主要原因是轮船、风以及其他因素造成的水面涌浪对岸坡的侵蚀^[18]。波浪对库岸的破坏作用包括以下几方面:(1)波浪拍击岸坡,使岸坡岩土体松动,甚至被波浪卷走;(2)波浪淘刷岩土体中的土粒,使岸坡岩土体松动失稳;(3)涌浪作用将水灌入岩土体缝隙内,当波浪退却后滞留水在岩土体底部起顶托作用,使岩土体松动滑落,同时灌入缝隙内的水浸泡岩土体,降低边坡稳定性。

三峡水库形成后,水边线向外推移,水体范围扩大,江面风速也随之增大,二三级风即可产生较大的波浪。根据野外对库区波浪的观测资料^[19],三峡水库在日均风速为 1~3 m/s 情况下,长江干流一般波浪可以达到 2~5 cm,在有船通过时,波浪急剧增大,最大浪高可以达到 48 cm。

2.6 人类活动

部分消落带在成库前是肥沃的耕地和园地,在光、温、水、气条件较好的夏秋两季,具有潜在的利用价值,而消落带内原有的缓坡瘠薄土地,也会因成库后的泥沙淤积而提高其利用价值。受利益驱动,人们会自发地无序开垦和不合理利用消落带土地,导致水土、养分等的流失,这将会严重地破坏消落带的生态环境,对三峡水库的水质、泥沙淤积、库岸防护产生重大影响;另一方面,长江三峡河段是重要的交通航道,三峡工程建成后航运量还会显著增加,每天数百艘过往的船只形成大小不等的涌浪冲击、淘刷岸坡。

3 三峡水库消落带土壤侵蚀分布及类型

3.1 消落带土壤侵蚀分布特点

三峡水库干流消落带土壤侵蚀严重,土壤侵蚀面积分布较大,而库湾消落带受波浪影响较小,土壤侵蚀程度较轻,分布面积少。根据 2008 年三峡水库 156 m 水位运行周期内消落带土壤侵蚀监测数据显示^[19],干流消落带土壤侵蚀强度为 71 mm/a,而库湾土壤侵蚀强度仅为 11 mm/a,干流消落带土壤侵蚀深度是库湾的 7 倍。

消落带土壤侵蚀程度受水位停留时间的影响,在低水位线(145~150 m)附近土壤侵蚀最为强烈。

>5°的消落带土质岸坡土壤侵蚀强烈,分布面积较广,而在平坝或台阶地上,土壤侵蚀一般只发生在田坎、陡坎部位。

居民点附近的消落带人类活动频繁,退水后多被农民自发利用种植旱农或经济作物,水土保持耕作措施未跟上,植被反复破坏,加剧了土壤侵蚀的发生。远离村庄的远山区植被受人为破坏比较少,一般退水后自然恢复的草本植物覆盖较好,土壤侵蚀相对较轻。

3.2 消落带土壤侵蚀类型

按照产生的力学机理及侵蚀程度,消落带土壤侵蚀可归纳为水力侵蚀和重力侵蚀两种类型,其中水力侵蚀主要形式为波浪侵蚀和降雨侵蚀,重力侵蚀主要形式为崩塌和滑坡,而波浪侵蚀和崩塌是消落带土壤侵蚀最突出的问题。

3.2.1 波浪侵蚀 波浪侵蚀包括浪蚀作用、波浪及岸边流的搬运作用,它造成的一次性破坏规模较小,

但作用的时空分布广,且可以为岸坡后退提供必须的临空条件^[20]。对于由黏性土、砂性土覆盖的岸坡,波浪的影响将是不可忽视的,其作用方式和侵蚀量与波浪的作用方向和强度有很大关系。当较强波浪的作用方向与坡向垂直或接近垂直时,土层往往被成层剥蚀而产生层蚀。舔蚀则因微风形成的轻波浪作用而产生,冲刷掉的泥沙被逐级向下运移(图1)。虽然轻波浪的作用力小,每个浪舌带下的泥沙不多,但因其作用频率高,作用面广,并随水面涨落不断侵蚀消落带坡面,故舔蚀的总侵蚀强度很大,是波浪侵蚀最主要的作用方式。当较强风浪的作用方向与坡向斜交时则产生淘蚀,且极易形成浪蚀洞。在风浪不断冲击



