

引种植物水桦在三峡库区消落带的种子萌发及生长特性*

高 岚¹, 鄢静淳¹, 熊兴政¹, 欧 阳¹, 王 萌¹, 袁贵琼¹, 张 文¹, 廖佳铎¹, 刘 芸¹, 任 立²

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市秀山县武陵山湿地植物工程技术研究开发中心, 重庆 秀山 409902)

摘要:【目的】观察研究水桦(*Betula nigra*)种子在三峡库区消落带的萌发及生长特性,为科学评价引种植物水桦在三峡库区消落带的适应性奠定基础。【方法】在重庆市万州区壤渡镇、开州区彭溪河湿地自然保护区、忠县石宝寨镇、奉节县竹衣河等地高程为170,175,178 m的消落带区域分两次播种水桦种子,研究不同土壤类型、高程对种子累计萌芽率、存活率的影响,调查水桦株高、地径、冠幅、开花结实情况并测定水桦光合参数。【结果】1)在不同的土壤条件下种子萌芽力不同。2)种子萌发后当年存活率较高,但淹水出陆后全部死亡。3)两年生水桦种植在消落带在高程170,175 m处2年后始花,但开花结实数少,果实不能自然萌发;种植4年后两处水桦的株高分别为6.22,6.95 m,两者差异具有统计学意义($p < 0.01$)。4)消落带春季出陆后,在170 m高程处的水桦净光合速率日均值逐渐增强,至秋季蓄水前期达 $23.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在高程175 m处的水桦净光合速率日均值为 $14.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;两者差异具有统计学意义($p < 0.05$)。【结论】水桦在消落带的种群个体数量不能自然增长,初步判断该物种不具有生态入侵性;冬季淹水时间长短对水桦生长有明显影响,但水桦可通过增强光合能力来适度补偿长时间淹水的影响,以达到适应三峡库区消落带这一特殊生境的目的。

关键词:水桦;引种;累积萌芽率;生长速率;光合速率;三峡库区

中图分类号:Q945.78;X171.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)04-0040-08

三峡工程于2009年建成后,冬季正常蓄水位为175 m,由此在库区形成长约600 km、宽1~2 km的大湖泊。在夏季,三峡工程防洪水位降至145 m时,库区两岸则显现20~30 m的消落带^[1]。由于库区蓄水位落差大,消落带出陆期最长可达150余天。在这一期间,当地农户沿袭过去的种植习惯在消落带种植农作物。农户翻耕造成了严重的水土流失,而施肥和使用杀虫剂、除草剂则更加重了库区的水体污染。因此,消落带突出的生态环境问题已对三峡水库的管理提出了严峻的挑战^[2-3]。消落带植被人工恢复是防止消落带区域不合理利用的一个非常有效的途径^[4-10]。植被恢复首先要解决的问题是适生植物的筛选^[11]。水桦(*Betula nigra*)又称河桦,系桦木科(Betulaceae)、桦木属(*Betula*)落叶乔木,自然分布在美国南方海岸平原沼泽、河滩地,对旱涝、寒冷、盐渍、瘠薄甚至酸化的土壤都有很强的适应性^[12]。根据三峡库区消落带的水位涨落周期以及当地的地质和气候条件,2008年,重庆市林业科学研究院通过中国林木种子公司向美国FWSco公司引进水桦种子,准备用于三峡库区消落带植被人工恢复。该研究院首先进行了播种试验^[13],并在三峡库区消落带进行了试种试验,至今引种水桦的长势良好;但是关于引种植物水桦在三峡库区消落带的生长繁殖及适应性情况如何、这一物种是否会造成生态入侵等问题的研究,目前尚未见有关报道。为此,本研究初步调查了引种水桦在三峡库区消落带的种子萌发和生长特性,为科学评价这一物种在三峡库区消落带的适应性奠定基础。

1 材料和方法

1.1 种子萌发及存活率统计

于2009年3月开展水桦种子室内萌发实验。萌发实验在光照培养箱中进行,每个处理5个重复,每个重复有100粒种子。将种子均匀置于垫有双层滤纸的直径9 cm的培养皿中,发芽温度设置为白天24℃、夜晚21℃,光照强度为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光照时间12 h,相对湿度为75%~78%。每日加入蒸馏水以保证滤纸湿润,

* 收稿日期:2016-10-18 修回日期:2017-05-24 网络出版时间:2017-05-16 11:25

资助项目:国家自然科学基金(No.31370602);中央高校基本业务费专项资金(No.XDJK2016E162)

第一作者简介:高岚,女,研究方向为生态学,E-mail:gaolan199614@163.com;通信作者:刘芸,教授,E-mail:utrecht@swu.edu.cn

