

# 4种乔木在三江并流区水库消落带生态修复中的适应性

李建兴<sup>1</sup>, 黄广杰<sup>2</sup>, 熊寿德<sup>3</sup>, 保锐琴<sup>2</sup>, 刘武江<sup>3</sup>, 段青松<sup>4</sup>

(1.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051; 2.云南农业大学资源环境学院, 云南昆明 650201; 3.云南地质工程勘察设计院有限公司, 云南昆明 650041; 4.云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201)

**摘要:** [目的] 探讨乔木在三江并流区水库消落带的生态适应性, 为该区生态修复优势造林树种的筛选提供科学依据。[方法] 选取中山杉(*Taxodium hybrid*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、竹柳(*Salix americana*)、池杉(*Taxodium ascendens*) 4种苗木在澜沧江黄登水库消落带进行小区造林试验, 观测成活率、基本生长情况, 并于移栽 2 a 后观测树冠形态结构, 树梢及枝条特征, 测取生物量。[结果] 移栽初期, 中山杉、枫杨、池杉 3 个树种随消落带淹水落干次数增加成活率下降明显。移栽 2 a 后, 4 种乔木成活率表现为: 竹柳(100%) > 池杉(48.78%) > 枫杨(40.19%) > 中山杉(32.86%) 竹柳的生长情况极显著优于其余 3 个树种。枫杨和中山杉两种植物因出现枯梢、枯枝致使树高和冠幅出现降低现象。竹柳的总生物量及各组成器官的生物量均极显著高于另外 3 个树种, 且其各组成器官占总生物量的比重较为均衡。其余 3 个树种各器官在总生物量的占比以树干为主。中山杉的叶片及枝条占总生物量的比重均最小。[结论] 4 种乔木在澜沧江黄登水库消落带的适生性依次为: 竹柳 > 池杉 > 枫杨 > 中山杉; 移栽 2 a 后, 竹柳存活率达 100%, 是三江并流区水库消落带植被恢复的优势树种, 可在该区推广应用。

**关键词:** 黄登水库消落带; 乔木; 造林; 适应性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0182-08

中图分类号: S759.9, S718.3

**文献参数:** 李建兴, 黄广杰, 熊寿德, 等. 4 种乔木在三江并流区水库消落带生态修复中的适应性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 182-189. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.035; Li Jianxing, Huang Guangjie, Xiong Shoude, et al. Adaptability of four tree species in ecological restoration of reservoir fluctuating zone in parallel flow area of three rivers [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 182-189.

## Adaptability of Four Tree Species in Ecological Restoration of Reservoir Fluctuating Zone in Parallel Flow Area of Three Rivers

Li Jianxing<sup>1</sup>, Huang Guangjie<sup>2</sup>, Xiong Shoude<sup>3</sup>, Bao Ruiqin<sup>2</sup>, Liu Wujiang<sup>3</sup>, Duan Qingsong<sup>4</sup>

(1. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650051, China;

2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China;

3. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute Limited Company, Kunming, Yunnan 650041, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agriculture University, Kunming, Yunnan 650201, China)

**Abstract:** [Objective] The ecological adaptability of trees in the water-level-fluctuation zone of reservoirs in the parallel flow area of three rivers was determined in order to provide a scientific basis for the selection of dominant afforestation species for ecological restoration in this area. [Methods] Seedlings of *Taxodium hybrid*, *Pterocarya stenoptera*, *Salix americana*, and *Taxodium ascendens* were selected for a small-scale afforestation experiment in the fluctuating zone of the Huangdeng Reservoir on the Lancang River. The survival rate and basic growth of trees were observed, and the crown shape and structure, shoot and branch characteristics, and biomass were observed two years after transplanting. [Results] At the initial stage of

收稿日期: 2022-02-28

修回日期: 2022-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“三江并流区水库消落带草本植物根系水下固土机理研究”(42167046); 云南澜沧江黄登水电站库周消落带治理试验工程科研合作项目(H20200133); 云南省教育厅科学研究项目(2020Y165); 云南农业大学科研基金项目(2021XNKX026)

第一作者: 李建兴(1987—), 男(汉族), 云南省腾冲市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 531861323@qq.com。

通讯作者: 段青松(1971—), 男(白族), 云南省大理市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持和土地生态整治方面的研究。Email: 258437886@qq.com。

transplanting, the survival rate of three of the tree species (*Taxodium hybrid*, *Pterocarya stenoptera*, *Taxodium ascendens*) decreased significantly with the increase of flooding and drying times in the drawdown zone. Two years after transplanting, the survival rates of the four tree species followed the order of *Salix americana* (100%) > *Taxodium ascendens* (48.78%) > *Pterocarya stenoptera* (40.19%) > *Taxodium hybrid* (32.86%). The growth of *Salix americana* was significantly greater than that of the other three species, and the tree height and crown width of *Pterocarya stenoptera* and *Taxodium hybrid* “zhongshanshan” fir decreased due to dying and dead branches. The total biomass of *Salix americana* and the biomass of each constituent organ were significantly greater than those of the other three tree species, and the proportion of each constituent organ to the total biomass was relatively balanced, with the trunk being the main part, and the leaves and branches of *Taxodium hybrid* accounting for the smallest proportion of the total biomass. [Conclusion] The suitability of the four tree species in the fluctuating zone of the Huangdeng Reservoir of the Lancang River followed the order of *Salix americana* > *Taxodium ascendens* > *Pterocarya stenoptera* > *Taxodium hybrid*. The survival rate of *Salix americana* was 100% two years after transplanting. It should be considered the recommended tree species for the restoration of fluctuating vegetation in the three parallel rivers reservoir area.