下,浪蚀洞不断扩大并坍塌,坍塌物随之被碎浪的回流带入库中;在土质疏松岸段,侵蚀速度很快,整个过程往往可在一个波浪中完成,侵蚀量可达几十公斤^[21]。波浪侵蚀贯穿三峡水库整个水位涨落周期,在不同水位的水陆交界面广泛分布。在水位线附近坡面均有程度不等的波浪侵蚀发生,尤其发生在土质消落带的陡坡($25^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 地段)、滩坡($15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的缓坡地段)和平缓旱地($<15^{\circ}$ 地段)的坡面上。此外,在有上覆薄土层的峭壁($>75^{\circ}$ 的陡崖地段)消落带,上覆薄土层很快被涌浪剥蚀掉,此后波浪侵蚀作用趋于减小。而在平坝或台阶地(水田、旱田、或台地),波浪侵蚀仅发生在田坎部位。

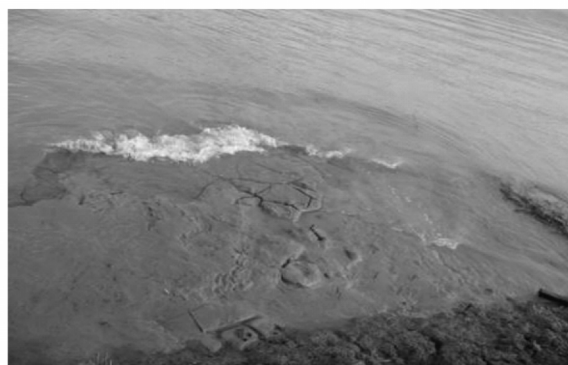


图1 波浪形成及浪蚀岸坡

3.2.2 降雨侵蚀 三峡水库是年调节水库,消落带土地露出水面的时间(≥ 170 m)最长 270 d 以上,最短(≥ 170 m)也在 115 d 左右。消落带出露时间正处于水热资源丰富的夏秋季节,由于三峡库区消落带地势陡峭和水库调蓄运行及自然条件等原因,水库边缘植被往往容易遭受破坏,植被的消失使土壤有机质迅速分解而缺乏补给,良好的土壤结构即遭破坏,抗蚀性能减弱,在降雨和坡面水流作用下,极易发生土壤侵蚀^[22]。坡面流主要由降雨产生,往往同时以层流和股流形式侵蚀坡面,形成大小不等的冲沟(图2),其侵蚀强度与降雨强度、坡角、坡面土质结构等有密切关系^[21]。此外,库水位周期性涨落也会在消落带岸坡形成坡面水流,从而导致消落冲刷和充水冲刷,即土质坡面或土石坡面当水位降落时会发生溯源侵蚀,土壤颗粒向下转移,并在一定范围沉积,使局部侵蚀基准升高;当水位上升时,坡面受到水的浸泡,土壤内摩擦角减小,抗蚀性降低,被冲刷剥离。

降雨径流侵蚀主要发生在消落带成陆初期,此时正处于水热资源丰富的夏秋季节,消落带植被由于淹水消亡而不能及时恢复,加之涌浪侵蚀对土壤结构的破坏,在降雨和坡面径流的作用下,极易发生土壤侵蚀,但随着消落带自然植被的逐渐恢复,地表覆被增加,降雨径流侵蚀的作用越来越弱。



图2 消落带成陆期坡面水流侵蚀

3.2.3 崩塌 消落带岸坡持续高水位,岸坡岩土体含水量因浸泡饱和,使容重加大、抗剪强度降低而引起土体软化、崩解以至坍滑;又因水面展宽后,风浪增大,在波浪和水流的侵蚀、冲击和淘刷作用下,岸坡在水位变动区内由表及里出现渐变的破坏。下部土体被淘空,岸坡变陡,甚至形成反坡、空穴或浪蚀龛,岸坡上部岩土体失去支撑,出现拉裂式崩落或滑移式坍塌^[23]。塌滑物经水流搬运、分选后形成浅滩。在水和波浪的不断作用下,库岸破坏继续发生,岸线不断后移,浅滩逐渐增大,直到水上岸壁与水下浅滩达到相对平衡时,库岸才趋于稳定。它的显著特点是垂直位移大于水平位移,并与土体的自重直接相关,其分布范围大,涉及岸线长。发生塌岸的库岸按其岩土物

质组成的不同可分为土质库岸和岩质库岸两大类。土质库岸因土体强度、抗冲刷能力等较之岩质库岸相对较小,其崩塌规模一般比岩质库岸崩塌规模大,在土质库岸中发现的崩塌类型也较岩质库岸多。

