

周瑞莲,强生斌,逢金强,等.海岸防风固沙树种耐风吹阈值比较[J].中国沙漠,2020,40(6):127-138.

海岸防风固沙树种耐风吹阈值比较

周瑞莲,强生斌,逢金强,宋 玉

(鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 利用便携式风洞,结合野外调查,对4个海岸防风树种(单叶蔓荆 *Vitex trifolia*、柽柳 *Tamarix chinensis*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* 和黑松 *Pinus thunbergii*)幼株进行了短期(40 min)、间歇(风处理20 min,恢复24 h,重复3次)、持续(6 h)强净风($18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和风沙流吹袭($172.93\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)处理,通过测定风吹袭中和风后秋冬季植株形态特征、茎秆弯曲和折损程度、叶片发黄和脱落比率及春季植株存活率确定了4个树种对强风沙流吹袭的耐受阈值。结果表明:(1)短期强净风和风沙流吹袭后,4个树种在春季均恢复生长,耐受力均很高。(2)间歇强净风和风沙流处理中,虽然4个树种部分叶片脱落、植株顶部受损、茎干弯曲,但均在第2年存活,对间歇强风沙流吹袭表现出较高耐受力。(3)持续强净风和风沙流吹袭下,4个树种的耐受力表现不同。风吹袭中57%~69%叶片脱落(紫穗槐和单叶蔓荆)、茎干倾斜、枝条折断严重、叶片穿损。在春季,柽柳100%恢复生长,黑松70%恢复生长,紫穗槐在强风沙流吹袭后死亡,单叶蔓荆在持续强净风和风沙流吹袭后死亡,耐受阈值柽柳>黑松>紫穗槐>单叶蔓荆。4个防风树种具有相似的根构型,即深根系、发达的侧根、具不定根(单叶蔓荆),具有的锚固作用可能是其抵抗强风吹袭的关键,而它们枝系构型差异可能是其耐受阈值不同的根源。

关键词: 抗风优势树种; 叶片特性; 植株形态特征; 适应对策; 风沙流吹袭

文章编号: 1000-694X(2020)06-127-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00043

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

0 引言

在胶东半岛部分滨海沙区,不仅每年有裹挟着大量沙尘的强风,污染大气环境,造成滨海防风林带受损,而且流沙侵袭农田、公路、铁路等生产设施,破坏海岸景观,抑制着海岸黄金地带的经济发展和生态安全^[1]。对此,国家对海岸环境的保护给予了高度重视,在沿海地区还营造了数万千米的海岸防风林带。但海岸环境治理工作进展缓慢,人工植被建设成效甚微。这除了自然条件恶劣,主要原因是人们尚不清楚海岸防风固沙植物抗风耐受阈值及生态适应对策,还不能根据沙区植物抗风耐受阈值进行抗风沙植物的筛选及进行海岸防风林的合理布局。因此,揭示海岸防风固沙植物抗风生态适应对策及抗风耐受阈值,在防风林植物选育和管理上具有重要作用^[1-3]。

当前对抗风植物的研究已经取得了一定的进

展。人们采用野外调查法,从风沙地区植被中筛选出抗风植物;利用海岸向内陆延伸,在海岸梯度上风速逐渐降低形成的不同程度的风胁迫,研究抗风植物对不同风胁迫的长期响应与适应机制^[4-5];观测长期风沙流吹袭对退耕地和植被组成的影响^[6-7]。随着对植物抗风机制的深入研究,人们采用风扇和鼓风机法等模拟风胁迫^[8-11],研究了不同风胁迫下叶片形态、面积、厚度、角质层变化^[9,11]及植株分枝变化^[5],揭示出长期生长在风环境中的树木冠幅减小,主侧枝与主干的夹角减小,叶片变短、变窄,叶面积减小以减小叶片在风中的受力面积及构型与植物抗风能力的关系^[12-14]。随着风洞技术的应用,人们把重点放在植物抗风生理生态机制的研究上。由于风洞不同于风扇及鼓风机,不仅可定量模拟自然风吹袭,并在植物周围产生均匀的风吹袭,而且可定量用于不同强度风沙流吹袭,因而人们利用风洞技术定量研究了不同强度不同时间风沙流吹袭

收稿日期:2020-03-30; 改回日期:2020-06-15

资助项目:国家自然科学基金项目(31770762)

作者简介:周瑞莲(1958—),女,河南济源人,教授,主要从事植物生理研究。E-mail: zhourl726@163.com

对沙生植物光合作用^[15-17]、水分代谢^[18-19]、抗逆生理代谢^[20-22]的影响,并揭示植物对不同风速风沙流吹袭响应的生理差异及其与抗风能力的关系。利用野外调查法和风扇鼓风机法,可充分了解风沙流吹袭对植物和植被的伤害结果及植物对风环境的生态适应对策,但耗时长且难以定量准确了解不同风速对植物影响及抗风植物抗风生长临界死亡点及耐受阈值。风洞法虽可在短时间内定量详细研究不同风沙流吹袭对植物生理代谢和水分代谢的影响,揭示植物对风沙流吹袭的生理适应调控机制,但无法确定风沙流吹袭带给植物的生理伤害、机械伤害是否影响其持续生存。目前较少有将几种抗风植物研究方法结合使用的研究报道。抗风植物均为多年生植物,其抵御逆境能力、越冬力和再生力在其持续生存中起重要作用。因此,利用风洞法定量控制风沙流吹袭的优势,又结合风后对植物的野外调查即可在短时间内揭示不同强度和类型风沙流吹袭对植物生存和再生的影响结果。该种组合法在深入揭示风沙流对植物的机械伤害,以及该伤害对植物的持续生存的影响及植物耐受阈值具有重要作用。

海岸沙地有多种优势防风固沙树种,这些科属不同的抗风树种抗风生长的适应对策及抵御强风沙流吹袭的耐受阈值是否存在差异?目前尚不清楚。本项目以山东胶东半岛滨海沙地中的单叶蔓荆(*Vitex trifolia*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)和黑松(*Pinus thunbergii*)为试验材料,利用野外便携式风洞,开展不同类型强风($18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 8级风)吹袭(短期强风吹袭40 min、持续强风吹袭6 h、间隙强风吹袭(吹袭20 min、停24 h,重复3次))试验,通过观测强风吹袭中和强风吹袭后植株濒临死亡的形态特征,茎秆或枝条弯曲和折断程度,叶片破损、发黄和脱落比例,幼嫩茎叶表皮上的沙粒磨蚀程度,植株死亡比例,以及在停止吹袭后植株在秋季、冬季、春季新芽、侧枝生长状况,植株存活率以确定4个树种对强风沙流吹袭的耐受阈值,分析不同种类沙生植物耐受大风和强风沙流吹袭的能力及其临界死亡特征的差异,探讨其死亡原因和机制,以期为北方滨海沙地耐强风和风沙流植物的筛选和培育提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