**Keywords:** fluctuation zone of Huangdeng Reservoir; tree; afforestation; adaptability

水库消落带是因水库水位变化而形成的一段特殊区域,指水库最低水位线至最高水位线之间的地貌空间,是连接水陆生态系统的交错、过渡区域,生态环境脆弱,敏感性强<sup>[1-3]</sup>。植物具有保持土壤、净化水质、涵养水源、控制雨洪以及给动物提供栖息场所等多重生态服务功能<sup>[6-7]</sup>。恢复和重建植被是治理消落带生态系统的关键,筛选适合在消落带生长的植物是植被重建的前提和基础,目前关于植物在消落带的适生性方面已有不少研究,国外主要集中于自然植物在消落带上的适应性,如 Santos 等<sup>[8]</sup>在巴西约热内卢,Azim 等<sup>[9]</sup>在英国哥伦比亚,Bernard 等<sup>[10]</sup>在美国马里兰东部等消落带上的研究指出水位变动抑制了植物的生长发育,消落带形成后,适生物种减少;国内随着水利工程的不断兴建,在三峡库区、丹江口水库、梅山水库等消落带进行了大量植被恢复的研究,筛选出了一些适合在消落带生长的植物<sup>[3,11-13]</sup>,但有关“三江并流区”水库消落带植被重建的研究还少有报道。

三江并流区位于青藏高原东南部,横断山脉纵谷地带,是我国西南生态屏障的核心区域。近年来,国家在“三江”流域进行了大量水电开发,仅在干流上规划建设的大型以上的水电站就达 23 座<sup>[4]</sup>。黄登水电站是澜沧江上游规划河段的第六级水电站,位于怒江州兰坪县境内,于 2019 年 6 月工程完建,电站装机容量 1 900 MW,电站水库贯穿兰坪和维西两县,总库容  $1.67 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,正常蓄水位 1 619 m,死水位 1 586 m,之间形成了高差 33 m 的消落带。黄登库区地处三江并流区的核心地带,处于地壳运动的活跃区和地壳

构造板块碰撞点,岩质松软、岩层节理发育、岩石破碎,成土母质易于风化,各种地质灾害频繁<sup>[5]</sup>,水库运行使库岸经历干湿交替后,消落带内大量原生植物死亡,稳定性下降,滑坡等灾害频发,面临着生物多样性锐减,生态系统受损,生态环境严重退化等问题,在三江并流区有较强的代表性;与此同时,库岸水土流失导致入库泥沙增加,不仅对水库水质及其安全运行均造成影响,更是威胁着库区的生产生活安全,亟待进行生态治理。因此,本研究在滇西北三江并流区内澜沧江典型水电站库区消落带进行造林试验,以期筛选出能够适应该区消落带的优势树种,为三江并流区植被建设、生态修复、生物多样性维护以及水源涵养等提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区位于维西县维登乡小庄社,为澜沧江黄登电站水库库尾左岸平缓开阔的消落带(27°6′56″N, 99°10′29″E),该区域地处横断山脉纵谷地带碧罗雪山山系尾部,属三江并流区核心地带,年均气温 14.9℃,年均降雨量 938.6 mm。库区出露地层以中生界为主,有少量上古生界及新生界地层,主要出露地层有石炭系下统石登组上段、二叠系上统、三叠系上统小定西组、侏罗系中统花开左组、侏罗系上统坝注路组及第四系地层,岩性以不透水的板岩、变质岩、岩浆岩为主,另外在库尾托巴坝段有印支期侵入的辉长岩岩体分布。黄登水库蓄水前,区内土地利用方式有水田、旱地及荒地,荒地上长有核桃(*Juglans*)、野荔

枝(*Litchi chinensis*)等原生乔木以及狗牙根(*Cynodon dactylon*)、青蒿(*Artemisia annua*)等原生草本。水库运行后在水流缓慢的消落带泥沙淤积,

本试验在淤积区开展,试验区地面平均坡度约为 $15^\circ$ ,土壤为黏性土壤,其粒度组成和基本化学性质详见表 1。

表 1 试验区土壤基本情况

| 机械组成           |                 |                   |              | 全氮/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 水解性氮/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全磷/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 有效磷/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全钾/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 速效钾/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | pH 值 | 有机质/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------|--|---|--|--|--|--|------|---|
| 2.0~<br>0.2 mm | 0.2~<br>0.02 mm | 0.02~<br>0.002 mm | <0.002<br>mm |  |   |  |  |  |  |      |   |
| 0.50%          | 15.06%          | 27.21%            | 57.23%       | 2.11                                       | 140.42  | 0.78                                       | 21.00  | 21.37                                      | 144.69                                       | 7.96 | 38.58                                       |

## 1.2 试验设计

为优化造林效果,选取前人筛选出能够较好适应我国三峡等水库消落带或其他湿地环境,能良好生长,并用于造林生态修复的工程中山杉(*Taxodium hybrid*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、竹柳(*Salix americana*)、池杉(*Taxodium ascendens*)4个树种作为供试材料<sup>[3,11-12]</sup>,造林苗木均为带有 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 土球的 I 级壮苗,栽植前对 4 种苗木枝条进行了修剪,以保证各树种的分枝情况基本一致。2019 年 5 月,根据澜沧江黄登电站水位变化情况,在试验区水位高程 $1\ 615 \sim 1\ 618\text{ m}$ 的区域内,共设置 4 个试验小区,按照 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的规格挖好种植穴,以 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 为间距分别将以上 4 种乔木进行栽植<sup>[14]</sup>,栽植时先回填表土,然后放置苗木,围绕土球填满浮土,然后踩紧压实,灌足水,再回土覆盖土球表面及四周<sup>[15]</sup>,4 个试验小区对应的造林面积依次为 560, 428, 480 和 492  $\text{m}^2$ 。