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170516.1125.038.html

同时记录萌发种子数并将已萌发种子移走。以胚根突破种皮视为种子萌发的标志,持续 30 d 无种子萌发的或者萌发后连续 5 d 没有生长的视为萌发结束。

用于播种实验的种子在播种前进行预处理,具体过程为:用 50~60 °C 温水浸泡种子,每日换水 2 次,48 h 后过滤种子,待用。选择消落带 4 种典型土壤播种水桦种子,具体实验地点分别位于重庆市万州区壤渡镇、开州区澎溪河湿地自然保护区、忠县石宝寨镇和奉节县竹衣河的高程为 170,175,178 m 的消落带区域,于 2009 年 3 月中旬(消落带出陆后)和 9 月底(淹水前)分两次播种。分别在上述区域选择土层相对深厚、地势平缓的消落带,清除杂草、石块、杂物等,横坡整理出 5 条长 3 m、宽 0.8 m 且平行于江面的播种带。播种前用质量分数为 2% 的硫酸亚铁溶液喷洒床面,充分喷湿土壤后,用塑料薄膜覆盖,5 天后揭去薄膜,2 天后播种。播种具体过程为:将浸泡后的种子均匀撒播在上述播种带中,每条播种带均匀播种 1 200 颗。播种完毕,用土覆盖,将播种带浇透水,用竹质材料制作拱形棚,覆盖塑料薄膜保湿保温。依据气候情况在薄膜上覆盖遮阳网,避免日光直射。每天早晚观察,从第一颗种子萌芽开始统计,每天记录发芽种子数量,直到种子不再萌发(淹水种子萌芽观察在翌年消落带退水后进行)。种子累积萌芽率计算公式为“累积萌芽率=(发芽种子总数/供试种子总数)×100%”。植株存活率观察统计具体做法为:于 2009 年 9 月底即播种当年进行存活率统计,并在 2010 年 3 月(消落带退水以后)至 9 月底连续观察统计存活率。

1.2 土壤田间持水量的测量

采用室内环刀法测定土壤田间持水量^[14]。消落带出陆后,在消落带试验地点选择 0~10 cm 的土层,用环刀采集原状土壤样品(注意避开石块、植物根系和杂物),带回室内,放入已知的恒质量铝盒(记为 m_0),立即称出样品和铝盒的整体质量(记为 m_1)。在(105±2) °C 烘干至恒重,取出后放入干燥器内冷却至室温,再次称出样品和铝盒的整体质量(记为 m_2),记录数据。每个消落带地点每个高程做 3 份平行测定。由此可用公式“土壤田间持水量=[$(m_1-m_2)/(m_2-m_0)$]×100%”计算土壤田间持水量(单位:%)。

1.3 开花结实观察记录

由于消落带种子萌发的幼苗在第二年全部死亡,于 2011 年 3 月底在万州壤渡镇库区消落带中高程 170,175 m 处分别种植由重庆新开源农业开发有限公司苗圃提供的大小相似的两年生水桦苗,株行距为 2 m×2 m。

对移栽到消落带两年生水桦植株的开花结实情况持续观察。每年消落带出陆后,在消落带试验地内采取五点取样法,每个高程划定 10 个 4 m×5 m 的小区,对其中的 5 株水桦逐一挂牌,观察统计水桦的开花结实数。与此同时调查林下种子自然萌芽及幼苗生长情况。采用公式“平均开花数=总开花数/调查的总株数”和“平均结实数=总结实数/调查的总花数”分别计算水桦的平均开花数和平均结实数。

1.4 生长和光合作用测定

2015 年分别在消落带春季出陆期(5 月 7 日)、夏季枯水期(7 月 11 日)和秋季蓄水前期(9 月 22 日)对上述水桦植株进行生长指标测定。株高为地面到苗木顶端的距离,地径为贴近地面 1 cm 处的苗木直径,冠幅为苗木东西和南北方向树冠投影的平均值。测量时,分别在高程 170,175 m 处随机选取 15 株进行测量。在上述 3 个时期,分别选择 3 个连续晴朗无风的日子采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 型便携式光合仪对上述水桦植株进行光合作用日变化的测定。每个高程选取 5 株植株,并对每株植株倒数第 3 和第 4 片功能叶进行测量。测量时间为 6:00—21:00,每 2 h 测量 1 次。

1.5 统计分析

实验中测得的数据用“平均值±标准差”表示,用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行分析,并用 LSD 法对数据进行多重比较,统计结果在 $p<0.05$ 时视为具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 种子萌芽率及幼苗存活率

表 1 显示,水桦种子在三峡库区消落带的累积萌发率比在室内实验条件下的萌芽率低,后者可达(87±5)%。研究发现,在播种当年不同消落带土壤类型条件下,水桦种子累积萌芽率不同:水桦种子在 pH 为 6.2 的水稻土上累积萌芽率最高,在 pH 为 8.3 的石灰性黄壤上累积萌芽率最低;在同一土壤条件下,随着播种高程的增加,土壤田间持水量降低(表 2),种子累积萌芽率也降低(表 1)。9 月播种的水桦种子经过水淹之后,所有土壤条件和不同高程下的水桦种子的累积萌芽率均为 0。

表 1 水桦在三峡库区消落带的种子累积萌发率及幼苗存活率

Tab. 1 Accumulative seeds hatching rate and seedlings survival rate of *B. nigra* in hydro-fluctuation belt in Three Gorges reservoir

