

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.60786

黄睿智, 李明国, 魏景松, 谭成权, 李俊清. 极小种群濒危植物盐桦迁地保护研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(6): 786~794

Huang RZ, Li MG, Wei JS, Tan CQ, Li JQ. Study on ex-situ protection of endangered species of *Betula halophila* Ching ex P. C. Li[J].

Plant Science Journal, 2020, 38(6): 786~794

极小种群濒危植物盐桦迁地保护研究

黄睿智¹, 李明国², 魏景松³, 谭成权⁴, 李俊清^{1*}

(1. 北京林业大学, 森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714;
3. 烟台开发区自然资源和规划局, 山东烟台 264003; 4. 烟台市政建设集团有限公司, 山东烟台 265500)

摘要: 盐桦 (*Betula halophila* Ching ex P. C. Li) 是我国 120 个极小种群野生植物之一, 仅分布于我国新疆阿勒泰地区。为了解其在迁地保护过程中对环境的适应性和沿海强风环境等对幼苗生长的影响, 以山东烟台迁地保护基地内两个盐桦居群为材料, 对其 3 年的生长量、果实性状、叶性状以及叶片生态化学计量等进行研究, 利用独立样本 *t* 检验和贝叶斯方差分析对山东迁地保护两个居群和新疆迁地保护居群进行比较分析。结果显示, 经过 3 年的生长, 盐桦在烟台地区适应性良好, 能在一个生长周期结出果实, 设置风障以后盐桦生长速度显著升高, 表明在幼苗敏感期设置风障可以为幼苗越冬提供保障, 同时风障营造的相对稳定的环境提高了盐桦对资源环境的利用能力。

关键词: 极小种群野生植物; 迁地保护; 盐桦; 风障

中图分类号: Q948.13

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)06-0786-09

Study on ex-situ protection of endangered species of *Betula halophila* Ching ex P. C. Li

Huang Rui-Zhi¹, Li Ming-Guo², Wei Jin-Song³, Tan Cheng-Quan⁴, Li Jun-Qing^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Forest Resources Ecosystem Process, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Survey and Design Institute of State Forestry Administration, Beijing 100714, China; 3. Natural Resources and Planning Bureau of Yantai Development Zone, Yantai, Shandong 264003, China; 4. Yantai Municipal Construction Group Co., Ltd., Yantai, Shandong 265500, China)

Abstract: *Betula halophila* Ching ex P. C. Li is one of the 120 plant species with extremely small populations (PSESP) in China and is only distributed in the Altay region of Xinjiang. To understand the effects of environmental adaptation and strong coastal winds on seedling growth during ex-situ conservation, we investigated two populations of *B. halophila* at the ex-situ conservation base in Yantai, Shandong. Plant traits, leaf traits, and leaf biochemical stoichiometry were studied. Independent sample *t*-test and Bayesian analysis of variance were used to compare and analyze the ex-situ conservation populations in Shandong and Xinjiang. Results showed that after three years of growth, *B. halophila* exhibited good adaptability in Yantai and bore fruit in one growth cycle. Establishing wind barriers can provide protection for seedlings during winter. At the same time, the relatively stable environment created by wind barriers could enhance the utilization of *B. halophila* resources and the environment.

Key words: Plant species with extremely small populations; Ex-situ conservation; *Betula halophila*; Wind barrier

收稿日期: 2020-03-15, 退修日期: 2020-05-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503106)。

This work was supported by a grant from the National Key Research and Development Program (2016YFC0503106).

作者简介: 黄睿智(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为珍稀植物迁地保护(E-mail: 1549080873@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: lijq@bjfu.edu.cn)

极小种群野生植物 (Plant species with extremely small populations, PSRESP) 是急需优先抢救的国家重点保护濒危物种, 其分布地区狭窄或间断分布, 现存个体数少于最小可存活种群数量, 天然更新差, 面临极高的灭绝风险^[1-4]。为确保这些脆弱种群及其携带的独特基因资源得以保存, 国家启动了“全国极小种群野生植物拯救保护工程”^[5], 2012年国家林业局与国家发展与改革委员会公布了我国120种极小种群野生植物^[6], 这些植物都有极高的灭绝风险。由于人类活动和全球气候变化, 导致许多适宜生物分布的区域日渐萎缩^[7], 因此在加强对濒危植物就地保护的同时, 选择适宜的地点进行迁地保护对极小种群野生植物种群的保护和延续具有重要意义。