## 1.3 研究方法

本研究先后于 2020 年 3 月 6—7 日、2020 年 11 月 18—21 日、2021 年 5 月 7—9 日统计了研究区 4 种供试植物的成活棵数和移栽总数,统计成活率,每个树种按 S 形选定 5 棵具有代表性的成活植株作为监测株挂好样株标签,测定树高、冠幅、地径、胸径等指标;并于移栽 2 a 后的 2021 年 5 月 7—9 日,4 个树种枝叶较为茂盛时,测量了 4 种植物的枝下高,以此计算树冠长度、冠长率、树冠圆满度等反映树冠形态的指标<sup>[16]</sup>,统计了枝条数量,计算了枯枝比<sup>[17]</sup>,并测定了 4 个树种地上树干、枝条和叶片生物量。各指标的具体测定及计算方法为:

(1) 成活率 = 成活颗数 / 栽植总棵数  $\times 100\%$

(2) 树高:用哈尔滨光学仪器厂制造的勃鲁莱式林业测高器测量

(3) 冠幅:用皮尺测量树木东西和南北方向的树冠幅度,求平均值,冠幅 = (东西方向冠幅 + 南北方向冠幅) / 2

(4) 地径:用电子数显游标卡尺测量树木离地面

20 cm 处的树干直径

(5) 胸径:用电子数显游标卡尺测量树木离地面 130 cm 处的树干直径

(6) 枝下高:用皮尺测量地面至树木第一个侧枝处的树干高度

(7) 树冠长度( $L_C$ ) = 树高一枝下高

(8) 树冠率 = 树冠长度 / 树高

(9) 树冠圆满高( $R_{CF}$ ) = 冠幅 / 树冠长度

(10) 枯梢高度:用皮尺测量枯死树梢的长度

(11) 枯梢率 = 枯梢高度 / 树高

(12) 枯枝比 = 枯死枝条数 / 所有枝条数

(13) 生物量:用电子秤称取植物树干、枝条、叶片的鲜重,然后取适量样品带回实验室,放入 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱内 72 h 以达到恒定重量<sup>[18]</sup>,求得各样品的干、鲜重量比,换算得到植物各部分生物量。

## 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理,用 SPSS 21.0 软件进行差异性分析,用 Origin 2019 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 4 种乔木的成活情况

消落带植物的成活情况与淹水时间密切相关,根据黄登水电站水位运行记录,分析得到观察期植物的淹水时间详见表 2。

表 2 试验区淹水时间

| 年份   | 水位在 1 615 m 以上的时间/d |      |      |      | 总计/d |
|------|---------------------|------|------|------|------|
|      | 9 月                 | 10 月 | 11 月 | 12 月 |      |
| 2019 | 9 月                 | 10 月 | 11 月 | 12 月 | 88   |
|      | 10                  | 31   | 30   | 17   |      |
| 2020 | 9 月                 | 10 月 | 11 月 |      | 54   |
|      | 10                  | 31   | 13   |      |      |

注:本研究观测数据截止于 2021 年 5 月,2021 年 1—5 月试验区未淹水,故未列出该年份淹水天数。

植物成活情况是植物对生长环境适应性最直接的体现,在移栽 10 个月(2020 年 3 月)后,140 棵中山杉成活 104 棵,107 棵枫杨成活 77 棵,120 棵竹柳全

部成活,123棵池杉成活97棵(图1),4种乔木的成活率由高到低依次为:竹柳>池杉>中山杉>枫杨,池杉、中山杉、枫杨3个树种的成活率较为接近,分别为78.86%,74.29%,71.96%。在移栽18个月(2020年11月)后,竹柳成活率仍为100%,其余3种植株进一步出现了死亡的现象,成活率均未超过50%,且相比于8个月前(2020年3月),池杉、枫杨、中山杉3个树种的成活率分别下降了30.08%,24.3%,41.43%,各树种间苗木成活率的大小关系也发生了略微变化,表现为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。移栽2a(2021年5月)后,各乔木的成活率分别为竹柳100%,池杉48.78%,枫杨40.19%,中山杉32.86%。中山杉、竹柳、池杉3个树种的成活率相较于6个月前(2020年11月)未发生变化,且4个树种间的大小关系与6个月前(2020年11月)相一致,表现出一定的稳定性,可见移栽两年后,4种乔木在黄登水库消落带的适应性强弱为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。

## 2.2 4种乔木的生长情况

### 2.2.1 4种乔木的生长情况 4种乔木的不同时期的

生长指标变化详见表3。由表3可知,2020年3月,在树高和冠幅上,4个树种由高到低都表现为:竹柳>中山杉>池杉>枫杨,树高最大的竹柳为499.10cm,最低的枫杨为414.80cm,冠幅最大的竹柳为77.80cm,最小的枫杨为26.40cm;在地径上,4种乔木由高到低依次为:池杉>中山杉>竹柳>枫杨,在胸径上,中山杉>竹柳>池杉>枫杨,整体而言,竹柳的生长指标优于其余3个树种。