烟台市地处山东半岛中部,位于 $36^{\circ}16'—38^{\circ}23'N$ 、 $119^{\circ}34'—121^{\circ}57'E$ 。该地区属于温带季风气候,空气湿润,气候温和。年降水量651.9 mm,集中在7—8月,占年降水量的49%;年平均气温 11.8°C ,最热月为8月(24.6°C),历年极端最高气温 38.4°C ,土壤pH为4.22~6.79。年平均相对湿度68%,年日照时数2 698.4 h,太阳辐射总量年平均值 $5\,224.4\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,内陆地区年平均风速 $3\sim4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,沿海地区 $4\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均无霜期210 d。烟台沿海防护林自然保护区是中国第一个以沿海基干林带为主要森林生态系统,是抵御海潮、海蚀和风沙等自然灾害的第一道防线。黑松、紫穗槐、柽柳、单叶蔓荆是烟台地区沙质海岸基干林带的主要造林树种。

1.2 材料

试验材料于2017年9月购置。黑松、柽柳为从山东乳山市桑行埠村黑松苗圃购买的株高40 cm两年龄幼株,紫穗槐为从烟台苗圃购买的株高40 cm两年龄幼株,单叶蔓荆是烟台林业科学研究院给予的两年幼株。每种幼苗200株。

为了排除移栽带来的伤害,得到生长健壮的试验材料,在收到黑松苗、柽柳苗、单叶蔓荆苗、紫穗槐苗后,从中各挑选出160株生长健壮、株高40 cm、根系发达的幼株,立刻将其移栽在 $30\text{ cm}\times30\text{ cm}\times25\text{ cm}$ 花盆中,每盆含2株,每树种栽培80盆。取生物园土壤表土,将其与从西泊子海岸沙地挖取的沙子按1:2混匀成沙土装入各花盆中,以保证各盆中土质一致和接近植物原生长地的土质(沙质土壤)。在生物园试验地平行挖4行宽30 cm、深25 cm的沟,将花盆依次安放在深沟中,用周围的土填充盆间隙,并拍实盆周围的土。移栽后马上给花盆注满水,在冬季和春季定时给花盆浇水,并清除盆内外杂草。

为了适应70 cm高风洞装置,在风吹处理前一晚,从试验地中挑选生长势和生长高度一致(约50 cm)的盆栽植物挖取出来搬到实验室,同时各盆浇等量的水备用。风吹处理前标记植物,以利于风吹处理后植物表型的观测,即在供试材料植株的上

中下部枝干上标记并挂标签,给每一植株编号,以利于风吹处理后植物表型的观测。

1.3 风吹试验

风吹试验分为不同风速吹袭试验。吹袭又分为净风吹袭和风沙流吹袭,净风吹即风吹袭中没有沙粒,风沙流吹袭即在风吹袭中加入了沙粒。风吹试验于2018年6月中旬进行,风吹设备为野外便携式风洞(专利号:ZL 2008 10182207X)。试验时通过用变频器调整电机转速,利用皮托管标定风洞内风速。

不同风速风吹袭。风吹速度分别为0(CK)、6、9、12、15、18 m·s⁻¹,分别相当于0、4、5、6、7、8级风,其中6 m·s⁻¹略高于当地起沙风速。每个风吹强度下风吹时间为0、10、20、30、40 min。0 (CK)、6、9、12、15、18 m·s⁻¹风沙流强度分别为 0、1.00、28.30、63.28、111.82、172.93 g·cm⁻¹·min⁻¹。

强风(18 m·s⁻¹)吹袭。短期强风吹袭,强风吹袭40 min;持续强风吹袭,强风吹袭6 h;反复间歇强风吹袭,强风吹袭20 min,停风24 h,再进行强风吹袭20 min,反复3次。强风吹袭后,将试验材料重新埋在生物园试验地中,定时浇水,观测。同时每个强风吹袭试验分为净风吹袭和风沙流吹袭,净风吹袭即风吹袭中没有沙粒,风沙流吹袭即在风吹袭中加入了沙粒,风沙流强度172.93 g·cm⁻¹·min⁻¹。每个处理为4个重复(每花盆为1个重复),每个重复含2棵幼树。

1.4 试验取材及测定

对间歇强风吹袭的试验取材,分别在风吹袭处理后和恢复期完成后,用剪刀在植株采集样品区域剪取试验材料,立刻测定叶片含水量,重复3次。

取样时间和顺序。第1天07:00从不同处理组

植株上取样记为处理前,08:00进行净风和风沙流吹袭20 min后取样,记为第1次风吹;第2天07:00取样记为恢复期1,08:00进行净风和风沙流吹袭20 min后取样,记为第2次风吹;第3天07:00点取样记为恢复期2,08:00进行净风和风沙流吹袭20 min后取样,记为第3次风吹;第4天07:00点取样记为恢复期3。

在风吹处理结束后,每半月观测1次,并记录每株受处理的植株生长状况,连续观测到次年6月。观测内容包括茎杆或枝条弯曲和折损程度、叶片破损、发黄和脱落比例、幼嫩茎叶表皮上的沙粒磨蚀程度、腋芽生长状况、植株死亡比例。

采用称重法测定叶片相对含水量。

1.5 数据处理

数据采用3个以上重复的平均值±标准差,用SPSS 11.5软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 4个树种生物学特性的比较

4个供试防风树种分属于不同科属,生物学特性具有相似性和相异性(表1)。

相似性表现在它们均具有多抗逆性特点,尤其是耐旱和抗风固沙,均为防护林建设和护路绿化的优势树种,而且均为深根性树种。

相异性表现在,①黑松为乔木,紫穗槐和单叶蔓荆为落叶灌木。②植株形态不同,单叶蔓荆为匍匐茎,植株低矮;黑松为高大树木,具有粗壮的枝干;而桤柳具有细长柔韧性强的枝条。③叶片形态不同,黑松叶片为条状披针形,桤柳为圆状披针形,

表1 4个海岸抗风树种生物学特性的比较
Table 1 Comparison of biological characteristics of four wind-resistant tress species

