

深圳市水库消涨带水土生态修复技术体系研究

党晨席¹, 郭睿¹, 宋维念¹, 刘静¹, 郑佳丽²

(1. 深圳市水务规划设计院 水土保持设计所, 广东 深圳 518036; 2. 深圳市水土保持办公室, 广东 深圳 518036)

摘要:消涨带问题是国际上普遍关注的生态难题, 水库消涨带所造成的库岸水土流失、面源污染等问题, 对水库安全运行及水质危害明显。对深圳地区水库消涨带现状及生态特点进行分析, 认为恶劣的库岸土壤环境和稀缺的两栖植物品种, 是导致修复困难的核心因素。从水库消涨带可修复范围论证、水库消涨带类型划分着手, 针对水库实际运行高水位和低水位及上下各 2 m 高差范围提出了消涨带水土生态修复技术体系, 并提出了“6 类整地+6 种两栖植物群落”的修复模式, 采用工程辅助措施营造岸坡植被生长的土壤环境, 选择适生两栖植物进行造林复绿, 以实现库岸造林的高成活率和植被的高覆盖度。该修复模式在深圳地区尚属首例, 可为深圳及南方红壤地区水库消涨带水土生态修复提供参考。

关键词:水库消涨带; 可修复范围; 消涨带类型; 岸坡土壤环境; 两栖植物; 修复措施体系

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)01-0324-05

Study on the Ecological Restoration Technology of Soil and Water in the Drawdown Zone of Reservoir in Shenzhen

DANG Chenxi¹, GUO Rui¹, SONG Weinian¹, LIU Jin¹, ZHENG Jiali²

(1. Department of Soil and Water Conservation, Shenzhen Institute of Water Resource Planning, Shenzhen, Guangdong 518036, China; 2. Office of Soil and Water Conservation in Shenzhen City, Shenzhen, Guangdong 518036, China)

Abstract: Ecological issues on the drawdown zone of reservoir have widely gained attentions. Soil erosion on reservoir bank and non-point source pollution caused by the drawdown zone has threatened the reservoir operation and drinking water safety. The actuality and feature of the drawdown zone of reservoir in Shenzhen were analyzed in this study. The results showed that the vulnerable ecosystem and losing of amphiphyte were the key issues on drawdown zone repair. The ecological restoration technology of soil and water was proposed, which aimed at the area between the actual running level and the low level of reservoirs and the upper and lower 2 meters high tolerance range. And the ‘6 kinds of soil remediation system+6 amphibious plant community’ restoration scheme was proposed too, which devoted to repairing soil environment on bank slope by engineering measures, and selected suitable amphibious plant which have high afforestation survival rate and high vegetation coverage in the extreme environments. This study is expected to provide theoretical basis for ecological restoration on the drawdown zone of reservoir in red soil region of south China.

Keywords: drawdown zone of reservoir; recoverable area; type of the drawdown zone; soil environment of bank slope; amphiphyte; ecological restoration technology

由于水位的自然涨落或水库运行调蓄的影响, 在江河湖库的水面附近坡面形成了涨水水位与落水水位间的落差带, 带间水土生态环境恶劣, 这便是我们常说的消涨带。水库消涨带因在水浪冲刷、淹没作用下, 造成库岸淘蚀、塌方、库容淤塞等土壤侵蚀危害, 危及水库运行的安全, 降低水库的蓄水寿命; 同时, 该区域立地条件恶劣, 土壤、植被、动物等生态系统缺失。因此, 营造水库消涨带水土生态环境, 对增加库

区生物量、减少水库淤积、延长水库寿命、保障饮用水安全、维护库区水土生态安全具有重要的现实意义。

消涨带属典型的水陆生态过渡带, 消涨带及其植被作为流域生态系统的重要组成部分, 自 20 世纪 60 年代中期, 国外即对其开展研究, 并成为流域生态学各专业研究的焦点^[1]。根据学者研究重点不同, 有河岸带、湖岸带、消落区、消落带、水位涨落带、涨落带等不同称谓。近年来, 国际上关于水陆交错带的研究十