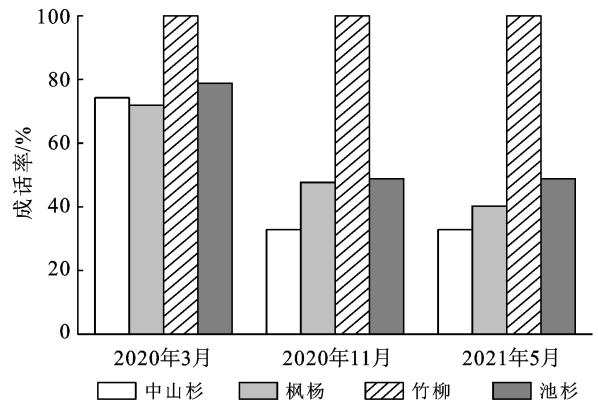


图1 4种乔木的成活率变化

表3 4种乔木基本生长指标变化情况

| 时间     | 生长指标 | 中山杉          | 枫杨           | 竹柳           | 池杉           |
|--------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 202003 | 树高   | 488.00±16.43 | 414.80±12.51 | 499.10±12.90 | 441.60±13.77 |
|        | 冠幅   | 68.50±3.60   | 26.40±2.61   | 77.80±4.42   | 56.30±6.30   |
|        | 地径   | 6.32±0.16    | 5.07±0.19    | 5.72±0.17    | 6.50±0.35    |
|        | 胸径   | 4.83±0.10    | 4.23±0.12    | 4.82±0.15    | 4.80±0.29    |
| 202011 | Δ树高  | 4.00         | 4.00         | 188.90       | 5.10         |
|        | Δ冠幅  | 0.90         | 4.10         | 121.70       | 2.80         |
|        | Δ地径  | 0.27         | 0.31         | 3.16         | 0.52         |
|        | Δ胸径  | 0.12         | 0.18         | 3.05         | 0.36         |
| 202105 | Δ树高  | 2.88         | -1.30        | 291.1        | 30.10        |
|        | Δ冠幅  | -11.97       | 81.28        | 178.82       | 25.75        |
|        | Δ地径  | 0.41         | 0.52         | 4.30         | 0.87         |
|        | Δ胸径  | 0.32         | 0.38         | 4.02         | 0.62         |

注:Δ表示生长指标相对于2020年3月的变化量。

2020年11月,4个树种的树高、冠幅、地径、胸径均有一定增长,其中,竹柳的所有生长指标均增长最大,其树高增长了188.90cm,冠幅增长了121.7cm,地径、胸径分别增长了3.16和3.05cm,其余3个树种在树高上增长较为接近,在4.00~5.10cm之间,在冠幅的增长上,表现为:枫杨>池杉>中山杉,在地径和胸径上,3个树种增长均较小,总体上中山杉的各生长指标均增长最小。2021年5月,竹柳和池杉在所有生长指标上均进一步显著增长,枫杨在冠幅上也出现较

大增长,相比于2020年3月,增长了81.28cm,仅次于竹柳,而中山杉的冠幅、枫杨的树高均出现了降低的现象(图2)。

2.2.2 4种乔木的树冠形态 试验区4种乔木在移栽2a后,在树冠形态上体现出不同的特点,4个树种的树冠形态指标详见表4。枝下高是树木自地面起至第一个侧枝处的树干长度,反映了植物近地枝条的发育能力<sup>[7]</sup>,而枝条是形成树冠的基础;树冠长度、树冠率以及树冠圆满度不仅客观地反映了树木占有生长



空间的状况及竞争能力,而且对树木的生长过程和树木的形状都有着非常重要的影响。由表 2 可知,4 种乔木的枝下高,以池杉最大,达 215.67 cm,且与其余 3 个树种间差异极显著,中山杉(45.67 cm)和竹柳(34.33 cm)相对接近,枫杨最小,仅为 8.67,由此可知枫杨近地枝条的发育能力最强,竹柳、中山杉排在第 2,3 位,池杉近地枝条的发育能力最弱。在树冠长度上,4 种乔木由高到低依次为:竹柳>中山杉>枫杨>池杉,最高的竹柳达 775.33 cm,中山杉和枫杨均超过了

400 cm,两个树种间无极显著差异,但与另外 2 个树种间均有极显著差异,最小的池杉仅为 261.60 cm。在树冠率上,4 种乔木依次为:枫杨>竹柳>中山杉>池杉,各树种两两间均表现出极显著差异性,树冠率最小的池杉仅有 55.01%,其余 3 个树种的树冠率均超过了 90%,且枫杨和竹柳两个树种高于了 95%。在树冠圆满度上,4 种乔木由高到低依次为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉,树冠圆满度最小的中山杉为 0.13,其与另外 3 个树种间表现出极显著差异。