山东省是个沿海大省, 拥有3000多公里海岸线, 占全国海岸线长度的1/6, 我国山东沿海地区从20世纪中期便引种黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.) 作为沿海防护林, 面积达7万多公顷, 占山东省沿海防护林面积的70%以上, 黑松防护林的引入有效改善了沿海沙地风沙肆虐现象, 形成了一道保障民生的生态屏障, 然而经过近半个世纪的生长, 大部分黑松防护林已进入过熟林阶段, 老化、同龄状态严重、林木单一, 加之现有的黑松海防林较差的立地条件、粗放管理和病虫害导致海防林出现了退化, 严重影响其作为海防林的生态作用^[8, 9], 近年来国内爆发的松材线虫病造成了大量松树死亡, 研究发现, 感染松材线虫病后黑松的光合作用受到严重影响^[10], 广东汕头市也出现了因感染松材线虫而死亡的黑松^[11]。因此引入一种能够抵抗沿海台风、海潮、海雾的恶劣气候条件和松材线虫的树种作为沿海防护林备选树种具有重要意义。

盐桦 (*Betula halophila* Ching ex P. C. Li) 为桦木科桦木属落叶灌木, 国家Ⅱ级濒危植物, 是120种极小种群野生植物之一^[12], 也是稀有木本盐生植物^[13], 最早由我国著名植物学家秦仁昌教授在新疆阿勒泰县境内克朗河北岸巴里巴盖乡盐碱滩涂发现并确定为新种, 其具有极强的耐盐性, 是西北干旱、半干旱和盐碱地造林的好树种^[14], 同时也是提取抗盐基因的优良树种^[15]。与相似的耐盐植物小叶桦 (*Betula microphylla* Bunge) 的耐盐阈值

0.5% Na 相比, 盐桦的耐盐阈值可达到1.5% Na以上, 比一般木本植物的耐盐性高出几倍甚至数十倍^[16], 还具有生长快和耐极端低温等特征。目前有关盐桦的研究主要集中在幼苗的组织培养、快速繁殖、盐胁迫对幼苗光合作用和生长的影响^[17-19]等方面。由于全球气候变化和人类放牧活动导致盐桦濒临灭绝, 如不对其进行迁地保护, 我们将失去这个珍稀资源。因此急需科学地对盐桦进行迁地保护研究, 并为北方沿海地区提供潜在的防护林树种。

我国山东沿海地区海风大、海雾重、土壤贫瘠、盐碱度高^[20, 21], 可考虑在烟台沿海地区对盐桦进行迁地保护研究。为此, 本实验将盐桦幼苗移栽至烟台距海岸线不足2 km的福山区进行迁地保护试验, 在幼苗敏感期设置风障, 对生长量、果实性状、叶片性状和生态化学计量等进行研究, 并对其适应性进行评价, 以期为盐桦的迁地保护、引种和扩繁提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

盐桦原产于新疆阿勒泰县巴里巴盖乡一片盐碱沼泽地上(87°N, 47°E), 海拔850 m, 分布区属温带干旱大陆性气候, 干旱少雨, 蒸发量大, 昼夜温差大, 冬季寒冷, 冬春多风, 年均气温7.8°C, 无霜期139 d, 极端最高温41.3°C, 极端最低温-36.4°C, 年均降水量90.9 mm, 年均蒸发量1662 mm。

新疆迁地保护盐桦位于乌鲁木齐市新疆林业科学研究院植物园内(87°N, 43°E), 海拔850 m, 该地区极端高温为40.5°C, 极端低温为-32.8°C, 年均温6.8°C, 年均降水量234 mm, 年蒸发量2219 mm, 属于典型的荒漠气候, 土壤有机质含量为6.9 g/kg, 属荒漠土^[22]。

山东迁地保护区设在烟台市大季家镇(121°N, 37°E), 海拔40 m, 属温带季风气候, 与同纬度内陆地区相比, 该迁地保护区雨水适中, 空气湿润, 气候温和, 年均气温12.5°C, 年均降水量737 mm。土壤有机质、全氮、全磷、有效磷分别为13.6 g/kg、0.088%、0.28%、0.5 mg/kg, 土壤类型为棕壤, 呈弱酸性。

1.2 植物材料

野生盐桦种群数量十分稀少,仅生于新疆阿勒泰巴里巴盖乡艾比湖盐碱滩涂,因此以新疆林业科学研究院植物园内迁地保护的盐桦作为对照。山东迁地保护盐桦位于烟台市福山区大季家迁地保护园内,经过3年生长于2019年第1次开花结果。

于2016年9月在新疆采集种子,当年10月在北京市中国林业科学研究院内进行育苗,2017年3月移栽至烟台市大季家镇苗圃,数量为196株,为防止冬季沿海冷风以及台风对幼苗造成伤害,在迁地保护园盐桦居群北侧设置铁质风障,高度为2.5 m,植株的东、西、北侧不包围。实验设1个对照(CK)和1个风障处理(FZ),各98株。

2019年8月对山东迁地保护区风障、对照组两个盐桦居群和新疆迁地保护盐桦进行叶片采集;随机挑选6颗盐桦(对照组和风障处理各3组),在其根系附近距离植株10 cm内采集20 cm深的土壤样品,每株取5份混合,每份200 g,去除土样中枯落物及腐殖质,装入自封袋(编号)带回实验室。2019年9月对山东迁地保护盐桦和新疆迁地保护盐桦的成熟果实进行采集,收集种子风干储藏;于10月中旬对新疆迁地保护盐桦枯叶进行采集;11月上旬对山东迁地保护盐桦的枯叶进行采集。