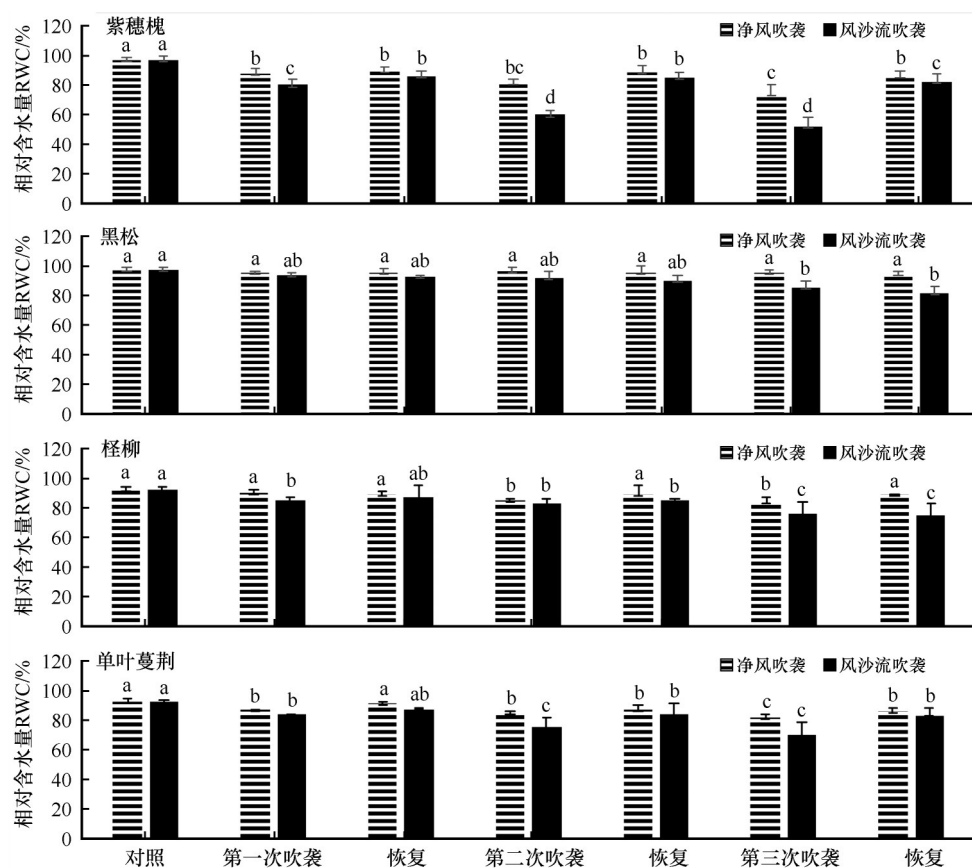
| 名称(拉丁名) | 科属 | 生长特性 | 适应特性 | 叶形状 | 根特性 |
|---------------------------------|----------|-----------------|---------------------------------------|-----------|---------------|
| 黑松(<i>Pinus thunbergii</i>) | 松科,松属 | 常绿乔木,高达30 m | 耐干旱、瘠薄、海雾,抗海风、抗病,是道路行道绿化首选树种 | 条状披针形 | 根系发达 |
| 桤柳(<i>Tamarix chinensis</i>) | 桤柳科,桤柳属 | 落叶小乔木或灌木,高3~6 m | 耐干旱、高温、严寒,抗风耐干旱,是防风固沙、改造盐碱地、绿化环境的优良树种 | 圆状披针形或长卵形 | 深根系,主侧根都极发达 |
| 紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>) | 豆科,紫穗槐属 | 落叶灌木,高1~4 m | 耐干旱、耐瘠,耐寒性强,采用插条繁殖,是护坡绿化的优良树种 | 小叶卵形或椭圆形 | 深根性直根 |
| 单叶蔓荆(<i>Vitex trifolia</i>) | 马鞭草科,牡荆属 | 落叶灌木,茎匍匐 | 耐干旱,耐瘠薄、耐寒,是海滨防沙造林树种 | 倒卵形或近圆形 | 根系非常庞大、发达,主根深 |

而紫穗槐和单叶蔓荆叶片形态均为近圆形,为阔叶。④繁殖方式不同,单叶蔓荆具有发达的匍匐茎,侧枝发育能力极强,只要侧枝与潮湿地面接触就能迅速形成不定根和新枝条,可快速延伸生长,摆脱沙埋,扩大种群;紫穗槐无性繁殖能力极强,可插条繁殖,具有较强的生存能力。黑松以有性繁殖为主。⑤生长习性不同,单叶蔓荆、紫穗槐、怪柳为落叶树种。

2.2 间歇强净风和风沙流吹袭下4个树种叶片含水量(RWC)变化

自然状态下,黑松(97.3%)和紫穗槐(96.3%)叶片相对含水量(RWC)较单叶蔓荆(93.7%)和怪柳(92.6%)高,但差异不显著,但在间歇风吹袭处理中,4个树种叶片含水量差异明显($P<0.05$,图1)。

在间歇强净风和风沙流吹袭过程中,黑松随着吹袭次数的增多,RWC波动下降,即在风吹袭中略有下降,在恢复期略小幅回升,但差异不明显。与黑松相比,怪柳、单叶蔓荆和紫穗槐随着间歇风吹袭处理次数增多叶片RWC均显著下降,并在风吹袭时下降,恢复期上升。其中在风吹袭和恢复期RWC变化幅度最大的是紫穗槐,最小的是怪柳。在第2次和第3次净风和风沙流吹袭中,紫穗槐RWC分别下降9.1%(净风)和30.4%(风沙流),16.4%(净风)和38.1%(风沙流),在恢复期分别增加9.5%和41.4%、15.3%和57.1%,风吹袭和恢复期间差异显著($P<0.05$)。怪柳在风吹袭中叶片RWC分别下降4.9%和4.8%、5.9%和10.9%,在恢复期分别增加5.4%和2.7%、5.6%和0%,风吹袭和恢复期间差异显著($P<0.05$)。



不同小写字母表示不同风吹袭次数和恢复期间叶片相对含水量差异显著($P<0.05$)

图1 间歇强净风和风沙流吹袭对怪柳、单叶蔓荆、黑松、紫穗槐叶片相对含水量影响

Fig.1 The effect of interval strong wind blowing and strong wind-drift blowing on relative water content in the leaves of *Pinus thunbergii*, *Tamarix chinensis*, *Amorpha fruticosa*, *Vitex trifolia*

4个树种在风沙流吹袭下叶片RWC下降幅度均大于净风处理。在第2次和第3次吹袭中,净风吹袭的黑松叶片RWC较风沙流吹袭的高4.7%、

12.2%;紫穗槐叶片RWC较风沙流吹袭高35.5%、41.9%;单叶蔓荆叶片RWC较风沙流高13.1%、16.4%;怪柳叶片RWC较风沙流高1.9%、10.6%,尤

其是第 3 次风沙流吹袭与净风吹袭叶片 RWC 差异显著($P<0.05$)。同样,在恢复期,净风吹袭的叶片 RWC 也均高于风沙流吹袭。在第 2 次和第 3 次恢复期中,净风吹袭的黑松叶片 RWC 较风沙流吹袭的高 3.4%、15.3%;紫穗槐叶片 RWC 较风沙流吹袭的高 4.9%、4.1%;单叶蔓荆较风沙流吹袭的高 3.5%、3.1%;柽柳叶片 RWC 恢复期较风沙流高 4.6%、18.6%,但净风吹袭与风沙流吹袭叶片 RWC 差异不显著。在强净风和强风沙流吹袭下黑松和柽柳叶片具有较强的抗脱水能力,而紫穗槐、单叶蔓荆叶片含水量可塑性和自愈修复能力较强。

2.3 持续强风吹袭过程中 4 个树种落叶率比较

经历 6 h 连续强净风和风沙流吹袭,除黑松外其他 3 个树种树上叶片脱落较多。根据每吹袭 2 h 收集的落叶量与 3 次收集的落叶量之和的比值计算落叶比率,以期了解叶片抗风吹袭的耐力。经历 6 h 的强净风吹袭黑松基本没有落叶,展示出很强的抗

风性,而紫穗槐、柽柳、单叶蔓荆发生明显的落叶,尤其是在强风吹袭 2 h 落叶比率最高(表 2)。在净风吹袭 2 h,紫穗槐、柽柳、单叶蔓荆落叶比率分别为 77.9%、64.8%、50.8%。随着净风吹袭时间延长,紫穗槐植株在吹袭 4 h 后叶片全部脱落,而单叶蔓荆和柽柳在经历较长时间强净风吹袭(6 h)后植株叶片基本全部脱落。持续强净风吹袭下,4 个树种叶片落叶比率差异显著($P<0.05$)。