分活跃,消涨带湿地已成为美国自然经营和管理中不可缺少的部分^[2]。国内消涨带的研究起步较晚,自20世纪90年代初,在水库消涨带生态修复方面仅为一些小面积试点,且大部分为筛选水陆两栖植物为研究重点。其中,黄川等三峡课题组,针对三峡水库两岸存在的高差30 m、面积达350 km²的消涨裸露带问题,对两栖植物的适生性开展了研究^[3]。林建平等在广东省新丰江水库开展铺地黍(*Panicum repens*)在库岸消涨带植被护坡的试验、研究工作^[4]。莫熙穆等在广东局部地区发现榕属的一种(当地称之为水榕)能忍耐长期洪涝和干旱^[5]。当前,系统论证消涨带范围、分类及提出措施体系的研究在国内较少。笔者从分析水库消涨带类型及立地现状着手,通过两栖植物适生性分析,论证消涨带水土生态可修复范围,进而提出针对性的修复措施体系;并期望通过后续效益分析与观测,得出几种适用于深圳地区乃至南方红壤地区水库消涨带水土生态修复的成功模式进行推广。

1 研究区概况

根据《深圳市30座饮用水库水源保护林建设方案》的调查结果,全市饮用水库消涨带面积达9.20 km²,绝大部分裸露,无植被覆盖,少部分存在崩塌,基本无植被覆盖,水库消涨带问题现已经成为深圳各大水库最重要的生态问题之一,也是摆在我们面前的一道亟待解决的难题。

深圳地区水库消涨带范围主要土壤类型为砂页岩赤红壤和侵蚀赤红壤,土壤层多被剥蚀,养分淋失严重,抗侵蚀能力弱,易引发库岸崩塌、碎落等水土流失危害。各水库消涨带水土生态具有以下四大特点:(1)大部分水库水位消减频次多,水淹早晒交替出现,消涨带范围立地条件差,一般植物难以生存;(2)相对于河流漫滩或湖泊滩涂,水库岸坡不仅消涨带落差大,而且绝大部分坡度较陡(通常12°~60°或以上),土壤养分淋失严重,土壤侵蚀强度很大;(3)瘠薄而极端的环境,造成消落带范围基本裸露,最高水位以上1~3 m范围基本无乔木,只分布有一些灌木植被;(4)消涨带生态群落的稳定性和多样性指数,与消涨带坡度因子具有明显的正相关性。

2 研究内容及方法

2.1 理论基础及方法

水土生态修复是具有普遍意义的生态修复的一种类型;生态系统是由生物群落和物理环境两大部分所组成;生物群落是生态系统的主体,而水土资源则是物理环境中不可缺少的要素,保持住水土资源,就

能拉长生物链,保持生物物种的多样性,从而增加生态系统的稳定性。生物群落与水土保持的互为促进,能够形成生态系统的良性循环^[6]。因此,维护和修复水土生态系统是保护生态系统的根本^[7]。

消涨带作为水库水源保护区最后一道生态防线,需要其发挥稳定库岸、防治水土流失、减少水库淤积、防止面源污染、修复水库水陆交错带生态、修复消涨带景观等生态功能^[8]。消涨带水土生态的修复与水库运行水位频变、立地现状类型、适生树种选择、岸坡土壤环境四方面具有着密切的联系。经对深圳地区水库消涨带现状及生态特点的分析,笔者认为“恶劣的库岸土壤环境”和“稀缺的两栖植物品种”,是导致修复困难的核心因素。因此,水库消涨带区域,应通过人工辅助措施,为该区域植被重建营造适宜的生长环境,实现该区域植被的恢复、生物多样性的重建及水土流失的控制目标。