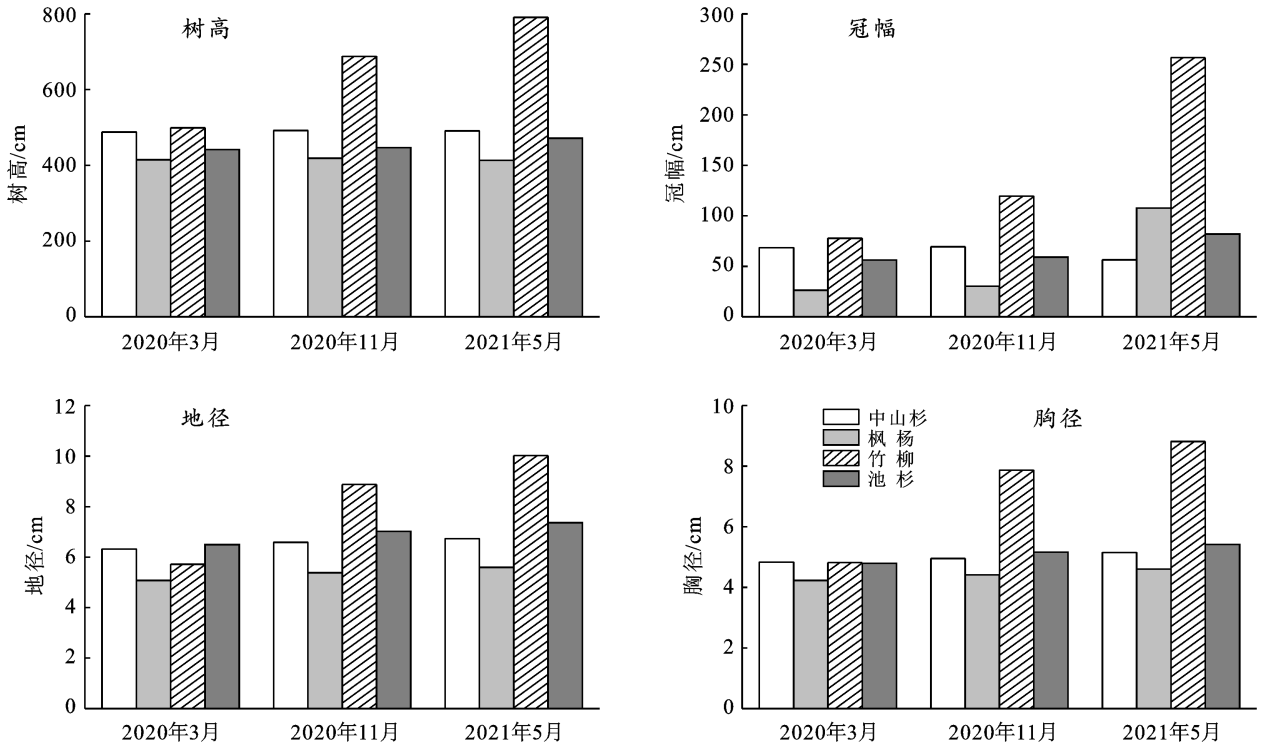


图 2 4 种乔木基本生长情况

表 4 移栽 2 a 后 4 种乔木的树冠特征

| 树种  | 枝下高/cm                    | 树冠长度/cm                   | 树冠率/%                   | 树冠圆满度                  |
|-----|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| 中山杉 | 45.67±10.60 <sup>B</sup>  | 449.00±13.00 <sup>B</sup> | 90.80±1.89 <sup>A</sup> | 0.13±0.02 <sup>B</sup> |
| 枫杨  | 8.67±2.08 <sup>B</sup>    | 409.33±21.55 <sup>B</sup> | 97.91±0.60 <sup>A</sup> | 0.27±0.06 <sup>A</sup> |
| 竹柳  | 34.33±20.01 <sup>B</sup>  | 775.33±45.61 <sup>A</sup> | 95.70±2.61 <sup>A</sup> | 0.33±0.02 <sup>A</sup> |
| 池杉  | 215.67±43.02 <sup>A</sup> | 261.60±14.53 <sup>C</sup> | 55.01±6.36 <sup>B</sup> | 0.32±0.03 <sup>A</sup> |

注:表中数据表示平均值±标准差;同列不同字母表示差异极显著( $p<0.01$ )。下同。

2.2.3 4 种乔木树梢及枝条特征 4 种乔木移栽后,有部分树种出现了枝干枯萎的现象,表 5 为移栽 2 a 后 4 个树种的树梢及枝条特征。由表 5 可以看出,从树梢上看,4 种乔木中,竹柳和池杉 2 个树种未出现枯梢,其余 2 个树种则出现了枯梢,在枯梢高度上,表现为:中山杉(293.67 cm)>枫杨(207.67 cm),在枯梢率上表现为:中山杉(59.36%)>枫杨(49.51%),且 2 个

树种间差异极显著。从枝条上看,移栽 2 a 后,4 种乔木发育出的枝条总数在 31.67~101.67 枝之间,由多到少依次为:中山杉>竹柳>枫杨>池杉,与树梢特征对应,竹柳和池杉未出现枯枝,而中山杉出现了大量枯枝,平均枯枝数为 64.33 枝,枯枝比高达 63.52%,枫杨的平均枯枝数、枯枝比分别为 10.00 枝、24.00%。

表5 移栽2 a后4种乔木树梢及枝条特征

| 树种  | 树梢特征                      |                         | 枝条特征                      |                          |                         |
|-----|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
|     | 枯梢高度/cm                   | 枯梢率/%                   | 总枝条数/枝                    | 枯枝数/枝                    | 枯枝比/%                   |
| 中山杉 | 293.67±11.68 <sup>A</sup> | 59.36±0.71 <sup>A</sup> | 101.67±23.35 <sup>B</sup> | 64.33±13.05 <sup>A</sup> | 63.52±1.86 <sup>A</sup> |
| 枫杨  | 207.67±32.96 <sup>B</sup> | 49.51±5.67 <sup>B</sup> | 40.67±8.39 <sup>B</sup>   | 10.00±4.00 <sup>B</sup>  | 24.00±5.75 <sup>B</sup> |
| 竹柳  | 0                         | 0                       | 67.00±13.53 <sup>AB</sup> | 0                        | 0                       |
| 池杉  | 0                         | 0                       | 31.67±7.77 <sup>B</sup>   | 0                        | 0                       |