1.3 指标及其测定方法

1.3.1 迁地保护盐桦生长量测定

利用游标卡尺、胸径尺和卷尺对山东迁地保护园内两个居群随机各选取20株盐桦测定株高、基径、冠幅以及胸径。

1.3.2 叶形及果实形状测定

将8月和9月采集的叶片进行编号,利用佳能扫描仪扫描成PDF文件,将PDF文件转化成具有固定分辨率的JPG图片,将JPG图片导入Image J软件,对叶片的叶长、叶宽、叶周长、叶面积和叶柄长进行测量,将测量好的叶片放入烘箱,105℃杀青15 min,然后放入烘箱85℃烘干至恒重,测量干重。利用万分之一天平和游标卡尺对果序重、果序长和果序直径进行测量,然后将果序放置荫凉处自然风干,将风干果实捻开,测量种子千

粒重。

1.3.3 叶片和土壤化学元素测定

将烘干叶片用粉碎机粉碎,过100目筛,用于化学元素测定。称取叶片粉末样品0.40 g于消解管内,加入5 mL浓硫酸于消解仪内进行消解,温度设为300℃,并加入1 mL过氧化氢,重复几次直至消解液澄清,过滤定容至100 mL备用;称取土壤样品0.50 g于消解管内,加入浓硫酸,于消解仪上进行消解,滴加2 mL高氯酸,重复几次直至消解液澄清,将消解液过滤定容至100 mL备用。利用AA3型连续流动分析仪测量全N和全P含量。

1.3.4 数据处理

统计各性状数据,利用SPSS 19.0对山东迁地保护和新疆迁地保护居群的叶片性状、果实性状、生长量、土壤和叶片元素含量等性状进行独立样本t检验,分析各性状间的差异,显著性水平为 $P < 0.05$,数据保留3位小数,利用Origin 8.0软件作图。

养分回收率(Resorption efficiency, RE) = (成熟叶养分含量-掉落叶养分含量)/成熟叶养分含量 × 100%。

2 结果与分析

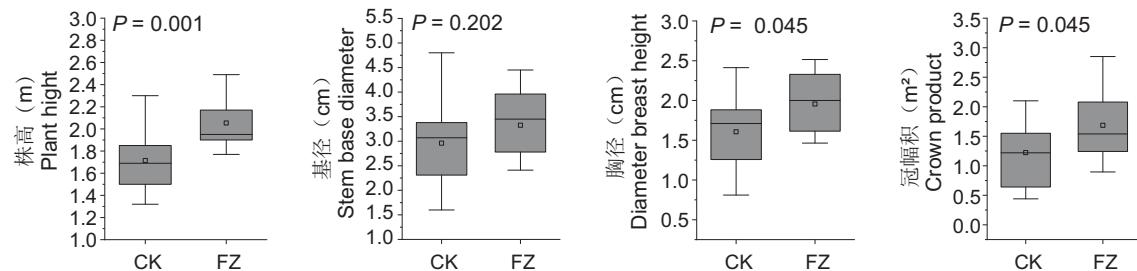
2.1 风障对迁地两居群生长量的影响

研究结果显示,经过3年生长,山东迁地保护园对照组(CK)盐桦树高、基径、胸径和冠幅积(冠幅长×冠幅宽)分别为1.715 m、2.961 cm、1.600 cm和1.223 m²;风障处理(FZ)盐桦的树高、基径、胸径和冠幅积分别为2.067 m、3.325 cm、1.946 cm和1.685 m²,相比对照组盐桦各项指标均有增大(图1)。t检验结果显示,树高差异极显著($P = 0.001$),胸径($P = 0.045$)和冠幅积($P = 0.045$)差异显著,实验组盐桦的基径、胸径、株高和冠幅积的变异系数均低于对照组(表1)。

2.2 山东迁地保护与新疆迁地保护盐桦的叶片及果实性状比较

2.2.1 果实性状比较

通过对山东迁地保护与新疆迁地保护盐桦的果实性状进行统计分析,结果显示(表2),山东未设



$P < 0.01$ 为差异极显著; $P < 0.05$ 为差异显著。□: 25%~75%; I: 非离群值范围。

$P < 0.01$: Difference is extremely significant; $P < 0.05$: Difference is significant; □: 25%~75%; I: Non-outlier range.