在强风沙流吹袭中沙粒的击打,4 个树种叶片脱落明显,尤其是黑松枝叶开始大量脱落(表 2)。黑松和柽柳在强风沙流吹袭 4 h 落叶比率最高达 45.1% 和 52.2%,而紫穗槐和单叶蔓荆在强风沙流吹袭 2 h 落叶比率最高达 69% 和 57.5%。吹袭 6 h 柽柳、紫穗槐、单叶蔓荆叶片全部脱落,而且,同风速吹袭下,风沙流吹袭中沙粒的磨腐和击打对植物的伤害极大,造成许多叶片边缘破碎,叶面有洞。

表 2 不同时间强风沙流和净风吹袭下黑松、柽柳、紫穗槐和单叶蔓荆叶片落叶率比较
Table 2 Comparison of deciduous ratio of *Pinus thunbergii*, *Tamarix chinensis*, *Amorpha fruticosa*, *Vitex trifolia* under strong wind blowing and wind-drift blowing at the different time

| 植物 | 风吹类型 | 风吹时间/h | | | | | |
|---------------------------------|-------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 0~2 | | 2~4 | | 4~6 | |
| | | 鲜重比/% | 干重比/% | 鲜重比/% | 干重比/% | 鲜重比/% | 干重比/% |
| 黑松(<i>Pinus thunbergii</i>) | 净风吹袭 | 0.0±0.0 ^c | 0.0±0.0 ^c | 0.0±0.0 ^c | 0.0±0.0 ^c | 0.0±0.0 ^c | 0.0±0.0 ^c |
| 柽柳(<i>Tamarix chinensis</i>) | | 64.8±8.8 ^{ab} | 59.0±4.3 ^{ab} | 19.6±2.1 ^a | 21.2±1.6 ^a | 8.6±1.8 ^b | 10.4±1.0 ^b |
| 紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>) | | 77.9±2.6 ^a | 80.2±5.2 ^a | 10.3±1.6 ^b | 9.9±1.1 ^b | 11.8±1.2 ^b | 9.9±0.8 ^b |
| 单叶蔓荆(<i>Vitex trifolia</i>) | | 50.8±2.8 ^b | 47.6±3.2 ^b | 12.2±1.1 ^b | 13.3±1.9 ^b | 22.9±2.4 ^a | 21.9±1.5 ^a |
| 黑松(<i>Pinus thunbergii</i>) | 风沙流吹袭 | 31.2±1.6 ^c | 30.2±1.7 ^c | 45.1±3.8 ^b | 46.1±2.6 ^b | 23.7±2.1 ^b | 23.6±2.1 ^b |
| 柽柳(<i>Tamarix chinensis</i>) | | 28.6±2.1 ^c | 23.6±2.5 ^c | 52.2±3.9 ^a | 53.7±3.1 ^a | 19.2±1.2 ^b | 22.8±1.8 ^b |
| 紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>) | | 69.0±4.6 ^a | 64.1±4.9 ^a | 11.2±1.6 ^c | 13.1±1.3 ^c | 19.9±2.3 ^b | 22.8±2.3 ^b |
| 单叶蔓荆(<i>Vitex trifolia</i>) | | 57.5±3.1 ^b | 54.2±4.7 ^b | 10.1±1.2 ^c | 11.2±1.1 ^c | 32.4±2.8 ^a | 34.6±2.8 ^a |

不同小写字母表示同一时间不同树种之间差异显著($P<0.05$)。

2.4 不同风速和不同类型强风净风和风沙流吹袭后 4 个树种生长动态

黑松在低风速(6、9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)净风和风沙流吹袭 20 min 没有明显损伤,后期生长正常(表 3)。在中风速(12、15 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)净风和风沙流吹袭 20 min 的黑松,只是植株顶部嫩叶和下部老叶脱落,但在恢复生长中都能长出嫩芽,顶部长出新叶。经历不同类

型强风速(18 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)净风和风沙吹袭中黑松表现不同,黑松在短期(18 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 40 min)和间歇(18 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 20 min, 3 次)强风吹袭中,植株顶部少量松枝脱落,而且风沙流吹袭使枝条受损更严重,但在恢复生长中,植株在秋冬季叶片枯黄有所扭转,并在春季萌生新松针,植株恢复生长,由于残留在植株上在植株上的针叶发黄,即使春季新叶萌生,但整个植株仍呈现枯黄色。而黑松在持续(18 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 6 h)强风

表 3 不同风速和不同类型强风净风和风沙流吹袭对 4 个树种幼树持续生长的影响

Table 3 The effect of different wind speeds and different types of strong wind blowing and wind-drift blowing on sustained survival of *Pinus thunbergii*, *Tamarix chinensis*, *Amorpha fruticosa*, *Vitex trifolia*