### 2.3 4种乔木生物量比较

表6为4种乔木移栽2 a后的生物量变化。由表6可知,竹柳的总生物量,树干、枝条、叶片生物量均极显著高于另外3个树种,在总生物量上,竹柳高达28 234.12 g,远高于其余3个树种,约为中山杉的11.21倍,枫杨的13.28倍,池杉的10.57倍。在树干生物量上,4种乔木的大小关系表现为:竹柳>中山杉>池杉>枫杨,竹柳树干生物量约达到中山杉的5.70倍,池杉的5.74倍,7.61倍,4种乔木树干占各自总生物量的比重分别为:中山杉(86.10%)>池杉(80.56%)>枫杨(76.39%)>竹柳(43.74%)。枝条生物量大小关系为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉,枫

杨和池杉的枝条生物量几乎相等,约等于303 g,竹柳枝条约为池杉的39.62倍,枫杨的39.67倍,中山杉的43.76倍,4种植物枝条占各自总生物量的比重分别为:竹柳(42.57%)>枫杨(14.25%)>池杉(11.36%)>中山杉(10.9%)。

在叶片生物量上,4个树种间的大小关系与枝条生物量大小关系一致,竹柳叶片生物量约为池杉的17.90倍,枫杨的19.42倍,中山杉的51.15倍,叶片生物量占各自总生物量的比重分别为:竹柳(13.69%)>枫杨(9.36%)>池杉(8.08%)>中山杉(3.00%)。总体来看,竹柳各组成器官均发育良好,各自占总生物量的比例较为均衡。

表6 移栽2 a后4种乔木的生物量情况

| 树种  | 总生物量/g                          | 各组成器官生物量/g                    |                                 |                              |
|-----|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
|     |                                 | 树干                            | 枝条                              | 叶片                           |
| 中山杉 | 2 519.56±218.40 <sup>B</sup>    | 2 169.34±175.61 <sup>B</sup>  | 274.68±69.23 <sup>B</sup>       | 75.54±13.17 <sup>B</sup>     |
| 枫杨  | 2 125.84±276.50 <sup>B</sup>    | 1 623.90±169.58 <sup>B</sup>  | 303.01±94.57 <sup>B</sup>       | 198.93±36.99 <sup>B</sup>    |
| 竹柳  | 28 234.12±1 896.56 <sup>A</sup> | 12 349.69±812.91 <sup>A</sup> | 12 020.39±2 099.11 <sup>A</sup> | 3 864.04±362.21 <sup>A</sup> |
| 池杉  | 2 671.06±180.58 <sup>B</sup>    | 2 151.80±153.70 <sup>B</sup>  | 303.39±66.73 <sup>B</sup>       | 215.87±11.45 <sup>B</sup>    |

## 3 讨论

### 3.1 植物成活率与适应性

植被恢复和重建是消落带研究的热点之一,植物适应性是指植物形态、结构对其生长发育环境或条件的适应能力与等级水平<sup>[19-20]</sup>,成活率是反映植物适应性最直接的指标,植物生长环境、苗木自身生长特性、种植方式等都会影响植物成活率,本研究的4种苗木移栽时的苗木特征,种植方式和生长环境均基本一致,不同树种间成活率的差异体现了各树种在黄登水库消落带的适应能力。根据表2可知,4种乔木从移栽到第一次观测(2020年3月),历时10个月,试验区经历了1次淹水回落,4种乔木淹水时间约为88 d,平均淹水深度约132 cm,竹柳成活率高达100%,另外3个树种的成活率也都高于70%,4个树种均体现出较好的适应性;到第二次观测时(2020年11月),消落带再次经历了干湿交替,试验区淹水天数约为54 d,4种植物平均淹水深度约153 cm,竹柳无死亡现象,枫杨、中山杉、池杉3个树种的成活率出现明显

下降,分别为32.86%,47.99%,48.78%;随着时间的推移,到第三次观测时(2021年5月),试验区未经历淹水落干,竹柳成活率仍然为100%,中山杉和池杉两个树种的成活率较第二次未发生变化,枫杨成活率降到40.19%,说明本研究的中山杉、枫杨、池杉与众多研究<sup>[7,12,15]</sup>一致,存活率受淹水影响明显,随着淹水次数的增加,植物成活率下降,且枫杨耐旱性较低。移栽2 a后,试验区4种乔木的成活率分别为:中山杉32.86%,枫杨40.19%,竹柳100%,池杉48.78%,可见,移栽初期4个树种在黄登水库消落带的适应性依次为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。

### 3.2 植物生长情况与适应性

熊兴政等<sup>[21]</sup>在三峡库区消落带的研究表明,淹水时间长短对竹柳株高和冠幅影响相对较小,对桑树和水桦的树高、地径及冠幅有较大影响;刘玢<sup>[22]</sup>则研究指出竹柳可忍耐两个月以上不过顶的深水淹没,或浅水地造林全年泡水不至死亡,只是生长量下降,但比池杉、桉木生长快,本研究与以上研究<sup>[21-22]</sup>表现出较强的一致性,竹柳在树高、冠幅、地径、胸径的增长