图 1 实验组(FZ)和对照组(CK)两个居群盐桦的基径、胸径、树高和冠幅积分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of base diameter, DBH, tree height, and crown products of *Betula halophila* in experimental (FZ) and control groups (CK)

表 1 实验组和对照组两个居群盐桦基径、胸径、树高和冠幅积分析

Table 1 Analysis of *Betula halophila* base diameter, DBH, tree height, and crown products of experimental and control groups from two populations

性状 Trait	居群 Population	均值 \pm 标准误 Mean \pm SE	标准差 SD	变异系数 VC	显著性 P
基径(cm) Base diameter	CK	2.961 \pm 0.231a	0.896	30.26%	0.202
	FZ	3.325 \pm 0.178a	0.689	20.72%	
胸径(cm) Breast diameter	CK	1.600 \pm 0.123a	0.477	29.81%	0.045
	FZ	1.946 \pm 0.089b	0.344	17.68%	
树高(m) Plant height	CK	1.715 \pm 0.071C	0.277	16.15%	0.001
	FZ	2.067 \pm 0.061c	0.237	11.47%	
冠幅积(m^2) Crown products	CK	1.223 \pm 0.130D	0.505	41.22%	0.045
	FZ	1.685 \pm 0.141d	0.545	32.34%	

Notes: CK: *Betula halophila* of control group; FZ: *Betula halophila* of experimental group. Same below.

表 2 盐桦果序性状统计学参数

Table 2 Statistical parameters of fruit sequence traits of *Betula halophila*

性状 Trait	居群 Population	均值 \pm 标准误 Mean \pm SE	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 SD	变异系数 VC
果序长(cm) Fruiting-cyme length	CK	2.082 \pm 0.060a	1.51	2.81	0.366	17.58%
	FZ	2.353 \pm 0.032b	1.98	2.63	0.175	7.44%
	XJ	2.421 \pm 0.052c	1.97	2.90	0.240	9.92%
果序直径(cm) Fruiting-cyme diameter	CK	0.765 \pm 0.011A	0.62	0.90	0.059	7.77%
	FZ	0.739 \pm 0.015A	0.58	0.91	0.080	10.83%
	XJ	0.900 \pm 0.010B	0.79	0.98	0.047	5.22%
果序重(g) Fruiting-cyme weight	CK	0.307 \pm 0.016AA	0.16	0.51	0.087	28.33%
	FZ	0.375 \pm 0.012Aa	0.25	0.52	0.064	17.07%
	XJ	0.45 \pm 0.017aa	0.31	0.61	0.079	17.56%
每序核果数 Drupe number per fruiting-cyme	CK	152 \pm 5.350BB	102	215	29.290	19.32%
	FZ	169 \pm 6.129Bb	121	242	33.570	19.86%
	XJ	204 \pm 6.270bb	145	256	28.740	14.09%
千粒重(g) Thousand seed weight	CK	0.459 \pm 0.019A	0.318	0.616	0.102	22.22%
	FZ	0.495 \pm 0.019A	0.361	0.707	0.100	20.20%
	XJ	0.496 \pm 0.015A	0.364	0.596	0.066	13.31%

Note: XJ: *Betula halophila* in Xinjiang.

置风障的迁地保护盐桦的果序长度、直径、果序重量、单个果序包含的种子数量和种子千粒重分别为2.177 cm、0.774 cm、0.335 g、160粒和0.459 g, 均低于新疆迁地保护盐桦, 其中果序长、果序直径、果序重量和单个果序包含的种子数量差异显著或极显著($P < 0.05$; $P < 0.001$; $P < 0.001$; $P < 0.001$)；山东迁地保护实验组盐桦的果序长度、果序重量、单个果序包含的种子数量和种子千粒重高于对照组, 其中实验组和对照组的果序长和果序重差异显著($P = 0.003$; $P = 0.002$)。山东迁地保护盐桦的果序性状种内变异程度均大于新疆迁地保护盐桦, 设置风障后, 果序长度、果序重和种子千粒重种内变异程度变小。

2.2.2 叶片性状比较

叶片性状比较结果显示(表3), 山东未设风障的迁地保护盐桦的叶长、叶宽、叶面积、叶柄长和叶干重均小于新疆迁地保护盐桦, 比叶面积大于新疆迁地保护盐桦, 其中叶长、叶面积、叶柄长和叶干重差异显著或极显著($P = 0.0001$; $P = 0.036$; $P = 0.0009$; $P = 0.0001$), 设置风障的山东迁地保护盐桦相比新疆迁地保护盐桦的叶长、叶宽、叶面积、叶柄长和叶干重均增大, 比叶面积减小, 其