2.2 研究内容

围绕上述目标,本文拟开展以下研究:(1)消涨带范围论证;(2)消涨带类型划分;(3)适生水陆两栖植物选择;(4)营造适生的土壤立地环境。

3 结果与分析

3.1 水库消涨带范围论证

水库消涨带范围与水库功能及运行情况密切相关,不同区域、不同类型、不同运行方式的水库,其消涨带范围截然不同。

(1)理论范围:根据水库消涨带的定义,理论上不论何种功能的水库,其消涨带理论范围应为正常蓄水位与设计死水位区间。

(2)实际范围:根据水库消涨带的形成特点,其实际为水库运行期,保持较长时间的运行高水位与运行低水位间的岸带。根据水库类型不同,其主要特点见表1。

(3)可修复范围:由于消涨带立地条件恶劣、生境极端,即使是水陆两栖类植物也很难在完全淹没的生境下成活,若对所有消涨带范围进行造林复绿,势必工程实施难度大、成效差、易造成投资浪费。因此,结合以往深圳地区水库消涨带整治的经验,笔者认为水库消涨带的可修复范围确定为:“较长时间裸露在水面以上,明显造成库岸水土流失、景观影响度大的消涨区,常水位以下4 m落差、以上2 m落差范围”。

3.2 水库消涨带类型划分

通过对深圳地区各水库消涨带立地现状的调查了解,以坡度(25°)为分界,对水库消涨带进行分级分类,见表2。

表 1 水库分类及消涨带特性

编号	水库类型	消涨带范围	主要特点
1	雨源补给型调蓄水库	季节性蓄水高水位与低水位间,一般水位在正常蓄水位及以下 6~8 m 范围	水位消落变化频次小,落差范围小,消涨带水土环境、植被环境较好
2	雨源、引水补给型调蓄水库	季节性雨量补给和水库供水补给造成的运行高水位与低水位间,一般水位在正常蓄水位及以下 8~12 m 范围。	水位消落变化频次大,落差范围大,水位变化受供水调蓄运行影响很大。消涨带整治难度大

表 2 水库消涨带坡度分级统计

编号	消涨带分类	立地条件	侵蚀强度级别	土壤侵蚀情况
1	<25°岸坡 (缓坡消涨带)	坡度适合植物直接生长,根系深入土壤后,可自然生长	一般级	土壤表层有较少裸露,下层保持完整
2	>25°岸坡 (陡坡消涨带)	坡度陡、植物根系土壤易流失,根系受到侵蚀,必要时需辅助采用一些工程措施	严重级	土壤表层无保留,下层开始裸露、受侵蚀
3	>45°岸坡 崩塌消涨带	坡度较陡,库岸一般易造成水浪冲刷和侵蚀,必须采用人工岸坡修整或利用工程辅助措施,才能保证植物正常生长	严重级	表层无保留,母质层出露,受到侵蚀
4	滩涂消涨带	坡度缓,面积大,适合采用人工生物湿地过滤上游污染颗粒	无明显侵蚀	土壤剖面保持完整

3.3 适地适树

水库消涨带造林适地适树遵循的主要原则为:

(1) 耐淹性强的原则:植物耐淹性是决定消涨带造林的首要因素,消涨带自下而上选择树种的耐淹性应以由强至弱为原则。

(2) 抗旱性强的原则:消涨带水位回落后,岸坡土壤极其瘠薄,裸露期土壤环境干旱、贫瘠,植物的抗旱性能对造林成活率影响较大。因此,消涨带自上而下选择树种的抗旱性应以由强至弱为原则。

(3) 苗木规格和生长量符合水位频变、淹旱立地要求的原则:根据水库水位月变化记录情况,确定一年当中主要的水位作为岸坡造林两栖乔木与草本的分界高程。上坡位种植两栖乔木,下坡位种植耐淹草本。

根据上述消涨带造林树种选择原则,本次拟定选

择 11 种乔木、4 种灌木、3 种草本作为主要造林树种,共计 18 种。选用树种均为南亚热带本地及适生树种,普遍表现有一定的两栖特性,在深圳均有分布。

3.4 消涨带修复技术及适应性分析

本文以深圳市三洲田水库为例,采用“生物措施+工程措施”并举的模式,针对 4 类消涨带及其坡度,进行修复技术研究。2013 年 4 月,三洲田水库消涨带修复试验段工程开工,目前已完成各类整地及造林施工,后期将重点开展整地保土效果观测、两栖植物长势观测、水土流失监测及景观效果评价等工作。