消落带地点	土壤类型	pH	种子萌芽观察时间	不同高程消落带种子累积萌发率/%			不同高程消落带幼苗存活率/%		
				170 m	175 m	178 m	170 m	175 m	178 m
万州	水稻土	6.2	当年	31.2±4.1 ^a	30.4±3.3 ^a	28.6±2.1 ^a	96.0±9.0 ^a	95.3±8.8 ^a	89.4±8.7 ^a
			翌年	0	0	0	0	5.5±1.2 ^a	8.7±2.1 ^a
开县	紫色土	6.9	当年	28.3±3.4 ^a	27.2±4.6 ^a	25.4±3.6 ^a	93.2±9.1 ^a	90.6±8.6 ^a	85.7±8.3 ^a
			翌年	0	0	0	0	6.2±1.3 ^a	9.5±2.2 ^a
忠县	黄壤	6.6	当年	27.4±3.0 ^a	29.2±3.7 ^a	26.5±2.6 ^a	92±9.1 ^a	89.6±8.8 ^a	82.4±5.0 ^a
			翌年	0	0	0	0	3.0±0.9 ^a	5.3±1.1 ^a
奉节	石灰性黄壤	8.3	当年	16.3±2.5 ^a	14.2±1.20 ^b	3.7±0.4 ^c	90.0±9.1 ^a	89.3±8.8 ^a	83.5±8.6 ^a
			翌年	0	0	0	0	5.4±1.2 ^a	7.3±1.5 ^a

注:上标字母不同代表不同高程下种子累积萌发率或幼苗存活率数据差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

在播种当年 9 月底,萌芽后的水桦幼苗存活率都较高,最高达(96.0±9.0)%。翌年 3 月底,在高程 170 m 处无存活的水桦幼苗;在高程 175,178 m 处仅有少量植株存活,存活率最高仅(9.5±2.2)%。翌年 9 月底,在高程 170,175 m 处水桦幼苗存活率均为 0;高程为 178 m 的区域虽未经水淹,然而此处植株存活率也为 0。

2.2 生长分析

2.2.1 成活率变化 两年生水桦幼苗在消落带种植后,当年 9 月底调查结果如下:在高程 170,175 m 处水桦的成活率分别为 96%,95%。2015 年 5 月调查则发现,两处水桦的成活率分别降至 87%,91%。

2.2.2 株高变化 如图 1 所示,两年生水桦苗在消落带种植 4 年后,在 2015 年 5 月上旬进行测定,在高程 170,175 m 处生长的水桦株高分别为 6.22,6.95 m,两者差异具有统计学意义($p < 0.01$)。在春季出陆期到夏季枯水期期间,两处水桦株高的增长量分别为 0.42,0.63 m,两者差异具有统计学意义($p < 0.01$)。在夏季枯水期到秋季蓄水前期期间,两处水桦株高的增长量分别为 0.25,0.31 m,两者差异不具有统计学意义。此外,2015 年两处水桦株高的年增长量分别为 0.67,0.94 m,两者差异具有统计学意义($p < 0.01$)。

2.2.3 地径变化 如图 2 所示,在春季出陆时期,消落带区域中高程 170,175 m 处生长的水桦地径分别为 8.37,9.01 cm,两者差异具有统计学意义($p < 0.01$)。在春季出陆期到夏季枯水期期间,两处水桦地径的增长量分别为 0.23,0.49 cm,两者差异具有统计学意义($p < 0.05$)。在夏季枯水期到秋季蓄水前期期间,两处水桦地径的增长量分别为 0.11,0.14 cm,两者

表 2 三峡库区消落带不同高程的土壤田间持水量

Tab. 2 Soil field capacity in different elevation in hydro-fluctuation belt in Three Gorges reservoir

消落带地点	不同高程的土壤田间持水量/%		
	170 m	175 m	178 m
万州	29.22±51.64 ^a	24.48±24.29 ^a	23.38±9.75 ^b
开州	31.14±31.52 ^a	30.17±18.67 ^a	26.04±10.38 ^b
忠县	28.54±35.22 ^a	24.96±14.36 ^a	22.7.8±6.52 ^b
奉节	25.84±19.64 ^a	23.56±32.51 ^a	21.74±20.35 ^a

注:上标字母不同代表同一地点不同高程下的土壤田间持水量数据差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

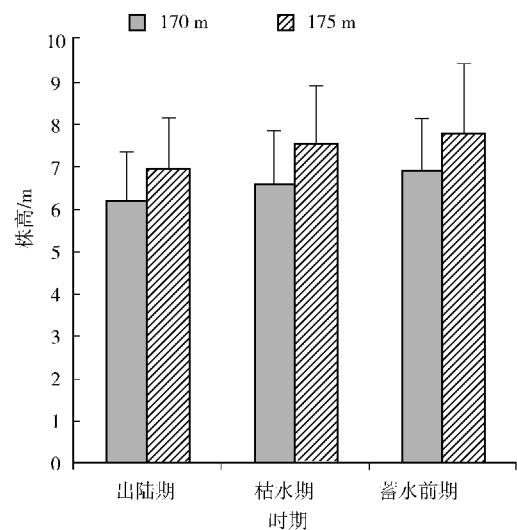


图 1 水桦株高年变化

Fig. 1 Annual variation of *B. nigra*'s height

差异不具有统计学意义。2015 年两处水桦地径的年增长量分别为 0.34,0.63 cm,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.01$)。

