

风沙流对梭梭冠型特征影响的风洞模拟研究*

孙 涛¹ 马剑平¹ 师生波² 韩福贵¹
张裕年¹ 王方琳¹ 万 翔¹ 张红媛¹

(1. 甘肃省治沙研究所 / 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室 - 省部共建国家重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730070;
2. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘要 为了研究风沙流胁迫环境对梭梭 *Haloxylon ammodendron* 植株冠型特征的影响和适应机制, 以 2 a 生梭梭为研究对象, 在风沙环境风洞中分别模拟 5、8、10、13、16 和 18 m·s⁻¹ 风沙流胁迫环境, 定量分析风沙流胁迫对梭梭的生长和冠型特征的影响。结果表明: (1) 不同强度风沙流胁迫后, 梭梭枝条外表产生的伤害特征表现不一, 植株恢复正常生长所需的时间也不同。18 m·s⁻¹ 风沙流胁迫 20 min 已达到致死风速, 梭梭枝条恢复困难, 永久死亡。(2) 梭梭冠幅和植株体积大小随风沙流胁迫强度的增加呈先升高后降低的趋势。梭梭冠幅和植株体积累计增加量大小排序分别为: 轻度风沙流胁迫 > 中度风沙流胁迫 > 重度风沙流胁迫。(3) 梭梭枝条长度、分枝数量和枝条直径大小随风沙流胁迫强度的增加呈二项式曲线变化, 新生枝长度累加量呈直线方程快速减少, 表明梭梭具有较强的形态可塑性与变异性。

关键词 风洞模拟; 风沙流; 胁迫; 梭梭; 冠型特征

中图分类号: S728 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 04-0007-09

Effect on the Phenotype of *Haloxylon ammodendron* by Wind Sand-blown Stress Simulated in the Wind Tunnel

SUN Tao¹ MA Jianping¹ SHI Shengbo² HAN Fugui¹
ZHANG Yunian¹ WANG Fanglin¹ WAN Xiang¹ ZHANG Hongyuan¹

(1. Gansu Desert Control Research Institute/State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China)

Abstract In order to study the phenotype characteristic and adaptive mechanism of *Haloxylon ammodendron* in the stress of wind carrying-sand environment, 2-years old breedings of *H. ammodendron* as research objects, 3 gradients of carrying-sand environment had been simulated in the wind tunnel, where there were include the mild wind-sand stress environment (5, 8 m·s⁻¹), moderate (10, 13 m·s⁻¹), severe (16 m·s⁻¹) and extra-severe wind sand-blown environment (18 m·s⁻¹). The results showed that (1) The appearance damage of the branches of *H. ammodendron* caused by wind sand-blown was different related to the different gradients of wind sand-blown, while, the time required for plants to resume normal growth situation was also different after the wind-blown. The branches of *H. ammodendron* died permanently after 20 minutes under the extra-severe wind sand-blown of 18 m·s⁻¹, meaning to lethal damage. (2) With the increase of the intensity of the wind sand-blown, the crown width and the plant volume of *H. ammodendron* increased firstly and then gradually decreased, the

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660237)。

第一作者: 孙涛 (1978—), 男, 副研究员, 主要从事荒漠生态、荒漠植被恢复及荒漠化防治等方面的工作, E-mail: sunywave@sohu.

sequence of the accumulation of the crown and the plant volume from the high to low was: the mild sand-blown wind> the moderate wind sand-blown>the severe wind sand-blown. (3) With the increase of the intensity of wind carrying-sand, the trend of the length,the number of branches and the branch's diameter of *H. ammodendron* showed a binomial curve that first increased and then decreased, while,the cumulative growth length of new branches decreased sharply as a linear equation, indicating that *H. ammodendron* has strong morphological plasticity and variability.