工程措施包括 6 种消涨带整地方式,为岸坡植被生长营造持续、稳定的土壤环境;植物措施包括 6 种植物群落模式,分别应用于不同类型、不同坡度的消涨带范围,实现各类水库消涨带水土生态修复,营造长效、稳定的岸坡植被生态系统,见表 3。

表 3 消涨带造林不同群落结构

编号	消涨带类型	工程措施	植物措施
1	缓坡消涨带	挖穴整地	铺地黍(岸脚带)—水榕(下坡位)+落羽杉(中坡位)+澳洲白千层(中上位)+黄槿(上坡位)—香根草+毛杜鹃(岸头带)
2	缓坡消涨带	水平阶整地	铺地黍(岸脚带)—水翁(下坡位)+水榕(中坡位)+池杉(中上位)+竹节树(上坡位)—芦苇+岗松(岸头带)
3	陡坡消涨带	木排桩整地	铺地黍(岸脚带)—水翁(下坡位)+水松(中坡位)+落羽杉(中上位)+细叶白千层(上坡位)—芦苇+岗松(岸头带)
4	陡坡消涨带	自锁预制块整地	铺地黍(岸脚带)—水榕(下坡位)+水翁(中坡位)+池杉(中上位)+澳洲白千层(上坡位)—香根草+毛杜鹃(岸头带)
5	崩塌消涨带	生态袋整地	铺地黍(岸脚带)—水榕(下坡位)+落羽杉(中坡位)+水翁(中上位)+池杉(上坡位)—芦苇+岗松(岸头带)
6	库湾消涨带	生态型溢流堰	水翁+水榕+落羽杉—梔子+勒仔树—水葱+铺地黍+芦苇等

(1) 缓坡消涨带(坡度 $\leq 15^\circ$)修复:该区域地形坡度较缓,且地形较为完整,坡面土壤受水库水位涨落冲刷侵蚀相对较小,但土壤养分依然淋失较为严重。因此,通过人工挖穴整地后,可为岸坡造林提供较为理想的生长环境。采用“挖穴整地+两栖植物造林”模式。

(2) 缓坡消涨带($15^\circ \leq \text{坡度} \leq 25^\circ$)修复:采用“水平阶整地+土工格栅+两栖植物造林”模式。该类消涨带区域地形坡度适宜直接造林绿化,但是受水位涨落冲刷强度较大,坡面土壤及养分易流失,因此,沿等高线进行采用水平阶整地后,岸坡形成种植平台,水平阶位外高内低的反坡微地形,台阶内挖穴种植两栖植物及种植两栖草种和岸顶灌木隔离带,从而形成此类岸坡多群落、多结构的植被生态系统。

(3) 陡坡消涨带($25^\circ \leq \text{坡度} \leq 35^\circ$)修复:该类岸坡坡度较陡,水位频变对岸坡地表的侵蚀强度大,养分难以原地留存,一般坡面直接复绿难度极大。因此,必须采用工程措施辅助形成岸坡植被生长的土壤环境。采用“木排桩整地+两栖植物造林”模式。沿等高线排状打入仿木桩,形成挡土坎,为上坡位消涨区造林形成植物正常生长的环境。

(4) 陡坡消涨带($35^\circ \leq \text{坡度} \leq 45^\circ$)修复:此类消涨带属于坡度较陡的岸坡,坡面虽然平整,但植被受水位涨落冲刷极为严重。采用“自锁砌块整地+两栖植物造林”模式。为保证较陡消涨带岸坡稳定,防止水浪冲刷库岸,岸坡采用自锁砌块护岸。自锁砌块体为渗透性良好的生态混凝土材料,互相咬合,同时可过水、防冲刷,有效防止岸坡土体流失入库。此技术工程造价较高,针对深圳地区少量分布的陡坡消涨带,可进行推广应用。