2.2.4 冠幅变化 图 3 显示,在春季出陆时期,消落带区域内高程 170,175 m 处生长的水桦冠幅分别为 7.1,9.0 m,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.01$)。在春季出陆期到夏季枯水期期间,两处水桦的冠幅冠幅的增长量分别为 0.5,0.8 m,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.05$)。在夏季枯水期到秋季蓄水前期期间,两处水桦冠幅的增长量分别为 0.3,0.4 m,两者差异不具有统计学意义。2015 年两处水桦冠幅的年增长量分别为 0.8,1.2 m,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.01$)。

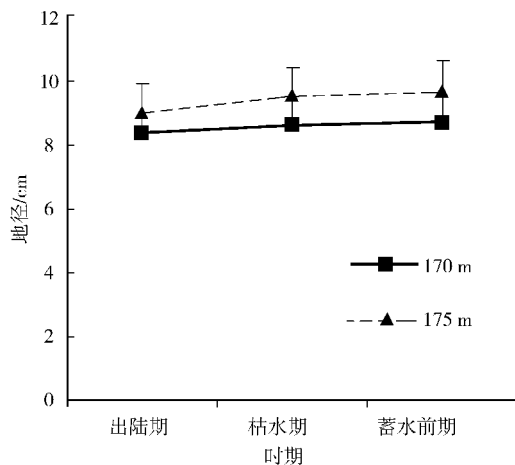


图 2 水桦地径年变化

Fig. 2 Annual variation of *B. nigra*'s ground diameter

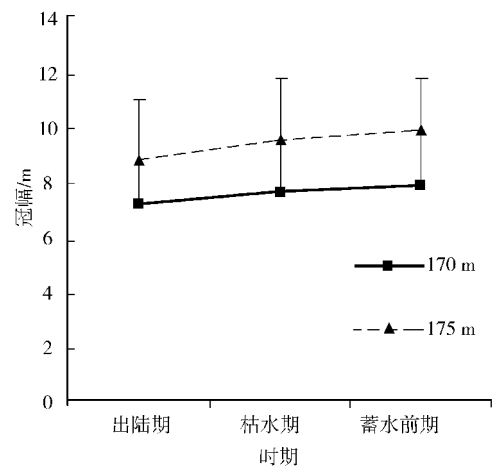


图 3 水桦冠幅年变化

Fig. 3 Annual variation of *B. nigra*'s crown width

2.3 净光合速率日变化分析

消落带区域中高程为 170,175 m 处生长的水桦净光合速率日变化如图 4 所示。在春季出陆期,水桦的净光合速率较低,两处水桦的日均净光合速率分别为 $1.16, 9.74 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.01$)。两者净光合速率日变化趋势也基本一致:净光合速率从早晨开始逐渐增大,从中午开始逐渐降低,到 14:00 出现光合“午休”现象,随后逐渐增大,在 16:00 达到一天中的最大值。在夏季枯水期,两处水桦的日均净光合速率分别为 $26.52, 26.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,两者差异无统计学意义。两者净光合速率日变化趋势仍然保持基本一致:净光合速率从早晨逐渐增大,在 8:00—10:00 大幅增加,在 10:00 达到一天中的最大值,在 12:00 出现光合“午休”现象,随后逐渐降低,呈单峰曲线变化。在秋季蓄水前期,两处水桦的日均净光合速率分别为 $23.10, 14.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,两者差异具有统计学意义 ($p < 0.05$)。高程 170 m 处生长的水桦净光合速率日变化趋势为:净光合速率从 6:00 开始逐渐升高,在 10:00 达到整个的最大值,在 12:00 出现光合“午休”现象,在 16:00 达到一天中的最大值,呈双峰曲线变化。高程 175 m 处生长的水桦的净光合速率日变化趋势则表现为:净光合速率从 6:00 开始逐渐增大,在 14:00 达到一天中的最大值,呈单峰曲线变化。