中叶长差异极显著($P=0.0001$)。

2.3 山东迁地保护与新疆迁地保护居群叶片氮磷含量

山东迁地保护盐桦叶片氮磷含量显著高于新疆迁地保护居群, 山东迁地保护实验组、对照组盐桦叶片和新疆迁地保护盐桦叶片N含量分别为25.24、25.28、20.10 mg/g, 均高于全国N含量均值(18.60 mg/g)^[23]; 山东迁地保护实验组、对照组盐桦和新疆迁地保护居群叶片P含量分别为1.26、1.30、1.15 mg/g(图2), 其中新疆迁地保护盐桦叶片P含量略低于全国P含量均值(1.21 mg/g)^[23], 山东迁地保护两个居群盐桦叶片P含量均高于全国平均水平。山东迁地保护实验组的盐桦居群叶片氮、磷含量略低于对照组盐桦居群, 但差异性不显著, 说明风障处理对山东迁地保护两盐桦居群叶片氮、磷含量没有显著影响。冬季山东迁地保护盐桦对N、P的回收利用显著低于新疆迁地保护盐桦, 山东迁地保护风障和非风障盐桦氮磷比均高于17(表4), 结合Koerselman和Meuleman^[24]提出的理论表明山东迁地保护盐桦生长主要受磷元素限制。

表3 盐桦营养叶性状比较
Table 3 Comparison of characteristics of nutritional leaves of *Betula halophila*

居群 Population	叶长 LL (cm)	叶宽 LW (cm)	叶面积 LA (cm ²)	叶柄长 PL (cm)	叶干重 DW (g)	比叶面积 SLA (cm ² /g)
FZ	5.04 ± 0.08a	3.88 ± 0.07Aa	13.04 ± 0.46Bb	0.94 ± 0.03Ab	0.113 ± 0.004a	118.01 ± 4.00abc
CK	4.54 ± 0.07b	3.79 ± 0.06Aa	12.61 ± 0.36Bb	0.74 ± 0.03ab	0.107 ± 0.004ab	119.60 ± 2.90abc
XJ	5.29 ± 0.15c	4.12 ± 0.12Aa	14.69 ± 0.84bb	1.06 ± 0.04AB	0.117 ± 0.008b	129.12 ± 5.83abc

Notes: LL: Leaf length; LW: Leaf width; LA: Leaf area; PL: Petiole length; DW: Dry weight; SLA: Specific leaf area.

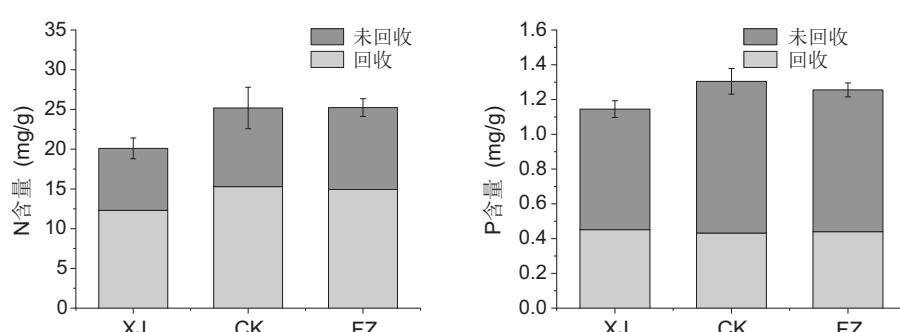


图2 山东迁地保护与新疆迁地保护居群盐桦叶片氮磷回收利用
Fig. 2 Recycling of nitrogen and phosphorus in *Betula halophila* leaves in Shandong and Xinjiang ex-situ conservation populations

表4 山东迁地保护与新疆迁地保护居群盐桦叶片氮磷含量、关系和回收利用率

Table 4 Content, relationship, and recycling utilization of nitrogen and phosphorus in leaves of *Betula halophila* from Shandong and Xinjiang ex-situ conservation populations

居群 Population	8月 August		11月 November		回收率 Recovery rate	氮磷比 N : P	
	N (mg/g)	P (mg/g)	N (mg/g)	P (mg/g)			
XJ	20.10a	1.15a	7.80a	0.69a	61.0	39.4	17.48a
CK	25.28b	1.30b	9.86b	0.87b	60.6	32.9	19.45b
FZ	25.24b	1.26b	10.34c	0.82b	59.0	35.0	20.03c

3 讨论

3.1 风障对盐桦生长的影响

幼苗形态建成期是植物最敏感的时期^[25]，是生长生活史的重要阶段，由于幼苗的光合能力较弱、根系不发达，相比成熟植株更容易受到不利环境的影响，从而影响幼苗的存活与生长。风障是指冬季设置在苗圃中起到防风和保温作用的屏障，被广泛应用于园林绿化、苗圃育种和防风固沙等生产过程中，它可以阻挡寒风，降低风速，同时可以阻挡风对植物的抽干作用^[26,27]、削弱风速、稳定气流和减少水分散失等作用^[28]。

本研究中山东迁地保护基地距离海岸线不足2 km，由于常受到自北而下的冷空气影响，冬季易形成大风天气和雪窝现象，春季和夏季也容易受到沿海大风和台风的影响，所以在引种初期设置风障来保证幼苗的生长，经过为期3年的迁地保护，发现设置风障后的盐桦具有更高的生长量，叶长、叶宽、叶周长和叶面积更大，果序长、直径和果实千粒重也更大，而各性状间的变异系数更小，这说明风障所营造的相对温和的环境提高了盐桦幼苗利用环境资源的能力。