Key words wind tunnel simulate; wind sand-blown; stress; *Haloxylon ammodendron*; phenotype characteristic

风沙流是严重影响和制约干旱、半干旱荒漠区经济可持续发展和生态环境恢复重建的重要限制因素。我国约有 18.03% 的国土面积遭受风沙流危害的影响^[1], 频繁的风沙流必然会影响幼苗的生长发育, 导致荒漠植被更新不良以至出现退化现象^[2]。梭梭 *Haloxylon ammodendron* 是藜科 *Chenopodiaceae* 梭梭属超旱生乔木, 在中国西部干旱和半干旱荒漠地区广为分布, 为水土保持、防风固沙、改良盐碱土壤的重要植物资源, 具有较高的经济和生态价值, 并成为了沙区重要的防风固沙树种。仅甘肃省民勤绿洲外围就有近 3.5 万 hm^2 的人工梭梭林, 有效地防治了风沙危害, 维护了区域生态安全^[3]。随着防风固沙体系建设向纵深层次发展, 如何克服困难立地特殊生境, 建设高效益防护林体系一直被作为重要的研究课题, 而对适生树种生态功能的深入研究和选择则是困难立地植被恢复与生态重建成功与否的关键^[4]。

相关研究表明风沙流对植物幼苗的影响主要表现为生长点的机械损伤, 以及幼苗叶片光合功能的降低, 甚至可导致落叶死亡^[5-7], 而梭梭与风沙流之间的关系并不清楚。梭梭幼苗受风沙流伤害的程度怎样, 不同风沙流条件下梭梭植株的构型特征如何变化, 植株如何适应风沙环境等, 这些问题均需要更深入的进行研究才能解答。因此, 研究风沙流对梭梭生长的影响十分必要。鉴于此, 本试验采用风洞模拟手段, 研究不同风沙流输沙强度、不同风沙流持续时间下, 典型荒漠灌木梭梭幼苗冠型特征变化与风沙流胁迫间的关系, 确定梭梭幼苗受损程度与不同风沙流条件之间的量化关系, 最终揭示梭梭主要构件对风沙流胁迫的响应机制。研究结果对于揭示风沙环境中荒漠植物梭梭的受损过程和生存机制具有重要的科学意义, 为退化梭梭林植被恢复以及防风固沙林的建

设和维护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用花盆培育的 2 a 生梭梭植株苗为研究材料。梭梭苗于 2019 年 6 月在民勤治沙站通过种子种植, 2019 年 10 月假植到沙地内, 2020 年 4 月底将假植苗移栽种植到武威绿洲站内的实验基地花盆中。花盆基质采用人工配置的沙壤土(粘土: 沙比例为 1:1)。花盆深 50 cm, 宽 35 cm, 每个花盆种植 1 株梭梭。试验前 15 d, 选择长势一致, 生长正常, 高矮相似的梭梭作为试验用苗, 每个处理 6 盆。

在风沙流胁迫试验前 1 d, 将所有梭梭花盆从地内移到风洞内。试验期间, 每个处理的梭梭受到的光照、土壤条件以及人工养护方式相同, 及时浇水, 保证水分条件正常。花盆土壤水分含量在 1.5%~3% 范围内。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 在甘肃省治沙研究所风沙环境风洞内进行试验。该风洞洞体总长 39.8 m, 由七个部分构成, 分别是: 进气段、动力段、整流段、实验段、可调实验段和扩散段。其中, 试验段段体长度 16 m, 可调实验段又叫可移动实验段, 段体长度 2 m。实验时将植物材料放置到研究平台上, 调节高度后平移到可调实验段的位置上。调整平台高度, 使花盆上边沿与风洞实验段下边沿水平对齐, 这样保证了梭梭植株完全在风沙流胁迫和吹蚀中。如图 1 所示。

1.2.2 风沙流环境模拟 采用风洞实验段内覆沙的方法模拟近地表层风沙流。首先在风洞实验段内覆沙, 沙层长度 12 m, 厚度 0.1 m, 为各级风沙流的发育提供了良好的床面和充足的沙源。采用阶梯式