速度上明显均优于另外 3 个树种,池杉在树高、地径、胸径上优于中山杉和枫杨,枫杨在冠幅的增长上强于中山杉和池杉,但其树高与中山杉均出现降低的现象,中山杉在上述生长指标上均增长较小。

由图 3 可知,植物树冠特征与树梢、枝条有着紧密的联系,本研究的 4 种乔木移栽 2 a 后,在枝下高、树冠长度、树冠率、树冠圆满度上的差异体现出各自不同的生长特点,而从树梢特征看,可能是因为消落带落干期缺水,或淹水期植物厌氧,本研究的中山杉和枫杨出现枯梢现象<sup>[22]</sup>,而从枝条发育情况看,中山杉虽在总枝条数上占据优势,但其枯枝比高达 63.52%,枫杨也有 24.00%的枯枝。枯梢和枯枝的存在也是导致中山杉和枫杨 2 个树种在树高和冠幅上

出现降低的原因,竹柳和池杉的成活植株无枯梢。通过多次现场观测,移栽 2 a 期间,本研究的 4 种乔木在试验区均未出现病虫害,树种间的生长差异体现了它们对试验区环境的适应情况不同。

前人<sup>[22]</sup>在三峡库区消落带研究指出,竹柳树干在淹水一个月后在水面处会长出寄生根,实际观测中发现,本研究的竹柳树干上也发育有发达的寄生根,在淹水期,这些根系漂浮在水面上进行呼吸<sup>[23]</sup>,促进了竹柳的生长,这应是竹柳比其他 3 种植物更能较好生长的原因。结合树高、冠幅、地径、胸径等基本生长指标,树冠形态特征指标,以及树梢和枝条特征指标,4 种乔木在试验区的适应性依次为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。

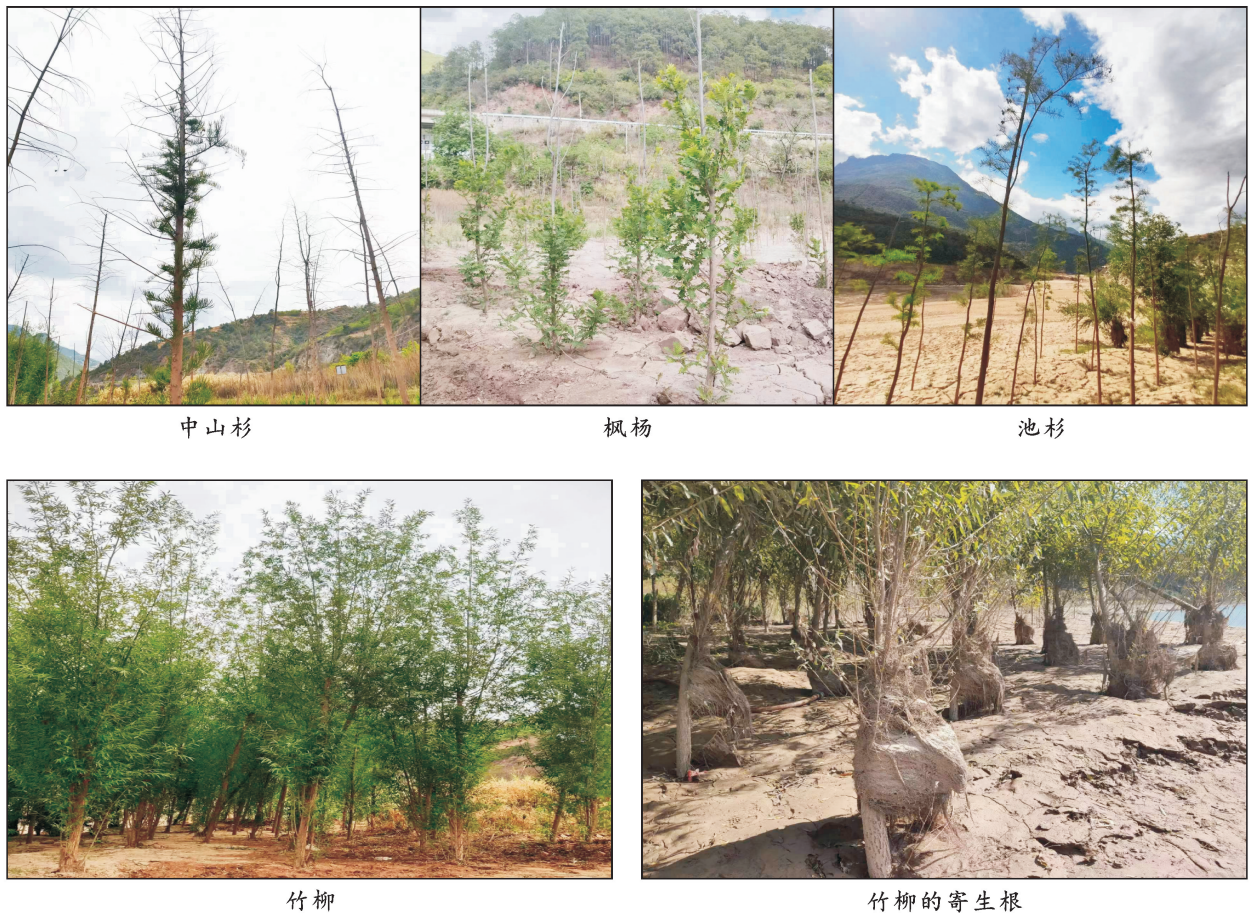


图 3 2021 年 5 月试验区 4 种乔木生长概况及竹柳的寄生根

### 3.3 植物生物量与适应性

4 个树种移栽 2 a 后,竹柳的总生物量和各组成器官的生物量均与其余 3 个树种间差异较大,其原因主要是竹柳在前文中所提及的各项生长指标均生长较快。植物器官的形态结构和生理功能与其生长环境密切适应<sup>[20]</sup>,植物器官的生长特征也反映了植物对于环境的适应程度,竹柳的树干、枝条、叶片生物量