崩塌主要发生在三峡水库退水期,蓄水时库岸土体含水量达到饱和,而库水位骤降将引发土壤水的剧烈变化,使消落带岩土体减荷,特别容易发生崩落。根据 2010 年度三峡库区汛期地质灾害防治工作会议提供数据,自三峡工程 175 m 试验性蓄水以来,受每年周期性的 30 m 水位升降和移民迁建等工程活动影响,库区老滑坡复活几率增加,新生突发地质灾害增多。库区共发生形变或地质灾害灾(险)情 132 起,塌岸 97 段长约 3.3 km,紧急转移群众近 2 000 人。在二三期地质灾害防治规划范围外已发生新生突发性灾(险)情 30 多处。

按照土质库岸发生塌岸的变形破坏特征,可将库岸崩塌类型概括为坍塌后退型、冲刷浪坎型和塌陷型 3 种主要类型^[24]。

(1)冲刷浪坎型。在水流冲刷、浪蚀等作用下,小范围的岸坡土体自水边处产生较小的破坏,随着水位及波浪的下移又会对下级水边土体产生类似的破坏,最终表现为阶梯斜坡状(图 3)。此类型崩塌主要发生在前缘坡度较陡的以粉细砂、细砂、砂质黏土为主的土质库岸。



图 3 冲刷浪坎型崩塌

(2)坍塌后退型。在水流冲刷、侧蚀作用下,坡脚先掏蚀成凹槽状,并在岸坡重力、地下水外渗及自身组成的裂缝等结构面的组合作用下,发生条带状或窝状的座落、倾倒型的垂直移动。此种类型后退速率快、后退幅度大、分布岸线长、持续时间长(图 4)。此类型崩塌一般发生在坡度较陡的土质岸坡以及上硬下软结构的岸坡。

(3)塌陷型。在自重力和地下水静、动水压的作用下,岸坡土体因下伏空洞或局部凹陷而引起周围土体由四周向中心塌陷的一种破坏形式,这种形式在长江中下游干流河段出现的几率很小,一般在灰岩存在的河段有分布。



图 4 坍塌后退型崩塌

3.2.4 滑坡 库水位上升后,古滑坡地下水的水位也随之上升,从而增加了对古滑坡的浮托作用,降低了其抗滑力。再者,由于地下水和库水的长期浸泡,滑带土被软化、泥化,滑带也由非饱和状态变为饱和状态,基质吸力丧失,抗剪强度大大降低,水库蓄水后,由于水位抬升和长期浸泡,滑移面受水的浸润,引起滑动面或软弱结构面的力学性质弱化,岩土抗剪强度降低,库水位骤然下降产生的超孔隙水压力又增加了滑坡的重量。岩土自重及动、静水压力的周期性变化,可能引起滑坡体复活启动,同时已变形的滑坡持续(加速)变形^[25-26],或使岸坡沿滑动面或软弱结构面新生失稳滑移^[27]。另外,紫色泥岩和页岩形成的软岩斜坡稳定性本来就差,库水浸泡会使泥岩、页岩的稳定性进一步降低^[3,28],将加剧滑坡的产生。此外,水库风浪和船行波的冲蚀对消落带产生的冲蚀作用,改变了消落带的形态,加快了滑坡的渐进破坏,也能诱发古滑坡的复活。而整体滑移一般发生在土质岸坡、滑坡堆积体岸坡以及基岩面上的松散覆盖层部位。滑坡的错落过程在重庆市万州区古滑坡前缘表现得特别明显,如四方牌 276 号滑坡前缘已有 5 级错落,相对错落的垂直距离为几厘米到几十厘米不等,厚度 30~50 cm;发生在秭归树坪上的古滑坡已基本稳定数百年,在三峡水库蓄水之后,又整体向下滑移了几米^[12]。但需要注意的是,滑坡的形成是在漫长的地质历史进程中,地壳内外营力相互作用的结果,在短期内不会被某一单纯的因素所左右,一般需经过缓慢渐进的过程才能逐渐形成其失稳的条件,因而消落带滑坡虽然潜在发生几率大,但往往是缓慢的渐变过程,突发性滑坡较少,主要以滑坡体在水动力条件改变下的蠕滑为主,伴随滑坡体前缘的不断崩塌和后退。

4 结论

(1)水库消落带土壤侵蚀主要为波浪侵蚀和崩塌。崩塌主要发生在土质岸坡上,并与土体的自重直

接相关,其分布范围大,涉及岸线长。波浪侵蚀可分为层蚀、舔蚀和淘蚀,其区分在于波浪的大小及作用方向与坡面的关系。波浪侵蚀是消落带库岸侵蚀的主要形式,在波浪长期侵蚀作用下,容易产生崩塌,形成大小不一的崩塌岸体,且极易在水力作用下不断扩大。波浪侵蚀直接影响崩塌的发生与发展,这是水库消落带侵蚀与陆上坡地侵蚀发生机理和规模具有显著性差异的主要原因。