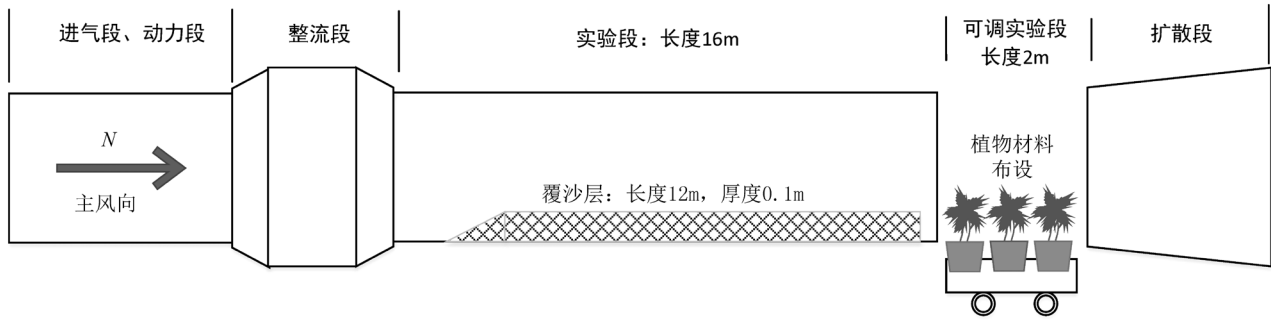


图 1 风沙环境风洞试验设置

Fig.1 The diagram of wind carrying-sand environment simulated in the wind tunnel

集沙仪测定不同风速条件下的近地表层 0~20 cm 高度输沙率如下： $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $14.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $24.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $45.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $60.57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为 $103 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

实验开始前进行预实验，通过不同吹蚀时间段，不同风沙流胁迫强度等多次预实验以及梭梭的表现形式，结合实际观测结果，本实验首先设置 6 个处理进行风沙流阈值试验，分别为 5、8、10、13、16 和 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风沙流环境，吹蚀时间均设置为 20 min，其中 5、 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 模拟轻度风沙流胁迫，10、 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 模拟中度风沙流胁迫、16 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 模拟重度风沙流胁迫， $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 模拟极重度风沙流胁迫。通过阈值试验选择出 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风沙流吹蚀 20 min 是梭梭的极限风沙流速， $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风沙流是梭梭的致死风沙流速。

1.2.3 风沙流胁迫试验时间设定 通过上述风沙流阈值试验，选择模拟 5 种风沙流环境，分别为 5、8、10、13、 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风沙流，以 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为实验对照进行不同风沙流吹蚀环境下梭梭构型的模拟研究。第一次风沙流胁迫模拟时间是 2020 年 6 月 12 日，之后平均每隔 18~22 d 模拟吹蚀一次。风沙流吹蚀次数和日期分别为：第 1 次 6 月 12 日，第 2 次 7 月 4 日，第 3 次 7 月 28 日，第 4 次 8 月 18 日，第 5 次 9 月 4 日，第 6 次 9 月 20 日。每次试验前 1 d 将花盆全部移到风洞内，保证梭梭在试验过程中环境一致，生长正常。每一次风沙流胁迫试验均安排在同一天上午 08:00—12:00 时进行，每个处理吹蚀 20 min 后将花盆移到树荫下，并于第二日将所有处理梭梭全部移到试验地内。

1.3 项目测定

1.3.1 梭梭冠型测定 将梭梭的迎风面（垂直于风向）、背风面（顺风向）方向固定，并在花盆上

做好标记。在每次风沙流吹蚀时均将花盆放置到同一位置。梭梭迎风面和背风面长度采用直尺测量，梭梭迎风面枝条最外沿处的垂直投影长度即为迎风面长度，垂直于迎风面的方向即为背风面，测量背风面枝条垂直投影长度为背风面长度。