| 树 种 | 风况 | | 风吹处理时植株表现 | | 风处理后植株表现 | | | | | |
|-------------|------------------------------------|-----|-------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| | | | 植株状况 | 脱叶 率/% | 秋季 | | 冬季 | | 春季 | |
| | | | | | 植株状况 | 脱叶 率/% | 植株状况 | 脱叶 率/% | 植株状况 | 恢复 率/% |
| 黑 松 | 6 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 植株小幅摆动 | 0 | 正常生长, 茎干直立 | 0 | 正常生长 | 0 | 正常生长, 新叶较多 | 100 |
| | | 风沙流 | 植株小幅摆动 | 0 | 正常生长, 茎干直立 | 0 | 正常生长 | 0 | 正常生长, 茎干有新叶 | 100 |
| | 9 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 植株小幅摆动 | 0 | 正常生长, 茎干直立 | 0 | 迎风面无新叶 | 0 | 正常生长, 背风面有新叶 | 100 |
| | | 风沙流 | 植株小幅摆动 | 0 | 正常生长, 茎干直立 | 0 | 有新叶但小 | 0 | 正常生长, 分枝新叶增多 | 100 |
| | 12 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 植株摆动大, 且微倾斜 | 0 | 正常生长, 底部老叶脱落 | 10 | 茎干上嫩芽少, 多见于分支 | 0 | 正常生长, 新叶长势好 | 100 |
| | | 风沙流 | 植株摆动大, 茎干倾斜 | 0 | 正常生长, 底部老叶及顶 部有脱叶 | 10 | 新嫩芽数量少, 生长正常 | 0 | 正常生长, 侧枝有新叶 | |
| | 15 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 植株摆动大, 茎干倾斜 | 0 | 正常生长, 茎干略倾斜, 老 叶及嫩叶有脱落 | 15 | 分枝上嫩芽少, 正常生长 | 0 | 正常生长, 顶部有新叶 | 100 |
| | | 风沙流 | 植株摆动大, 茎干倾斜 | 0 | 正常生长, 茎干倾斜, 脱叶 增多 | 20 | 分枝上嫩芽少, 生长正常 | 0 | 正常生长, 顶部有新叶 | 90 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 40 min | 净风 | 植株大幅动, 茎干倾斜 | 10 | 1/3 叶尖枯黄, 茎干干枯, 顶中部松枝脱落 | 20 | 1/3 叶尖枯黄 | 0 | 正常生长, 顶部有新叶, 老叶枯黄 | 80 |
| | | 风沙流 | 植株大幅摆动, 茎干倾斜, 有打痕 | 15 | 1/3 叶尖枯黄, 分枝条弯曲, 枝条有脱落 | 25 | 1/3 叶尖枯黄 | 0 | 枯黄处无新叶, 顶部有新 叶, 老叶枯黄 | 80 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 植株大幅摆动, 茎干倾斜 | 10 | 1/3 叶尖枯黄, 直立正常 | 10 | 1/3 叶尖枯黄 | 0 | 植株老叶仍枯黄, 顶部有新叶 | 80 |
| | | 风沙流 | 植株大幅摆动, 茎干有打痕 | 10 | 1/3 叶尖枯黄, 直立正常 | 10 | 1/3 叶尖枯黄 | 0 | 植株老叶仍枯黄, 顶部有新叶 | 80 |
| 紫 穗 槐 | 3 次, 18 m·s ⁻¹ , 6 h | 净风 | 植株大幅摆动, 茎干倾斜 | 10 | 叶尖受损严重, 茎干倾斜大 | 30 | 1/2 叶尖枯黄 | 20 | 植株总体枯黄, 黄叶绿叶参半 | 70 |
| | | 风沙流 | 植株大幅摆动, 茎干有打痕 | 15 | 植株暗灰色, 茎干倾斜大 | 30 | 1/2 叶尖枯黄 | 20 | 植株总体枯黄, 黄叶绿叶参半 | 70 |
| | 6 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶微动, 无受损 | 0 | 正常生长 | 0 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 底部多, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶微动, 无受损 | 0 | 有新叶长出, 正常生长 | 0 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 底部多, 枝繁叶茂 | 100 |
| | 9 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶小幅摆动, 无受损 | 0 | 有新叶长出, 正常生长 | 0 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶小幅摆动, 无受损 | 0 | 有新叶长出, 正常生长 | 10 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 100 |
| | 12 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶摆动增大, 茎干倾斜, 叶片边缘受损 | 10 | 枝繁叶茂, 茎干恢复直立 | 10 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶摆动增大, 茎干倾斜, 叶片边缘受损, 叶有孔洞 | 15 | 较多碎叶, 茎干恢复直立 | 10 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 100 |
| | 15 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 茎干倾斜, 叶大量掉落 | 30 | 迎风处碎叶多, 茎干恢复 直立 | 30 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶 茂 | 90 |
| | | 风沙流 | 茎干倾斜, 有打痕, 表皮粗 糙, 叶片萎缩 | 30 | 叶片有孔洞, 枝繁叶茂, 茎 干矮于其他 | 30 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 90 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 40 min | 净风 | 叶片大量掉落, 偶成枝叶 落, 碎叶 | 35 | 叶片有损伤, 有碎叶, 枝繁 叶茂, 茎干恢复直立 | 40 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶 茂 | 90 |
| | | 风沙流 | 树皮有区域打痕, 碎叶断枝, 叶有孔 | 40 | 叶有洞, 枝繁叶茂, 茎干矮于 其他 | 45 | 整株叶枯黄 | 100 | 有嫩芽, 枝条伸展, 枝繁叶茂 | 80 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多 | 35 | 植株暗黄, 茎干倾斜 | 40 | 整株叶枯黄 | 100 | 有新叶, 枝繁叶茂 | 80 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶有孔洞, 叶片破损严重 | 35 | 叶片暗黄且萎缩, 茎干倾斜 | 45 | 整株叶枯黄 | 100 | 有新叶, 枝繁叶茂 | 80 |

续表3

| 树 种 | 风况 | | 风吹处理时植株表现 | | 风处理后植株表现 | | | | | |
|------------------|------------------------------------|-----|-----------------------------|-----------|------------------------------|-----------|-------|-----------|-------------|-----------|
| | | | 植株状况 | 脱叶 率/% | 秋季 | | 冬季 | | 春季 | |
| | | | | | 植株状况 | 脱叶 率/% | 植株状况 | 脱叶 率/% | 植株状况 | 恢复 率/% |
| 紫 穗 槐 | 3 次, 18 m·s ⁻¹ , 6 h | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多, 断枝 | 50 | 叶破碎干枯, 茎干倾斜 | 45 | 整株叶枯黄 | 100 | 有新叶, 枝繁叶茂 | 60 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多, 断枝 | 55 | 半叶, 叶片有孔洞, 茎干倾 斜 | 50 | 整株叶枯黄 | 100 | 枝秆枯死 | 0 |
| 单 叶 蔓 荆 | 18 m·s ⁻¹ , 40 min | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多 | 30 | 叶尖变黄, 叶脉稍绿, 茎干 直立 | 20 | 季节枯黄 | 100 | 植株绿色, 叶片茂盛 | 70 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多, 叶 有孔洞 | 30 | 叶尖黄有半叶, 有干叶, 叶 片有孔洞, 茎干直立 | 25 | 季节枯黄 | 100 | 植株绿色, 叶片茂盛 | 70 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多 | 25 | 叶尖微黄, 叶脉稍绿, 茎干 直立 | 25 | 季节枯黄 | 100 | 植株绿色, 叶片较茂盛 | 50 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多, 老叶脱落 | 30 | 有半叶, 叶有洞, 茎干直立, 叶边缘破碎 | 30 | 季节枯黄 | 100 | 植株绿色, 叶片较茂盛 | 50 |
| | 3 次, 18 m·s ⁻¹ , 6 h | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶破损多 | 47 | 叶片失水皱缩, 茎干直立 | 30 | 季节枯黄 | 100 | 枯死, 无萌生 | 0 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 老叶脱落, 叶有孔洞, 磨损严重 | 65 | 半叶, 碎叶, 叶有洞, 茎干直 立, 且有打击痕 | 35 | 季节枯黄 | 100 | 枯死, 无萌生 | 0 |
| 桤 柳 | 18 m·s ⁻¹ , 40 min | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶絮受损重 | 25 | 1/2 叶片枯黄, 茎干倾斜 | 15 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶絮受损重 | 25 | 1/2 叶片枯黄, 茎干倾斜 | 15 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |
| | 18 m·s ⁻¹ , 20 min | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶絮受损重 | 30 | 叶絮绿, 茎干倾斜 | 15 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 叶絮受损重, 部分叶絮脱落 | 30 | 1/2 叶片枯黄, 茎干倾斜 | 15 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |
| | 3 次, 18 m·s ⁻¹ , 6 h | 净风 | 枝叶大幅摆动, 叶絮受损重 | 35 | 1/2 叶絮枯黄, 茎干倾斜明显 | 25 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |
| | | 风沙流 | 枝叶大幅摆动, 部分叶絮脱落 | 40 | 1/2 叶絮枯黄, 茎干倾斜明显 | 25 | 季节枯黄 | 100 | 枝条嫩绿, 枝繁叶茂 | 100 |

吹袭下, 植株顶部和中部叶片受损严重并成片掉落, 尤其是风沙流吹袭导致茎干倾斜明显, 在后期恢复生长中, 植株恢复较差, 尤其是风沙流吹袭的植株。显然, 在短期和间歇强净风和风沙流吹袭下, 黑松具有较强的恢复能力。但持续强风吹袭, 尤其是风沙流吹袭带给黑松的伤害导致其较难在短时间内恢复。