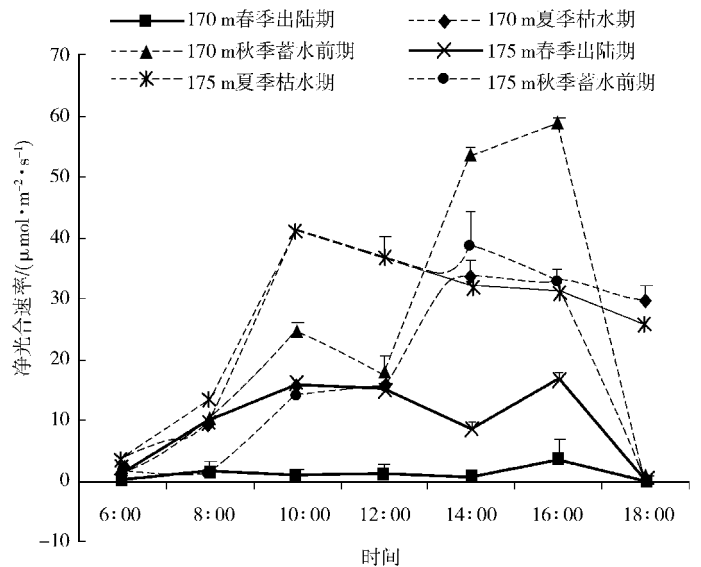


图 4 水桦净光合速率日变化

Fig. 4 *B. nigra*'s net photosynthetic rate

2.4 开花结实情况

从表 3 可知, 高程 170 m 处生长的水桦在不同观察年份均未见有开花结实。高程 175 m 处生长的水桦从 2013 年开始开花, 平均开花数和平均结实数分别为 (3.2 ± 1.2) 朵, 0 个。随着水桦不断生长, 开花结实数逐年增多, 2014 年水桦平均开花数和平均结实数分别为 (20.4 ± 2.8) 朵, (4.3 ± 1.6) 个; 2015 年, 这两个指标分别为 (34.5 ± 4.2) 朵, (7.2 ± 2.4) 个。然而总的看来, 高程 175 m 处生长的水桦平均开花朵数和平均结实个数仍然较少, 且果实掉落后林下也未见种子萌发及新苗长出。

表 3 水桦开花结实情况

Tab. 3 Conditions of *B. nigra*'s flowering and bearing fruit

年份	不同高程平均开花数/朵		不同高程平均结实数/个	
	170 m	175 mm	170 m	175 m
2011	0	0	0	0
2012	0	0	0	0
2013	0	3.2 ± 1.2	0	0
2014	0	20.4 ± 2.8	0	4.3 ± 1.6
2015	0	34.5 ± 4.2	0	7.2 ± 2.4

3 讨论与结论

水桦种子在人工控制条件下累积萌芽率最高可达 $(87 \pm 5)\%$; 在三峡库区消落带自然条件下的水桦种子累积萌芽率则较低, 最高为 $(31.2 \pm 4.1)\%$ (水稻土), 最低为 $(3.7 \pm 0.4)\%$ (石灰性黄壤)。不同高程同一土壤条件下的水桦种子累积萌芽率也有所不同, 随着播种高程的增加, 种子累积萌芽率降低。温度、光照、土壤水分等因素都可以影响种子萌发^[15-18]。三峡库区消落带水库两岸地形陡峭, 坡度在 15° 以上的土地面积占土地总面积的 74% 且相对高差大; 同时, 消落带土壤有机质含量少, 结构差, 水稳定性不好。因此, 消落带上的植被常受到自然干旱的胁迫^[19-23]。此外, 高程越高, 出陆时间越长, 土壤含水量越低。本研究中, 高程 170, 175, 178 m 处的土壤田间持水量随着高程增加而减小, 而较高的田间持水量有利于水桦种子的萌发^[24-25]。秋季播种的水桦种子在高程 178, 175, 170 m 处分别经过 0, 2, 97 d 水淹(水淹天数根据中国长江三峡集团官网公布的三峡水库水位数据统计), 翌年退水后, 各高程、各土壤条件下均未观察到水桦种子萌发, 累积萌芽率均为 0。因此, 在三峡库区消落带冬季播种水桦种子不能萌芽。

水桦种子萌发后幼苗的存活率在淹水前较高, 可达 $(96.0 \pm 9.0)\%$; 在高程 175 m 处的幼苗经水淹、退水后, 仅有少量存活; 到了 9 月底, 幼苗则全部死亡。其中原因是: 消落带退水后, 大量杂草迅速生长, 丛生杂草高的可达 1.8 m, 很快就将整个消落带土地严密覆盖; 高程为 178 m 的区域虽未经水淹, 但也长满杂草, 水桦苗被高而浓密的杂草遮盖, 无法接受光照。因此, 无人工干预条件下在消落带进行植被恢复, 低矮的苗木将由于杂草丛生而难以存活。

种植在三峡库区消落带高程 170, 175 m 处的两年生水桦苗株高已有 1 m 左右, 当年调查成活率高达 95%。经历 4 年反季节水淹后, 2015 年 5 月调查, 高程 170 m 处的水桦成活率为 87%, 高程 175 m 处的水桦成活率为 91%。可见在消落带植被恢复中, 移栽木本植物宜用株高较高的苗木, 这有利于提高移栽苗木的成活率。

在高程 175 m 处生长的水桦在株高增长量、地径增长量、冠幅增长量方面均超过了在高程 170 m 处生长的水桦, 可见消落带冬季淹水时间长短对水桦生长有明显影响。已有研究表明, 水淹处理会抑制植株的生长^[26-28], 在 170 m 高程处生长的水桦植株冬季被水淹 97 d, 长期缺氧的环境导致水桦产生无氧呼吸, 消耗了更多的光合产物, 因此此处水桦的生长状况比高程 175 m 处生长的水桦差。