3.2 山东迁地保护和新疆迁地保护盐桦叶片和果实性状比较

植物对环境的响应策略一直以来都是生态学研究的热点问题^[29]，叶片性状反映了植物对环境变化的响应策略^[30]。叶片是植物直接与环境接触的器官，其对环境的变化最为敏感，环境因子的变化会直接影响植物叶片各性状特征^[31]。较大的叶片面积表明植物具有更好的生理优势^[32]和适应环境的能力；比叶面积和叶干物质含量可以在一定程度上反映植物对环境资源的利用方式和能力，与环境适应对策关系密切，被认为是资源环境利用轴上的

一组最佳变量^[33]；比叶面积能够反映植物对资源获取和利用的权衡关系^[34]；种子的萌发是植物完成自我更新和延续后代的关键环节^[35]，其性状如长度、宽度、重量等也往往与环境的适应性和遗传多样性相关联，迁地保护能否获得成功的一项重要指标是植物能否完成“种子到种子”的生活史，所以种子或果实质量在一定程度上决定后代幼苗的适合度。

本研究通过对山东迁地保护盐桦和新疆迁地保护盐桦的叶片性状和果实性状进行比较，发现山东迁地保护盐桦叶片的叶长、叶宽、叶周长、叶面积、比叶重均小于新疆迁地保护盐桦，设置风障后的盐桦叶片各性状同生长量一样有增大的趋势，说明风障为盐桦提供了一个相对稳定的环境，提高了其对环境的适应能力。

3.3 山东迁地保护与新疆迁地保护盐桦生态化学计量比较

氮、磷是植物生长所必须的两种关键元素^[36]，作为植物细胞基本结构的重要组成成分，其在蛋白质和核酸的生成和转化过程中起到关键作用，两种元素的含量和关系会直接影响植物的生长发育^[37]。叶片是植物进行光合作用的器官，不同生活型植物叶片的氮、磷含量具有显著差异^[38]，而同一植物不同部位或者器官的氮、磷含量也不相同^[39]，依据生长速率假说，生长速率快的植物其RNA的合成速率和相关生物量积累较多，所以其对磷的需求更多。氮磷比(N:P)决定了植物光合作用的能力并影响植物的生长，依据生长速率假说，植物叶片氮磷比越高，年生长速率越低，因为当氮元素含量充足而磷元素含量较低时限制了植物的生长，同时，植物叶片氮、磷还会受到植物本身对元素的分配和生态系统中氮、磷含量的影响^[40]，所以当植物生长受到某种元素的限制时，可以人工添加某种

元素来促进植物的生长, 提高植物对环境的适应性。

本研究发现山东迁地保护盐桦叶片氮、磷元素含量均显著高于新疆迁地保护盐桦, 而设置风障对迁地保护盐桦叶片的氮、磷元素含量没有显著影响, 山东和新疆迁地保护盐桦叶片氮磷比均高于全国平均水平, 山东迁地保护盐桦叶片氮磷比均高于新疆迁地保护盐桦, 这说明其生长受到磷元素的限制可以通过施加磷肥来提高叶片磷元素的含量。对盐桦叶片氮磷元素回收利用的研究显示, 山东迁地保护盐桦对叶片氮、磷元素的回收利用有所降低, 风障盐桦叶片对磷元素的回收利用要高于非风障盐桦, 说明植物通过增加叶片对磷元素的回收来提高自身对营养元素的储备, 为来年春季的生长提供物质基础。

综上所述, 在遵循“气候相似论”的原则下对盐桦进行迁地保护, 第3年即能开花结果, 依据“从种子到种子”的标准, 盐桦的迁地保护成功与否只是时间问题。结合烟台迁地保护盐桦和新疆迁地保护盐桦叶性状、果实性状、叶片氮磷含量以及凋落叶氮磷含量的研究, 没有发现盐桦适应不佳的现象, 而在盐桦幼苗期设置风障显著提高了盐桦利用环境资源的能力, 因此从幼苗阶段生长来看, 在山东沿海对盐桦进行迁地保护是可行的。

参考文献:

- [1] 张则瑾, 郭焱培, 贺金生, 唐志尧. 中国极小种群野生植物的保护现状评估[J]. 生物多样性, 2018, 26(6): 572–577.
Zhang ZJ, Guo YP, He JS, Tang ZY. Conservation status of wild plant species with extremely small populations in China[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(6): 572–577.
- [2] 杨文忠, 向振勇, 张珊珊, 康洪梅, 史富强. 极小种群野生植物的概念及其对我国野生植物保护的影响[J]. 生物多样性, 2015, 23(3): 419–425.
Yang WZ, Xiang ZY, Zhang SS, Kang HM, Shi FQ. Plant species with extremely small populations (PSESP) and their significance in China's national plant conservation strategy[J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(3): 419–425.
- [3] 任海, 张QM, 鲁HF, 郭QF, 王J, 廖SG, 鲍HO. Wild plant species with extremely small populations require conservation and reintroduction in China[J]. *Ambio*, 2012, 41(8): 913–917.
- [4] 杨WZ, 张SS, 王WB. A sophisticated species conservation strategy for *Nyssa yunnanensis*, a species with extremely small populations in China[J]. *Biodivers Conserv*, 2017, 26(4): 967–981.
- [5] 刘德望. 推动我国极小种群野生植物工程化保护的对策思考[J]. 国家林业局管理干部学院学报, 2014, 13(4): 12–15, 22.
Liu DW. Countermeasure thoughts to promote engineering protection for wild plants of a tiny population in China[J]. *State Academy of Forestry Administration Journal*, 2014, 13(4): 12–15, 22.
- [6] 邓佳. 我国启动工程拯救保护极小种群野生植物[J]. 林业与生态, 2012(5): 47.
- [7] 吴军, 徐海根, 陈炼. 气候变化对物种影响研究综述[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 1–6.
Wu J, Xu HG, Chen L. A review of impacts of climate change on species[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(4): 1–6.
- [8] 许景伟, 王卫东, 王月海, 康智, 尹若波. 沿海黑松防护林低产、低质、低效成因的调查报告[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5): 96–98.
Xu JW, Wang WD, Wang YH, Kang Z, Yin RB. Investigation report on the reasons of low-yield, poor-quality, inferior-function of coastal protective forest of *Pinus thunbergii* Parl. [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(5): 96–98.
- [9] 许景伟, 王卫东, 辛斌, 张义浩, 范守华, 康智. 沙质岸黑松海防林更新属于改造技术的研究[J]. 山东林业科技, 2001(5): 1–6.
Xu JW, Wang WD, Xin B, Zhang YH, Xun SH, Kang Z. Studies on regeneration and transformation of lower-yield protection forest of *Pinus thunbergii* in sandy coast [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2001(5): 1–6.
- [10] 张慧, 黄秀凤, 徐华潮. 松材线虫自然侵染后松树感病进程中光合作用及抗氧化酶活性的变化[J]. 环境昆虫学报, 2014, 36(2): 139–144.
Zhang H, Huang XF, Xu HC. Changes of photosynthesis and antioxidant enzyme activities at different stage naturally infected by *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36(2): 139–144.
- [11] 方天松, 余海滨, 王忠. 广东省黑松感染松材线虫病[J]. 林业建设, 2007(6): 46–48.
- [12] 于涛, 张宇阳, 高健, 柯蕾, 马文宝, 李俊清. 极小种群濒危植物盐桦叶绿体基因组特征分析[J]. 林业科学, 2019, 55(2): 41–49.
Yu T, Zhang YY, Gao J, Ke L, Ma WB, Li JQ. Complete chloroplast genome sequence of *Betula halophila*, a plant species with extremely small populations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(2): 41–49.