(5) 崩塌消涨带(坡度 $\geq 45^\circ$)修复:根据深圳地区各主要水库库岸崩塌区还是分布较多,一般塌落宽度10~15 m,深度3~4 m,主要发生在岸坡坡度在 45° 以上区域,而且通常是水面上下库岸联体崩塌。采用“生态袋整地+两栖植物造林”模式。消涨带常水位以下崩塌区,采用生态袋护坡+两栖护岸林模式;消涨带常水位以上崩塌区,通过1:1.5削坡处理后,穴植两栖乔木,形成固岸林。

(6) 库湾消涨带修复:深圳地区各类水库库湾均分布有滩涂湿地,地形开阔,水流冲刷力小,一般在主要库湾消涨带(坡度 $\leq 5^\circ$)地带形成滩涂湿地。该区域为流域汇水入库通道,上游面源污染、泥砂等主要从此区域入库,因此,需进行拦截、过滤。采用“生态溢流堰+两栖乔木缓冲带+水生植物过滤带”修复模式。可通过在库湾出口设置生态溢流堰,在内部布置

两栖植物缓冲带、水生植物过滤带,发挥防止污染、修复水土生态的效果。

3.5 修复效益分析

水库消落带属典型的生态过渡带,通过“工程措施+生物措施”并举的技术体系,可有效实现消涨带区域植被复绿、修复水土生态系统。消落带植被具有过滤泥沙和面源污染物、保持水土、稳定库岸、保护水质和生物多样性等多种重要的生态功能,并具有一定的景观美学功能;在保障城市生态安全方面也占有重要地位;在防止水土流失、预防和减少地质灾害的发生、改善城市生态环境、提升城市形象等方面具有重要的社会经济、生态效益。

(1) 修复库岸生物多样性:缓坡、陡坡、崩塌、库湾4类消涨带区域,只要实现两栖植物的成活率,营造出稳定、长效的库岸水土生态环境,则库岸整体生态系统将逐步得到构建;同时,库岸生物、微生物数量及种类将得到明显增加,生物多样性得到保护和重建^[9]。本文选用的工程辅助措施均为生态型材料,木排桩、自锁预制块、生态袋等材料,可为消涨带岸坡植被生长提供稳定的土壤环境保障,为水陆交错带动物、微生物提供通达的生存环境和生态廊道。

(2) 保护库岸水土生态:通过人工干预措施,采取水平阶、木排桩、自锁预制块、生态袋及营造两栖植物护岸林等措施,大大削弱了水库水位频变对库岸的冲刷力,防止了库岸土壤侵蚀。消涨带植物的根系渗入土层可以增大库岸的切向力,减小块体运动,从而防止水土流失,抵御泥沙侵蚀。

(3) 防治面源污染、改善水质:采用的缓坡、陡坡、崩塌类消涨带修复技术,可发挥对岸坡水土流失的有效控制,减少库岸侵蚀造成水库的淤积;而库湾消涨带所采用的植物缓冲带、植物过滤带及生态溢流堰修复模式,是对水库主要面源污染入库通道的控制,将通过库湾沟道而入库的污染物(肥料、泥沙、杂物等)进行入库前拦截、过滤,明显降低了水库流域范围污染物的控制,保障了水库饮用水水质。

(4) 改善库岸小气候:经人工干预修复水库消涨带水土生态后,由于植被的覆盖而减弱了地表温度变化,降低了土壤温度、减少了土壤水分蒸发及库岸水体的蒸发;同时,种植的两栖植被根系深入土壤,活化土壤理化性质,丰富了库岸生物活动,可以改变局部小环境,改善库区小气候。