对本研究中不同高程处生长的水桦苗在 3 个研究时期的日均净光合速率分别加以平均, 可发现在高程 170 m 处生长的水桦的这一指标比在高程 175 m 处生长的水桦要高(两者分别为 $16.93, 16.84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。其中原因可能是水桦通过在生长期增强光合能力、积累更多的有机物质, 弥补由于冬季水淹而产生无氧呼吸的物质消耗, 以此来适应三峡库区消落带的特殊生境^[29-32]。有研究表明^[33], 当植物处于过多的水分环境时, 将增强生理活性, 保持或提高表观光能利用效率和表观 CO_2 利用效率, 合成更多的光合产物以满足呼吸速率提高的需要, 克服根部处于缺氧的环境条件以及过多水分带来的不利影响。当遭遇逆境或部分器官受损时, 植物的适应性越强, 补偿生长能力就越强^[34]。当根系遭遇水淹胁迫时, 植株把更多的能量用于植株地上部分的生长对适应水淹环境来说无疑是有益的^[35-36]。消落带中高程 170 m 处生长的水桦光合作用略强于高程 175 m 处生长的水桦, 说明水桦可通过增强生长期的光合能力, 尽可能积累更多有机物质, 从而在一定程度上补偿冬季淹水对生长的影响, 表现出水桦在三峡库区消落带的适应性。

植株的生长能力和光合作用能力是评价植物在某一生境中适应能力的重要指标。本研究结果初步显示, 引

种植物水桦能适应三峡库区消落带特殊的生境,这对于三峡库区消落带受损生态系统植被恢复及种群构建具有积极的作用^[37-38]。但在本研究中,水桦也出现了在消落带的自然萌芽率低、开花结实数少、果实掉落后林下未见有新苗萌发等情况,说明水桦种群自我更新能力弱。然而这一结果也表明,引种植物水桦在三峡库区消落带种植至今,未表现出生态入侵性。水桦能否能在更长的时期内适应三峡库区消落带特殊生境,是否具有生态入侵性,是否可作为三峡库区消落带恢复树种加以推广,还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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.
SU W C, YANG H, LUO Y X, et al. Eco-environmental problems of the water-level-fluctuating zone in Three-gorges reservoir and their counter measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 196-198.
- [2] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,等.消落带研究进展[J].林业科学,2010,37(3):1-9.
CHENG R M, WANG X R, XIAO W F, et al. Advances in studies on water-level-fluctuation zone[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 37(3): 1-9.
- [3] STONE R. Three Gorges dam: into the unknown[J]. Science, 2008, 5889(321): 628-632.
- [4] 滕衍行,马利民,夏四清.三峡库区消落带植被生态系统重建的研究[C]//2005 中国可持续发展论坛-中国可持续发展研究会 2005 年学术年会论文集(下册).上海:同济大学出版社,2005:196-200.
TENG Y X, MA L M, XIA S Q. Study on the reconstruction of vegetation ecosystem in the Three Gorges reservoir area[C]//Chinese Society for Sustainable Development. 2005 China sustainable development forum-China sustainable development research association (II). Shanghai: Tongji University Press, 2005: 196-200.
- [5] 戴方喜,许文年,刘德富,等.对构建三峡库区消落带梯度生态修复模式的思考[J].中国水土保持,2006(1):34-36.
DAI F X, XU W N, LIU D F, et al. Consideration on the construction of gradient ecological restoration mode in the hydro-fluctuation belt in Three Gorges reservoir area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(1): 34-36.
- [6] 陈芳清,谢宗强.三峡库区濒危植物疏花水柏枝的生理生化特性研究[J].广西植物,2008,28(3):367-372.
CHEN F Q, XIE Z Q. Physiological and biochemical characteristics of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges reservoir area[J]. Guihaia, 2008, 28(3): 367-372.
- [7] 马利民,唐燕萍,张明,等.三峡库区消落区几种两栖植物的适生性评价[J].生态学报,2009,29(4):1885-1892.
MA L M, TANG Y P, ZHANG M, et al. Evaluation of adaptability of plants in water-fluctuation-zone of the Three Gorges reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1885-1892.
- [8] DENNIS F W. Ecological issues related to wetland preservation, restoration, creation and assessment[J]. Science of the Total Environment, 1999, 240(1/2/3): 31-40.
- [9] LOWRANCE R, HUBBARD R K, WILLIAMS R G. Effects of a managed three zone riparian buffer system on shallow groundwater quality in the Southeastern Coastal plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, (21): 212-219.
- [10] NAIMAN R J. Riparian areas: rain forests-Noah America, wetland management, biotic communities[J]. Bioscience, 2000, 50(11): 4-20.
- [11] 冯义龙,先旭东,莫正国.库区消落带植物群落恢复的植物选择—以奉节县竹衣河为例[J].南方农业,2008,2(12): 68-70.
FENG Y L, XIAN X D, MO Z G. Plant selection for restoration of plant communities in reservoir area—a case study of Zhuyihe in Fengjie county[J]. South China Agriculture, 2008, 2(12): 68-70.
- [12] 马菲,邵呈龙,刘芸.三峡库区松软堆积型消落带植被恢复引种可行性分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,35(6):169-179.
MA F, SHAO C L, LIU Y. Feasibility study on introduction of promising plants for revegetation in softly accumulative hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2011, 35(6): 169-179.
- [13] 娄利华,陈桂芳,罗韧.水桦引种育苗技术试验初报[J].重庆林业科技,2010(1):33-34.
LOU L H, CHEN G F, LUO R. Report on the introduction of *Betula nigra* seedling technology test[J]. Journal of Chongqing Forestry Science and Technology, 2010(1): 33-34.
- [14] 袁娜娜.室内环刀法测定土壤田间持水量[J].中国新技术新产品,2014(9):184.
YUAN N N. Using cutting ring method to determine soil moisture content in soil interior[J]. China New Technologies and Products, 2014(9): 184.
- [15] 张凤娟,李继泉,徐兴友,等.环境因子对黄顶菊种子萌发的影响[J].生态学报,2009,29(4):1947-1953.
ZHANG F J, LI J Q, XU X Y, et al. Influence of environmental factors on seed germination of *Flaveria bidentis* (L.) Kuntza[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1947-1953.
- [16] 申建红,曾波,类淑桐,等.三峡水库消落区4种一年生植