(2)水库消落带水土流失问题应引起充分的重视。在长期反复淹水一出露和干湿交替作用下,消落带地质、水文、植被发生改变,造成消落带土壤侵蚀异常强烈,而且侵蚀营力复杂,侵蚀方式多样,特别是波浪侵蚀发生严重。因此消波固土成为消落带植被恢复的关键。但由于三峡水库消落带面积广大,采用工程措施造价高,效果不理想。从环境保护和防治效益考虑,植被护坡方法应是最佳的治理措施。及时培育抗旱、耐淹的水陆两栖植物是三峡水库水土保持和生态建设的关键。

参考文献:

- [1] 戴方喜,许文年,陈芳清. 对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考[J]. 中国水土保持,2006(12):6-8.
- [2] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流系统健康及其评价[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1191-1194.
- [3] 谢德体,范小华,魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2007,29(1):39-48.
- [4] 徐元刚,孙锐锋,李剑,等. 水库消落区利用研究进展[J]. 人民长江,2008,39(3):102-103.
- [5] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity[J]. Ecological Applications,1993,3(2):209-212.
- [6] Seth Wenger. A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation[D]. Georgia: Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, 1999.
- [7] 张建春. 河岸带功能及管理[J]. 水土保持学报,2001,15(6):143-146.
- [8] 刁承泰,黄京鸿. 三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(1):75-80.
- [9] 薛海,王文成,何沛华. 黄河中游地区重力侵蚀影响因素分析[J]. 人民黄河,2008,30(5):60-62.
- [10] 张淑光,李一平,程永东. 广东省黄江水库库区土壤侵蚀与治理[J]. 泥沙研究,2002(5):67-71.
- [11] 王祥荣. 长江三峡库区(重庆段)消落带景观生态研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [12] 周彬,朱晓强,杨达源. 长江三峡水库库岸消落带地质灾害防治研究[J]. 中国水土保持,2007(11):43-45.
- [13] 莫伟伟,徐平,丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(6):997-1002.
- [14] Poulos H G. Difficulties in prediction of horizontal deformation of foundation[J]. J. of the Soil Mechanics & Foundation Division, 1972, 98(8):253-259.
- [15] Louis C. Rock hydraulics in rock mechanics [M]. New York: Ver-laywien New York, 1974.
- [16] 陈立松,何沛云. 水库周边水位变动引起库岸失稳的成因分析[J]. 浙江水利科技,2004(4):40-41,43.
- [17] 袁中友,唐晓春. 蓄水和水位变动对三峡库区崩塌滑坡的影响及对策[J]. 热带地理,2003,23(1):124-128.
- [18] 裴得道,许文年,郑江英,等. 植被混凝土抗侵蚀性能研究[J]. 灾害与防治工程,2008(2):1-4.
- [19] 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2009.
- [20] 蔡耀军,郭麒麟,余永志. 水库诱发岸坡失稳的机理及其预测[J]. 湖北地矿,2002,16(4):4-8.
- [21] 陈天富,林建平,冯炎基. 新丰江水库消涨带岸坡侵蚀研究[J]. 热带地理,2002,22(2):166-170.
- [22] 刘云峰. 三峡水库库岸生态环境治理对策初探[J]. 重庆工学院学报,2005,19(11):79-82.
- [23] 何良德,方国庆. 库岸再造机理及其影响因素分析研究[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(1):16-20.
- [24] 刘红星,夏金梧,王小波,等. 长江中下游岸坡变形破坏的主要形式及处理[J]. 人民长江,2002,33(6):8-10.
- [25] 张奇华,丁秀丽,张杰,等. 三峡库区奉节河段库岸蓄水再造研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(7):1007-1012.
- [26] 苏维词,杨华,罗有贤,等. 三峡库区涨落带的主要生态环境问题及其防治措施[J]. 水土保持研究,2003,10(4):196-198.
- [27] 黄振伟,李云安,黄胜华. 南水北调中线水源工程丹江口水库坍岸问题浅析[J]. 地质科技情报,2005,24(增刊):156-158.
- [28] 汤明高,许强,黄润秋. 三峡库区典型塌岸模式研究[J]. 工程地质学报,2006,14(2):172-177.