紫穗槐在低风速(6、9 m·s⁻¹)净风和风沙流吹袭 20 min 下基本没有受到影响, 虽然风沙流吹袭引发少量叶片脱落, 但在后期仍可从底部和顶部长出新叶并繁茂生长(表 3)。中风速(12、15 m·s⁻¹)净风和风沙流吹袭 20 min, 植株一些叶片掉落, 茎干倾斜, 并且风沙流吹袭下茎干有打痕, 植株表皮粗糙, 叶片萎缩。但在后期均能恢复生长。不同类型强风吹袭(18 m·s⁻¹)对紫穗槐影响不同。在短期和间歇强净风和风沙流吹袭下, 尽管叶片掉落较多、部分枝条折断, 尤其是风沙流吹袭导致树皮有打痕、碎

叶、叶上有孔洞, 但植株在经历秋冬季后, 植株上残留叶片变黄、全部脱落, 在春季均能恢复生长, 长出新叶, 并枝繁叶茂。而持续 6 h 强风速处理后的紫穗槐, 在秋冬季恢复生长中, 植株上残留叶片变得枯黄, 最后全部脱落。在春季, 只有经历强净风吹袭的植株部分恢复生长, 长出新叶, 而受强风沙流吹袭的植株无新叶萌生而死亡, 这时由于风沙流吹袭沙粒的击打引发茎干表皮破裂、叶片孔洞、叶缘破碎, 植株受损严重所致。可见, 经历不同强度风速净风和风沙流吹袭后, 紫穗槐均在冬季落叶, 曾经风沙流导致的破损叶片也随冬季落叶而脱落, 在春季植株上长出新叶, 枝繁叶茂, 植株上已没有了风沙流伤害的痕迹。高风速风沙流吹袭中沙粒的击打对植株茎干的伤害, 可能是引发植株死亡的原因。

桤柳在短期强净风和风沙流吹袭下, 茎干倾斜, 叶絮残缺, 少有落叶, 但叶絮在秋冬经历变黄和

脱落后,在春季完全恢复生长(表3)。而在间歇强净风和风沙流吹袭下引发茎干倾斜,少量叶絮脱落,同样在经过秋冬季恢复生长后均在次年春季长出嫩芽繁茂生长。持续6 h强净风和风沙流吹袭使植株枝叶受损严重,枝条折断多,叶絮有破损和脱落,虽然在后期生长中叶絮枯黄、脱落,但在春季仍枝叶茂盛。怪柳显示了较高的抗强风沙流吹袭的能力。

单叶蔓荆在短期和间歇强净风吹袭下,少许叶片掉落,而在强风沙流吹袭下,叶片大量脱落,叶片上有孔洞,边缘破碎。在秋冬恢复生长中,叶片变灰色,然后干枯,随季节脱落,在春季在植株顶部又长出少量新叶。持续强净风吹袭引发植株上2/3叶片脱落,风沙流吹袭引发全部叶片脱落,茎干上有打击痕,由于植株脱叶严重,在秋冬季恢复差,而无法在春季恢复生长而死亡。

2.5 4个树种对不同类型强风净风和风沙流吹袭耐受阈值

多年生植物的持续生存依赖植物每年的再生,防风植物顽强的再生性可能是其持续生存的关键,也与其耐受力密切相关。根据经风洞处理后供试植株在第二年植株存活比率,评价出4个树种对强净风和强风沙流耐受阈值(表4),在次年生存率分别为100%、80%、50%、20%以下定为强、中、弱、差。结果表明,4个树种对短期和间隙强净风和强风沙流吹袭耐受力均较强,其中怪柳和紫穗槐耐受值最高(强),黑松和单叶蔓荆相对较低(中)。4个树种对持续强净风和强风沙流吹袭的耐受力表现差异较大(表4)。对持续强净风和强风沙流吹袭耐受值最高的仍是怪柳(强),单叶蔓荆最低(差),黑松和紫穗槐表现一般(中和弱)。

表4 4个树种对18 m·s⁻¹强净风和风沙流吹袭的耐受阈值评估
Table 4 Evaluation of tolerance thresholds of tress species with different families encountering to strong wind blowing and wind-drift blowing.

| 树种 | 处理 | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 净风 | | | 风沙流 | | |
| | 短时吹袭 | 间歇吹袭 | 持续吹袭 | 短时吹袭 | 间歇吹袭 | 持续吹袭 |
| 黑松(<i>Pinus thunbergii</i>) | 中 | 中 | 弱 | 中 | 中 | 弱 |
| 怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>) | 强 | 强 | 强 | 强 | 强 | 强 |
| 紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>) | 强 | 强 | 弱 | 强 | 强 | 差 |
| 单叶蔓荆(<i>Vitex trifolia</i>) | 中 | 中 | 差 | 中 | 中 | 差 |

强、中、弱、差分别代表次年存活率低于100%、80%、50%、20%。

3 讨论与结论

3.1 防风植物对强风的耐受阈值与叶片形态特征及其抗脱水性的关系

风的生态作用一方面对植物产生机械刺激,并直接对植物造成机械损伤;另一方面改变植物周围的空气环境,如降低了大气湿度、温度等,间接导致植物叶片生理干旱^[23]。自然状况下,4个海岸防风树种持水力不同,但差异不显著,而在间歇强净风和强风沙流吹袭中,叶片RWC变化幅度和变化趋势不同(图1)。在间歇强净风和强风沙流吹袭中,黑松叶片含水量随着风吹袭次数的增多呈下降趋

势,其中在风处理中略有下降,而在恢复期回升不明显;怪柳、单叶蔓荆、紫穗槐叶片RWC随着风吹袭次数增多呈波动式显著下降,其中在风处理中下降,但在恢复期上升。在间歇风吹袭处理中,叶片含水量在风处理和恢复期变化幅度最大的是紫穗槐,最小的是怪柳。

防风树种抗脱水能力和水分可塑性调控能力与其耐受阈值成正相关。黑松和怪柳以较高的抗脱水能力维护叶片水分平衡,耐受阈值较高,单叶蔓荆抗脱水力差而耐受阈值差。虽然紫穗槐叶片抗脱水性较低,但其自愈修复和水分调整可塑性能力较强而维持着植株水分平衡,则耐受阈值居中。可见,维持叶片水分平衡能力在提高防风植物对强