- 物种子的水淹耐受性及水淹对其种子萌发的影响[J].植物生态学报,2011,35(3):237-246.
- SHEN J H,ZENG B,LEI S T,et al.Seed submergence tolerance of four annual species growing in the water-level-fluctuation zone of Three Gorges reservoir, China, and effects of long-term submergence on their seed germination[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(3):237-246.
- [17] 王进,张勇,颜霞,等.光照、温度、土壤水分和播种深度对披针叶黄华种子萌发及幼苗生长的影响[J].草业科学,2011,28(9):1640-1644.
- WANG J,ZHANG Y,YAN X,et al.Influence of light, temperature,soil moisture and sowing depths on the seed germination and seedling growth of *Thermopsis lanceolate* [J].Pratacultural Science,2011,28(9):1640-1644.
- [18] CHACHALIS D,REDD K N.Factors affecting *Campsis radicans* seed germination and seedling emergence[J].Weed Science,2000,48(2):212-216.
- [19] 贺秀斌,谢宗强,南宏伟,等.三峡库区消落带植被修复与蚕桑生态经济发展模式[J].科技导报,2007,25(23):59-63.
- HE X B,XIE Z Q,NAN H W,et al.Developing ecological economy of sericulture and vegetation restoration in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir [J].Science and Technology Review,2007,25(23):59-63.
- [20] 裴廷权,王里奥,韩勇,等.三峡库区消落带土壤剖面中重金属分布特征[J].环境科学研究,2008,21(5):72-78.
- PEI T Q,WANG L A,HAN Y,et al.Distribution characteristics form soil profile heavy metal of water-level-fluctuating zone in Three Gorges reservoir area[J].Research of Environmental Sciences,2008,21(5):72-78.
- [21] 何太蓉,杨达源,蔡运龙.长江三峡库区不同坡段坡地土壤风化特征[J].山地学报,2010,28(3):283-287.
- HE T R,YANG D Y,CAI Y L.Weathering characteristics of soil on different slope sections in Three Gorges reservoir area based on XRD[J].Journal of Mountain Science,2010,28(3):283-287.
- [22] 康义,郭泉水,程瑞梅,等.三峡库区消落带土壤物理性质变化[J].林业科学,2010,46(6):1-5.
- KANG Y,GUO Q S,CHENG R M,et al.Changes of the soil physical properties in hydro-fluctuation belt of the Three Gorges reservoir[J].Scientia Silvae Sinicae,2010,46(6):1-5.
- [23] 徐泉斌.三峡库区消落带土壤结构特征研究—以重庆云阳、开县小江流域为例[D].重庆:西南大学,2010.
- XU Q B.Study on characteristics of soil structure for the water level-fluctuating zone in Three Gorges reservoir area: a case study in Xiaojiang basin Yunyang and Kaixian Chongqing[D].Chongqing:SouthwestUniversity,2010.
- [24] 王欣,高贤明.模拟水淹对三峡库区常见一年生草本植物种子萌发的影响[J].植物生态学报,2010,34(12):1404-1413.
- WANG X,GAO X M.Effects of simulated submergence on seed germination of four common annual herbs in the Three Gorges reservoir region, China[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(12):1404-1413.
- [25] 陶敏,鲍大川,江明喜.三峡库区 9 种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义[J].生态学报,2011,31(4):906-913.
- TAO M,BAO D C,JIANG M X.Effects of submergence on seed germination of nine annual plant species in the Three Gorges reservoir region and their implication to vegetation restoration[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(4):906-913.
- [26] KOZLOWSKI T T.Responses of woody plants to flooding and salinity[J].Three Physiology,1997,1(7):129-173.
- [27] PEZESHKI S R.Wetland plant responses to soil flooding[J].Environmental and Experimental Botany,2001,46(3):299-312.
- [28] MIELKE M S,ALMEIDA A A F D,GOMES F P,et al.Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth responses of *Genipa americana* seedlings to soil flooding[J].Environment and Experimental Botany,2003,50(3):221-231.
- [29] 黄小辉,刘芸,李佳杏,等.水分胁迫对三峡库区消落带桑树幼苗生理特性的影响[J].林业科学,2012,48(12):122-127.
- HUANG X H,LIU Y,LI J X,et al.Effects of water stress on physiological characteristics of mulberry (*Morus alba*) seedlings in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges reservoir area[J].Scientia Silvae Sinicae,2012,48(12):122-127.
- [30] 刘芸.桑树在三峡库区植被恢复中的应用前景[J].蚕业科学,2011,37(1):93-97.
- LIU Y.Application prospect of mulberry plants to vegetation restoration in Three Gorges reservoir area[J].Science of Sericulture,2011,37(1):93-97.
- [31] 张建军,任荣荣,朱金兆,等.长江三峡水库消落带桑树耐水淹试验[J].林业科学,2012,48(5):154-158.
- ZHANG J J,REN R R,ZHU J Z,et al.Preliminary experimentation on flooding resistance of mulberry trees along the water-fluctuation belt of the Three Gorges reservoir [J].Scientia Silvae Sinicae,2012,48(5):154-158.
- [32] HUANG X H,LIU Y,LI J X,et al.The response of mulberry trees after seedling hardening to summer drought in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir areas [J].Environmental Science and Pollution Research International,2012,20(10):7103-7111.
- [33] 李昌晓,钟章成.池杉幼苗对不同土壤水分水平的光合生理响应[J].林业科学研究,2006,19(1):54-60.
- LI C X,ZHONG Z C.Photosynthetic physio-response of *Taxodium ascendens* seedlings to different soil water gradients[J].Forest Research,2006,19(1):54-60.