占其总生物量的比重相比于另外 3 个树种较为均衡,说明竹柳各组成器官均发育良好,较好适应了试验区环境,而其余 3 个树种均为树冠生物量所占比例较大,枝条和叶片生物量所占比例较小。叶片是植物与环境进行物质和能量交换的主要器官,其特征反映了植物对资源的利用效率和对环境的适应水平<sup>[20]</sup>,中山杉叶片生物量占总生物量的比重仅为 3%,在所有

树种中最小,同理,其枝条生物量占总生物量的比重也最小,因此,其适应性最差。结合总生物量和各组成器官的生物量,研究区4种乔木的适应性依次为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。

### 3.4 不足与展望

滇西北地区植物重建较为困难,受自然条件及社会经济状况的影响,目前该区消落带生态治理尚处于起步阶段,由于种种条件限制,本研究是对中山杉、枫杨、竹柳、池杉4种乔木移栽初期在该区消落带适应性的初探,后续研究需续加强对4种植物的监测,同时也需从植物地下根系、土壤微生物及种子库、种群系统的生态服务功能、植物多样性配置、植物病虫害等方面进一步加强研究,以期为滇西北三江并流区水库消落带植物重建提供更多适生物种,推动消落带生态修复。

## 4 结论

综合4种乔木的成活率、基本生长指标、树冠形态特征、树梢及枝条特征、生物量特征,4种乔木在澜沧江黄登水库消落带的适生性依次为:竹柳>池杉>枫杨>中山杉。移栽2a后,竹柳存活率达100%,是该区消落植被重建的优选树种,具有较强的造林可行性。

### [参 考 文 献]

- [1] 李姗姗,邓玥,施凤宁,等.水库消落带研究进展[J].湿地科学,2019,17(6):689-696.
- [2] Bao Yuhai, Tang Qiang, He Xiubin, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Hydrology Research, 2015,46(2):212-221.
- [3] 赵洋,饶良懿,周紫璇.中国水库消落带生物治理研究综述[J].环境科学与技术,2016,39(12):71-79.
- [4] 姚鑫,邓建辉,刘星洪,等.青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析[J].工程科学与技术,2020,52(5):16-37.
- [5] 何忠俊,王立东,郭琳娜,等.三江并流区土壤发生特性与系统分类[J].土壤学报,2011,48(1):10-20.
- [6] de Souza A L T, Fonseca D G, Liborio R A, et al. Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil [J]. Forest Ecology and Management,2013,298:12-18.
- [7] 李波,袁兴中,杜春兰,等.池杉在三峡水库消落带生态修复中的适应性[J].环境科学研究,2015,28(10):1578-1585.
- [8] Santos A M, Assis Esteves F. Influence of water level fluctuation on the mortality and aboveground biomass of the aquatic macrophyte *Eleocharis interstincta* (VAHL) roemer et schults [J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2004,47(2):281-290.
- [9] Mallik A U, Richardson J S. Riparian vegetation change in up-stream and downstream reaches of three temperate rivers dammed for hydroelectric generation in British Columbia, Canada [J]. Ecological Engineering, 2009,35(5):810-819.
- [10] Sweeney B W, Czapka S J. Riparian forest restoration: Why each site needs an ecological prescription [J]. Forest Ecology and Management, 2004,192(2/3):361-373.
- [11] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].中国水土保持科学,2019,17(4):160-168.
- [12] 任建武,任志远,任海,等.丹江口水库消落区生态修复植物选择[J].林业资源管理,2015(1):88-94.
- [13] 章珊珊,李若男,王伟,等.梅山水库消落带绿化植物选择与配置[J].安徽农业大学学报,2015,42(3):357-362.
- [14] 鲍玉海,郭丰,胡保生,等.西南干旱河谷区水库消落带柳树造林效果评价[J].水土保持研究,2018,25(5):216-219.
- [15] 殷云龙,於朝广,华建峰,等.重庆万州三峡库区消落带中山杉造林试验[J].林业科技开发,2014,28(2):110-114.
- [16] 欧建德,吴志庄.密大杉人工林树冠、根系生长和林木分级的早期密度效应[J].东北林业大学学报,2018,46(12):15-19.
- [17] 赵传燕,赵阳,彭守璋,等.黑河下游绿洲胡杨生长状况与叶生态特征[J].生态学报,2014,34(16):4518-4525.
- [18] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [19] 金银根.植物学[M].2版.北京:科学出版社,2010.
- [20] 喻阳华,余杨,杨苏茂,等.植物生态适应性特征及关键种选择研究进展[J].世界林业研究,2016,29(6):38-42.
- [21] 熊兴政.水淹对三峡库区消落带3种木本植物生长及光合作用的影响[D].重庆:西南大学,2016.
- [22] 刘玠.竹柳对三峡库区消落带生态系统的影响及其应用可行性研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [23] Nakamura T, Nakamura M. Root respiratory costs of ion uptake, root growth, and root maintenance in wetland plants: efficiency and strategy of O<sub>2</sub> use for adaptation to hypoxia [J]. Oecologia, 2016,182(3):667-678.