风沙流吹袭的耐受力上有重要作用。

防风树种抗脱水能力与叶片特性(叶的特性、叶形态、叶大小及叶片)相关。风的生态作用一方面对植物产生机械刺激,并直接对植物造成机械损伤;另一方面改变植物周围的空气环境,如降低了大气湿度、温度等,间接导致植物叶片生理干旱^[23]。叶片蒸腾作用是水分从植物体内散发到体外的过程,是植物水分丢失的主要通道,并易随环境因子的变化而迅速变化^[24]。怪柳和黑松叶片为圆形或条形披针形(表1),披针形叶不仅叶面积小,日间受光辐射少、升温慢,而且疏风会降低叶温,从而降低叶片蒸腾速率,减少叶片水分丢失。另外,黑松针叶表面附有油脂层可防蒸发。叶片特性使怪柳和黑松在强风吹袭中能通过降低蒸腾速率、提高抗脱水性而提高其对强风吹袭的耐受阈值。虽然紫穗槐叶片较大,但由于其羽状复叶长、枝叶长势茂密、植株层层叠加交互遮阴降低了叶片水分丢失而使其叶片持水力较高(图1)。单叶蔓荆叶片也较大,但由于其匍匐茎上叶片平行向阳排列、受光辐射强、叶片蒸腾水量多而导致日间叶片含水量相对较低,持水力低。同时,在风吹袭时,较大的叶片易形成空气阻力而增加风对植物的机械损害,引发叶片脱落^[9,25]。但是较大的叶片生理代谢活动强使其具有较强的自愈修复功能。这可能是紫穗槐和单叶蔓荆在强风吹袭时叶片抗脱水力较弱,在恢复期叶片能恢复叶水分的原因。另外,强风沙流吹袭引起植物枝叶剧烈摆动导致机械损伤、茎干倾斜对茎干水分输导的抑制^[26],以及沙粒磨腐造成叶片输水组织的伤害使潜在角质层蒸腾速率的增加均加剧叶片失水^[27],从而使强风沙流吹袭下叶片失水程度大于净风吹袭。

3.2 防风植物对强风的耐受阈值与植物构型的关系

植物构型即植物体不同构件在空间的排列方式,包括枝系构型和根系构型^[28]。植物枝系构型由空间位置上枝长、分枝角度和分枝率决定^[12,29]。根系构型是指同一根系中不同类型的根(直根系)或不定根(须根系)在生长介质中的空间造型和分布^[29-30]。植物构型不同则造成沙生植物的抗风蚀能

力也不同^[12]。植物的构型决定了叶和芽的空间分布、植冠的大小和形状,继而影响着光合、水分和养分的运输与吸收等生理活动,对植物生态功能的发挥具有重要作用。

4个抗风树种根系构型类似。怪柳不仅有深根系,而且主侧根都极发达,枝体机械稳定性高;紫穗槐是深根性直根树种,主根锚固作用显著,根系有自疏与更新的能力,可不断适应环境的变化;同样,单叶蔓荆根系非常庞大、发达,主根深并有固定树体和扩繁新枝的作用。但4个抗风树种在枝系构型上差异较大(表1)。怪柳具有较多细长而柔韧的枝条使其在强风吹袭中降低了空气阻力、减小了风对植物整体的弯曲力影响、降低了风沙流的伤害^[13-14]。尤其是其细枝和针叶受沙粒击打面积较小,而抗磨腐能力强。因而良好的枝系和根系构型使怪柳可在持续强风沙流吹袭后生存而具有最高的耐受阈值;黑松为高大乔木,冠幅和主侧枝与主干的夹角较小^[29],可有效降低空气阻力和风沙流伤害,增大自身的机械稳定性^[5,25],而使黑松对强风具有较大的耐受阈值;单叶蔓荆和紫穗槐均为灌木(落叶),植株相对低矮而叶片较大。低矮的植株可减小其在风中的受力面积而降低受风沙流的影响,但其相对较大的叶片能产生较大的风阻力而增加了风对植株的机械伤害,尤其是易受到沙粒的磨蚀受损,这可能是其对强风沙流耐受阈值较低的原因。可见,阔叶树种发达的主根和对环境高适应的根系构型可能是其能抵御强风吹袭的原因,但较大的叶片易受风沙流伤害可能是其对强风吹袭耐受阈值低的根源。因此,防风树种的根系构型通过锚固作用、对地上部供养和支撑作用而在抗风生长中起重要作用,枝系构型通过减小风阻力、增加植株柔韧性而适应风吹袭。

3.3 防风植物对强风的耐受阈值与生存策略及繁殖策略的关系

4个树种的生活习性不同,黑松是常绿植物,而怪柳、紫穗槐和单叶蔓荆均为落叶植物。同为乔木的黑松和怪柳,落叶的怪柳耐受阈值较常绿的黑松大,这是因为落叶植物可通过落叶缩小蒸腾作用和散热面积,减少体内水分散失,以适应低温,干旱等

不良环境条件。落叶是一种对逆境的自我保护。因此,怪柳、紫穗槐和单叶蔓荆在遭遇强风吹袭叶片受到损伤时,植株通过脱去受伤叶片一方面减少受伤叶片对能量的消耗、减少对水分的散失,另外季节性脱叶在减少植物体冬季能量消耗的同时,也为来年新叶的生长提供了充足的空间和养分,这可能是怪柳、紫穗槐和单叶蔓荆可抵御风沙流吹袭而生存成为防风植物的原因。相比之下,常绿树种黑松在风沙流吹袭中受损的针叶仍与植株共存,受损的针叶对枝体水分的消耗导致在风沙流后植株顶部叶发黄,同时还影响新生叶和整株植物的生长使其抵御强风沙流吹袭耐受阈值低于怪柳。因此,季节性落叶通过吐故纳新和能量再分配而在树木适应风沙流环境中起重要作用。

4个树种的繁殖方式和繁殖力存在差异,并与其对强风吹袭耐受阈值相关。耐受阈值最大的怪柳不仅耐修剪,而且萌芽力强,刈割后生长快。因而尽管在持续强风沙流吹袭中怪柳枝叶受损较重,但在恢复生长时能快速萌生新枝叶弥补损失的能量,这可能是导致其具有较高抗强风沙流袭击能力和耐受阈值。相反,与怪柳同为乔木的黑松,虽然在强风沙流($18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)吹袭后在秋季有嫩芽产生,但部分黄叶持续留在株体上减小了新叶生长空间而抑制黑松在春季恢复生长速率导致其耐受阈值低于怪柳。另外,虽为阔叶的单叶蔓荆易受强风沙流伤害,但其发达的匍匐茎、极强的侧枝发育能力、快速形成不定根和新枝条的无性繁殖能力而使其可在风沙环境中生存,提高了其对强风吹袭的耐受阈值。可见防风树种独特的繁殖和再生能力通过快速弥补风沙流引发的损失而在提高耐受阈值上起重要作用。

综上所述,4个树种对短期和间歇强净风和风沙流吹袭均表现出较高的耐受力,但对持续强风沙流吹袭耐受力表现不同,风后怪柳100%恢复生长、黑松70%恢复生长、紫穗槐在强风沙流吹袭后死亡、单叶蔓荆在持续强净风和风沙流吹袭后死亡,耐受阈值怪柳>黑松>紫穗槐>单叶蔓荆。4个树种具有相似的根构型(深根系、发达的侧根和不定根(单叶蔓荆),该根构型的锚固作用可能是其抵抗强风吹袭的关键。枝系构型上的差异是耐受阈值不

同的根源。怪柳细长和柔韧的枝条及披针型叶片降低了枝条和叶片对空气的阻力,减小了风对植物整体的弯曲力影响和风沙流伤害。黑松冠幅和主侧枝与主干的夹角较小,降低了空气阻力和风沙流伤害,但其为常绿树种,风沙流吹袭后受损针叶仍与植株共存增加了对枝体水分的消耗并影响整株植物恢复生长使其耐受阈值低于怪柳。紫穗槐和单叶蔓荆较大的叶片易形成较大的空气阻力,增加对植物的机械损害和沙粒磨蚀损伤而降低了耐受阈值。另外,季节落叶因可减少植物体冬季能量消耗为来年新叶的生长提供了充足的空间和养分而提高了怪柳、紫穗槐和单叶蔓荆对强风沙流吹袭的耐受阈值。可见,植物对强风沙流吹袭的耐受阈值是由综合因素决定的。其中植物的季节落叶习性、繁殖和再生力、植物枝系构型和根构型及叶片大小和形态均与耐受阈值相关,并可作为抗风树种筛选的指标。