- [34] 赵威,王征宏.植物的补偿性生长[J].生物学通报,2008,43(3):12-13.
ZHAO W, WANG Z H. Compensatory growth of plants [J]. Bulletin of Biology, 2008, 43(3): 12-13.
- [35] 罗芳丽,曾波,陈婷,等.三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应[J].植物生态学报,2007,31(5):910-918.
LUO F L, ZENG B, CHEN T, et al. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix variegata* in the Three Gorges reservoir region of China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 910-918.
- [36] VISSER E J W, VOESENK L, VARTAPETIAN B B. Flooding and plant growth [J]. Annals of Botany, 2003, 91(2): 107-109.
- [37] 袁兴中,熊森,李波,等.三峡水库消落带湿地生态友好型利用探讨[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2011,28(4):23-25.
YUAN X Z, XIONG S, LI B, et al. On the eco-friendly utilization of littoral wetland of Three Gorges reservoir [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2011, 28(4): 23-25.
- [38] 袁兴中,熊摇森,刘摇红,等.水位变动下的消落带湿地生态工程—以三峡水库白夹溪为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(3):24-26.
YUAN X Z, XIONG Y S, LIU Y H, et al. Ecological engineering of drawdown wetlands based on water-level fluctuation-Baijia stream in the Three Gorges reservoir as a case study [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2012, 29(3): 24-26.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

The Seed Germination and Growth Characteristics of Introduced Plant *Betula nigra* in Hydro-fluctuation Belt of Three Gorges Reservoir Area

GAO Lan¹, WU Jingchun¹, XIONG Xingzheng¹, OU Yang¹, WANG Meng¹,
YUAN Guiqiong¹, ZHANG Wen¹, LIAO Jiabin¹, LIU Yun¹, REN Li²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;

2. Xiushan County Wuling Mountain Wetland Plants Engineering Research and Development Center, Xiushan Chongqing 409902, China)

Abstract: [Purposes] In order to scientifically evaluate the adaptability of introduced plant *Betula nigra* in hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir area, the germination and growth characteristics of *B. nigra* seeds were observed. [Methods] *Betula nigra* seeds were sowed two times in the Rangdu town of Wanzhou district, Pengxihe wetland nature reserve of Kaizhou district, Shibaozhai town of Zhongxian county, Zhuyihe of Fengjie county in Chongqing city. The effects of different soil types and elevation on the seed cumulative germination rate and survival rate were studied. Plant height, ground diameter, crown width, flowering and fruiting were investigated, photosynthetic parameters were measured. [Findings] 1) *B. nigra*'s seed germination under different soil conditions was different. 2) The survival rate of *Betula nigra* after seed germination was high, but all died after flooding. 3) Biennial seedling of *B. nigra* bloomed after two-year growth, but the number of flower and fruit was small. There's no seed germinated and no plants grew after the fruit dropped. The height of *B. nigra* which planted on the hydro-fluctuation belt of elevation 170 m and 175 m was 6.22 m, 6.95 m after four-year growth. There was a significant difference ($p < 0.05$). 4) The daily mean net photosynthetic rate of *B. nigra* at the elevation of 170 m increased gradually after outcrop in spring. It can increase up to $23.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in storage period in autumn. It was significantly higher than it in the elevation of 175 m ($14.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ($p < 0.05$). [Conclusions] *B. nigra*'s individual species can't grow naturally. Introduced plant *B. nigra* which planted on the hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir don't have ecological invasion by preliminary judgment. The length of flooding time in winter has a significant influence on the growth of *B. nigra*. But *B. nigra* can enhance photosynthesis ability to compensate the long-time effects of flooding on plant growth and finally it can adapt to the special environment of the anti-season flooding in hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir area.

Keywords: *Betula nigra*; introduction; cumulative germination rate; growth rate; photosynthetic rate; Three Gorges reservoir area

(责任编辑 方 兴)