(5) 修复库岸景观影响度:可保证水库每年运行期间,大部分时段岸坡处于植被覆盖状态,从而明显提高了水库岸坡的景观度。

4 结论与讨论

水库消涨带水土生态的修复是一项系统复杂的研究课题,涉及到水土保持学、植物学、水利工程学、生态工程学等多门学科,若要实现大规模推广实施,需开展更加深入的研究、观测及试验。本次研究是基于对深圳地区水库消涨带的认识,因地制宜、因害设防地进行了技术体系研究,其中诸多问题(如水库运行期水位变幅规律、水生植物抗性、库岸整地可行性和整地后的抗侵蚀能力等问题)还需进一步论证。但是,笔者认为开展水库消涨带水土生态修复的根本点是明确的,即为:营造稳定的植物生长土壤环境、选择适生的两栖植物品种。因此,采用人工辅助措施整地,营造改善库岸土壤环境,选用耐淹、抗旱、生长周期长的两栖植物品种,是能否成功开展消涨带水土生态修复的关键。这就需要我们开展大量的针对不同区域、不同消涨带类型的各类工程辅助材料应用、两栖植物品种的试种研究,从而筛选出目前最为科学、生态、长效的修复技术模式。未来,伴随国家生态文明建设战略的逐步推进和大力投入,相信会有越来越多的高新生态技术方法、材料等在水库消涨带水土生态修复中得到推广应用;同时,也应借鉴国外关于此领域的先进修复技术、理念,从而最终实现水库消涨

带修复技术难题的解决,使各类水库库区消涨带的生态服务功能、生态景观功能得到完全的修复。

参考文献:

(上接第315页)

- [1] 张建春,彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. 生态学报,2003,23(1):56-63.
- [2] Whigham D F. Ecological issues related to wetland preservation, restoration, creation and assessment[J]. Science of the Total Environment,1999,240(1):31-40.
- [3] 黄川,谢红勇,龙良碧. 三峡湖岸消落带生态系统重建模式的研究[J]. 重庆教育学院学报,2003,16(3):63-66.
- [4] 方华,陈天富,林建平,等. 李氏禾的水土保持特性及其在新丰江水库消涨带的应用[J]. 热带地理,2003,23(3):214-217.
- [5] 莫熙穆,80. 榕属的一种(湖榕)能忍耐长期洪涝和干旱可能是生态两栖植物[C]//全球气候变化和生物多样性国际会议论文集. 1996:79-80.
- [6] 汪松年. 水生态修复的理论与实践(上)[J]. 上海建设科技,2006(2):20-22.
- [7] 林木隆,李向阳,杨明海. 珠江流域河流健康评价指标体系初探[J]. 人民珠江,2006,27(4):1.
- [8] 康志,杨丹菁,靖元孝. 水库库岸消涨带植被恢复研究[J]. 中国农村水利水电,2007(10):22-25.
- [9] 中国的生物多样性:现状及其保护对策[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [10] 陈碧华,杨和连,周国俊,等. 大棚菜田种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(1):213-218.
- [11] 乐乐,何腾兵,赵欢,等. 土壤环境对金银花质量影响的研究进展[J]. 贵州农业科学,2013,41(3):91-94.
- [12] 肖丹,熊康宁,兰安军,等. 贵州省绥阳县喀斯特石漠化分布与岩性相关性分析[J]. 地球与环境,2006,34(2):77-80.
- [13] 陈永超. 贵州省绥阳县小关乡金银花产业发展调查与思考[J]. 北京农业,2011(36):53-55.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,1999.
- [15] NY/T391—2000. 中华人民共和国农业行业标准[S]. 中华人民共和国农业部,2000.
- [16] GB15618—1995. 中华人民共和国国家标准. 土壤环境质量标准[S]. 国家环境保护局,国家技术监督局,1995.
- [17] WM/T2—2004 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准[S]. 中华人民共和国商务部,2005.
- [18] 刘元生,何腾兵,罗海波,等. 贵阳市乌当区耕地土壤重金属污染现状及评价[J]. 重庆环境科学,2003,25(10):42-45.
- [19] 宋春然,何锦林,谭红,等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学,2005,33(2):13-16.
- [20] 刘周莉,何兴元,陈玮,等. 镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性[J]. 生态学杂志,2009,28(8):1579-1583.
- [21] 杨玉海,蒋平安. 不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(2):110-113.
- [22] Udo Roth, Edda von Roepenack-Lahaye, Stephan Clemens. Proteome changes in *Arabidopsis thaliana* roots upon exposure to Cd^{2+} [J]. Journal of Experimental Botany,2006,57(15):4003-4013.
- [23] 毛建华. 正确认识化肥的重要作用[J]. 天津农业科学,2005,11(2):1-3.
- [24] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境,2004,13(4):656-660.