参考文献:

- [1] 赵哈林. 沙漠化防治学[M]. 北京: 现代教育出版社, 2016.
- [2] 张振克, 杨运恒. 胶东半岛北部沿海现代风沙灾害特点、成因及减灾对策[J]. 中国沙漠, 1992, 12(2): 34-40.
- [3] 赵艳云, 陆兆华, 刘京涛, 等. 海岸沙丘植物群落分布、适应性和演替研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 401-408.
- [4] Murren C J, Pigliucci M. Morphological responses to simulated wind in the genus *Brassica* (Brassicaceae): allopolyploids and their parental species[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(5): 810-818.
- [5] 冯森彦, 董治宝, 黄日辉, 等. 广东省东海岛海岸老鼠耳(*Spinifex littoreus*)草丛沙堆形态及沉积特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 167-176.
- [6] 张鹏, 孙阳, 虞木奎, 等. 海岸梯度上黑松针叶形态与解剖结构性状的变化规律[J]. 植物研究, 2018, 38(3): 343-348.
- [7] 李德禄, 满多清, 刘有军, 等. 不同年限退耕地植被与风沙流的关系研究[J]. 西北林学院学报, 2018(1): 56-61.
- [8] Anten N P R, Alcalá-Herrera R, Schieving F, et al. Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major* [J]. New Phytologist, 2010, 188(2): 554-564.
- [9] 南江, 赵晓英, 余保峰. 模拟长期大风对木本猪毛菜表现特征的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6354-6360.
- [10] Wu T G, Zhang P, Zhang L, et al. Morphological response of eight *Quercus* species to simulated wind load[J]. PLoS One, 2016, 11(9): 163.
- [11] 古力米热·热孜, 赵晓英, 原慧, 等. 模拟长期大风胁迫对霸王叶解剖结构特征的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(10):

- 2047–2052.
- [12] 李建刚,王继和,蒋志荣,等.民勤县主要治沙造林树种空间结构及其防风作用[J].水土保持研究,2008,15(3):121–124.
- [13] Vogel S. Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape[J]. New Phytologist, 2009, 183(1): 13–26.
- [14] Telewski F W. Is windswept tree growth negative thigmotropism? [J]. Plant Science, 2012, 184: 20–28.
- [15] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响[J].生态学报,2015,35(20):6678–6685.
- [16] 管阳,纪永福,张莹花,等.风沙流对梭梭幼苗光合作用的影响[J].甘肃农业大学学报,2018,53(2):108–112.
- [17] 马会雷,张婷凤,周瑞莲,等.海岸不同坡向滨麦光合特性与风速异质环境的关系[J].生态学报,2018,38(10):3504–3513.
- [18] Schymanski S J, Or D. Wind increases leaf water use efficiency [J]. Plant, Cell & Environment, 2016, 39(7): 1448–1459.
- [19] 杨显基,杜建会,秦晶,等.海岸沙生植物老鼠耳(*Spinifex littoreus*)叶水势对风蚀、沙埋和风沙流磨蚀的响应[J].生态学杂志,2017(5):1215–1221.
- [20] 李道明,纪永福,张莹花,等.风沙流胁迫对霸王幼苗生理特征的影响[J].西北农林科技大学学报,2019(3):103–110.
- [21] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.强风沙流吹袭对樟子松幼苗生长特性及其逆境生理特征的影响[J].生态学杂志,2015(4):901–906.
- [22] 于云江,辛越勇,刘家琼,等.风和风沙流对不同固沙植物生理状态的影响[J].植物学报,1998,40(10):962–968.
- [23] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.风沙流频繁吹袭对樟子松幼苗光合水分代谢的影响[J].草业学报,2015(10):149–156.
- [24] 王铸豪.植物与环境[M].北京:科学出版社,1986.
- [25] 李传荣,许景伟,刘立川,等.沙质海岸黑松分枝格局特征及其抗风折能力分析[J].植物生态学报,2011,35(9):926–936.
- [26] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth[J]. Bioscience, 1997, 47: 235–242.
- [27] Sellier D, Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds[J]. American Journal of Botany, 2009, 96(5): 885–896.
- [28] Harper J L. Population Biology of Plant. [M]. London, UK: Academic Press, 1977.
- [29] 屈志强,刘连友,吕艳丽.沙生植物构型及其与抗风蚀能力关系研究综述[J].生态学杂志,2011,30(2):357–362.
- [30] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109: 7–13.

Comparison of tolerance threshold of coastal tree species with windbreak and sand fixation to strong wind-drift blowing

Zhou Ruilian, Qiang Shengbin, Pang Jinqiang, Song Yu

(College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

Abstract: The ratio of leaf deciduous, changes in leaf morphology, color, stem morphology in the *Vitex trifolia*, *Tamarix chinensis*, *Amorpha fruticosa*, *Pinus thunbergii* were investigated during and after expose to strong wind blowing and wind-drift blowing (at $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ with $172.93\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) for short-term treatment (40 min) and interval treatment (20 min, repairing for 24 h, recycling 3 times), and long-term 6 h treatment by using methods of combination of outdoor portable wind tunnel with field investigation. The tolerance threshold of four tress species were evaluated by pant morphology trait, bend and breakage of stems or branches, leaf shedding ratio, plant survival rate by field investigation after treatment in the fall and winter, and spring next year. The results showed that: (1) Four tress all restored and had leafy in next spring, exhibited higher tolerance to strong wind blowing after short-term treatment with strong wind blowing and wind-drift blowing. (2) During interval strong wind blowing and wind-drift blowing, leaves of the four tree species partly fell off, the tops of the plants damaged, and the stems bent, but they all survived in the second year and exhibited higher tolerance to strong interval wind blowing. (3) Under long-term treatment with wind blowing and wind-drift blowing for 6 h, there were differences in capacity of tolerance to it among four tress. During wind blowing treatment, there were 57%–69% leaves off, the stem tilted, branches severely broken, lots of holes in the leaves. But after repairing in the fall and winter, *T. chinensis* could recover by 100% in spring, *P. thunbergii* by 70%, *A. fruticosa* was dead under wind-drift blowing, *V. trifolia* was dead under wind blowing and wind-drift blowing in next spring. The tolerance threshold was *T. chinensis*>*P. thunbergii*>*A. fruticosa*>*V. trifolia*. However, there were similar root system architecture (deep root system, developed lateral roots, and adventitious roots (*V. trifolia*) among four stress to play a role in anchorage, which could be a key for four tress to resistance to strong winds blowing. But, there were difference in branch system architecture among four tresses, which could be reason why they had their different tolerance thresholds.

Key words: dominant tree species with resistance to wind blowing; leaf characteristics; plant orphological characteristics; adaptation strategies; wind blowing and wind-drift blowing