- [13] 张海波, 曾幼玲, 兰海燕, 张富春. 盐胁迫下盐桦生理响应的变化分析 [J]. 植物分类与资源学报, 2009, 31(3): 260–264.
- Zhang HB, Zeng YL, Lan HY, Zhang FC. Physiological Responses of *Betula halophila* (Betulaceae) to salt stress [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2009, 31(3): 260–264.
- [14] 张海波. 盐桦的耐盐生理分析及液泡膜 Na/H 反向运输载体基因的克隆和遗传转化研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007.
- [15] 曾幼玲, 邓爱华, 曹文尧, 张富春. 一种快速提取盐桦叶片总 RNA 的方法建立 [J]. 种子, 2006, 25(11): 51–53.
- [16] 王健. 新疆发现一种抗盐桦树 [J]. 植物杂志, 2003(6): 13–14.
- [17] 梅新娣, 张富春, 曾幼玲. 濒危植物盐桦的组织培养及快速繁殖 [J]. 植物生理学报, 2004, 40(6): 714.
- Mei XZ, Zhang FC, Zeng YL. Tissue culture and rapid propagation of rare endangered *Betula halophila* [J]. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(6): 714.
- [18] 阿依先木·阿西木, 吐尔逊·吐尔洪, 王文全. 濒危植物盐桦丛生芽生根、移栽及耐盐性研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(6): 42–45.
- Ayixianmu A, Tuinxun T, Wang WQ. Research on tissue embryo rooting, transferring and salt tolerance of endangered plant *Betula halophila* [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(6): 42–45.
- [19] 李宏, 邓江宇, 张红, 苗翠, 包艳丽, 程平. NaCl 胁迫对盐桦幼苗生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(11): 2281–2287.
- Li H, Deng JY, Zhang H, Miao C, Bao YL, Cheng P. Effects of NaCl stress on the physiological characteristics of *Betula halophila* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 29(11): 2281–2287.
- [20] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 16–23.
- Meng XG, Zhang SP. The effect of cold SST on summer atmosphere boundary layer and sea fog over the Yellow Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(6): 16–23.
- [21] 刘敦训. 山东省近 50 年海洋气象灾害特征分析 [J]. 海洋预报, 2006, 23(1): 59–64.
- Liu DX. Analysis on the characters of marine meteorological hazard in the last 50 years in Shandong province [J]. *Marine Forecasts*, 2006, 23(1): 59–64.
- [22] 李宏, 邓江宇, 苗昊翠, 包艳丽. 濒危植物盐桦的物候观测 [J]. 福建林业科技, 2009, 36(4): 164–165, 188.
- Li H, Deng JG, Miao HC, Bao YL. Phenological observa-
- tion of an endangered species *Betula halophila* [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2009, 36(4): 164–165, 188.
- [23] Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, 168(2): 377–385.
- [24] Verhoeven JTA, Koerselman W, Meuleman AFM. Nitrogen-or phosphorus-limited growth in herbaceous, wet vegetation: relations with atmospheric inputs and management regimes [J]. *Trends Ecol Evol*, 1996, 11(12): 494–497.
- [25] 罗珊, 康玉凡, 夏祖灵. 种子萌发及幼苗生长的调节效应研究进展 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 28–32.
- Luo S, Kang YF, Xia ZL. Study advances of regulating effect for seed germination and sprouts growing [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2): 28–32.
- [26] 李立颖. 苗木风障防寒 [J]. 国土绿化, 2012(1): 52.
- [27] 张水松, 林武星, 叶功富, 徐俊森, 谭芳林. 海岸带风口沙地提高木麻黄造林效果的研究 [J]. 林业科学, 2000, 36(6): 39–46.
- Zhang SS, Lin WX, Ye GF, Xu JS, Tan FL. Studies on raising the effect of *Casuarina equisetifolia* afforestation on the Sandy Land in the draught in the coastal zone [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(6): 39–46.
- [28] Yang SY, Jiang CJ, Zhang QG. Effects of windbreaks on wind-decrease, temperature-increase and moisture content of tea leaves in tea garden [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 275–281.
- [29] 孙梅, 田昆, 张贊, 王行, 管东旭, 岳海涛. 植物叶片功能性状及其环境适应研究 [J]. 植物科学学报, 2017, 35(6): 940–949.
- Sun M, Tian K, Zhang Y, Wang X, Guan DX, Yue HT. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation [J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(6): 940–949.
- [30] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 206–216.
- Wang CS, Wang SP. A review of research on responses of leaf traits to climate change [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(2): 206–216.
- [31] 李青粉, 王军辉, 贾子瑞, 齐秀兰, 齐德新, 侯晓柱, 安三平. 丽江云杉天然种群针叶功能性状及其随海拔的变异 [J]. 林业科学研究, 2013, 26(6): 781–785.
- Li QF, Wang JH, Jia ZR, Qi XL, Qi DX, Hou XZ, An SP. Altitudinal variation of needle functional traits in natural population of *Picea likiangensis* [J]. *Forest Research*,

- 2013, 26(6): 781–785.
- [32] Wilson PJ, Thompson K, Hodgson JG. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. *New Phytol*, 2002, 143(1): 155–162.
- [33] Garnier E, Shipley B, Roumet C, Laurent G. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content [J]. *Funct Ecol*, 2001, 15(5): 688–695.
- [34] Wilson PJ, Thompson K, Hodgson JG. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. *New Phytol*, 1999, 143(1): 155–162.
- [35] 邢福, 郭继勋, 王艳红. 狼毒种子萌发特性与种群更新机制的研究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1851–1854.
Xing F, Guo JX, Wang YH. Seed germination characteristics and regeneration mechanism of *Stellera chamaejasme* population [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1851–1854.
- [36] Hong YY, Lu SP. Phospholipases in plant response to nitrogen and phosphorus availability [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2014.
- [37] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965–973.
- [38] 常云妮, 钟全林, 程栋梁, 徐朝斌, 胡波, 张治. 尤溪天然米槠林植物碳氮磷的化学计量特征及其分配格局 [J]. 植物资源与环境学, 2013, 22(3): 1–10.
Chang YN, Zhong QL, Cheng DL, Xu CB, Hu B, Zhang Z. Stoichiometric characteristics of C, N, P and their distribution pattern in plants of *Castanopsis carlesii* natural forest in Youxi [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2013, 22(3): 1–10.
- [39] 田地, 严正兵, 方精云. 植物化学计量学: 一个方兴未艾的生态学研究方向 [J]. 自然杂志, 2018, 49(4): 235–241.
Tian D, Yan ZB, Fang JY. Plant chemometrics: an research frontier in ecology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018(4): 235–241.
- [40] Sterner RW, Elser JJ. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.

(责任编辑: 张平)