(1) 枝条长度 (cm)：在第 1 次试验前，分别在每株梭梭上选择 3 个枝条做标记作为固定观测枝条，用直尺测量枝条的总长度即为枝条长度。(2) 新生枝条长度 (cm)：在固定的每根梭梭枝条上用直尺依次测定所有的当年生新生枝条长度，并计算均值可作为新生枝的生长长度。(3) 枝条直径 (mm)：采用游标卡尺测量各级枝条直径。在每个枝条的分级处、枝条中部、枝条顶部测定至少 3 次直径大小取平均值。(4) 冠幅面积和体积：梭梭冠幅按照椭圆的面积计算，冠幅面积 $CA (\text{m}^2) = 0.25 \times \text{迎风面长度} \times \text{背风面宽度}$ 。梭梭的体积按照半椭球体计算，体积 $V (\text{m}^3) = 0.25 \times \text{迎风面长度} \times \text{背风面宽度} \times \text{梭梭高度}^{[8]}$ 。(5) 新生枝条长度增加量 (cm)：每次测定的新生枝条长度均值与前次测定的新生枝条长度均值间的差值即为本时间段内新生枝条长度的增加量。该增加量有正有负，正值表示新生枝长度增加，负值表示新生枝长度减小。将风沙流胁迫吹蚀后计算的新生枝长度增加量进行累加所得数值为梭梭生长期新生枝条长度累加量。

1.3.2 梭梭各级枝序和枝条数量 实验最后一次风沙流吹蚀后 15 d (2020 年 10 月 4 日) 进行梭梭各级枝序和枝条数量的计算。植株的枝序按 Strahler 法确定^[9-10]，即由外及内确定枝序，然后计算各级枝序的枝条数量。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 软件进行整理，采用 SAS 9.0 软件进行统计分析，采用 Origin 9.0 软件进行

可视化制图。

2 结果与分析

2.1 不同风沙流胁迫后梭梭恢复状况和表现特征

由表 1 可知, 10 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭吹蚀后在 5 d 内基本恢复正常的生长, 13 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭在 8 d 内恢复正常生长, 16 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭有 5%~8% 新生枝逐渐发黑失水枯死, 中下部部分枝条呈卷曲状, 在吹蚀后 12~15 d 内基本恢复正常生长, 18 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下吹蚀过后梭梭整体上表现出较为严重的伤害, 在吹蚀后 15 d 内有超过 60% 枝条脱水枯死, 尤其新生枝条脱水死亡严重。虽有部分枝条存活, 但是枝条形状已经受到风沙流严重侵蚀打磨, 表层伤痕明显, 基本不能恢复到风沙流胁迫之前的生长状态。总体来看, 在 20 min 内, 16 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下虽然能对植物体造成伤害, 但是此种伤害是暂时的, 在 12~15 d 内能够逐渐的恢复正常的生长, 而 18 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下对植物体来说已达到了致死伤害, 超过 60% 的枝条永久脱水枯死。

2.2 梭梭基本形态特征变化

由图 2 可知, 在不同风沙流胁迫下, 梭梭的

迎风面长度、背风面长度和植株高度均发生了变化。0、5、8、10 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭在自然生长状态中, 迎风面、背风面均随着时间的推移逐渐的增加, 并未受到风沙流胁迫的影响, 13 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭在多次的风沙流吹蚀下, 迎风面和背风面长度显示向外部凸出, 但是不明显。16 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭随风沙流侵袭次数的增加, 迎风面、背风面长度和高度均逐渐减小。由此表明, 轻度 (5、8 m·s⁻¹)、中度 (10、13 m·s⁻¹) 风沙流胁迫对梭梭植株高度的影响不大, 但是重度 (16 m·s⁻¹) 风沙流胁迫下, 梭梭高度受到了明显的影响, 有逐渐矮化趋势。

2.3 植株冠幅和体积变化

梭梭冠幅和植株体积大小均随着风沙流吹蚀次数的增加而发生变化, 但是不同风沙流强度胁迫下的梭梭冠幅和体积的增加量均不相同 (图 3)。0、5、8 m·s⁻¹ 风沙流胁迫下梭梭冠幅和体积均呈增大趋势, 累计冠幅增加量在 34% 以上, 其中 8 m·s⁻¹ 植株冠幅累计增加量最大为 43.62%; 10、13 m·s⁻¹ 植株在风沙流吹蚀下冠幅的增加量不大, 基本保持原样, 16 m·s⁻¹ 梭梭冠幅累计增加量呈减小趋势, 相比试验前梭梭冠幅减小了 48%

表 1 风沙流胁迫后不同时间梭梭枝条恢复描述

Table 1 Description of the recovery situation of *Haloxylon ammodendron* branches at different period after wind sand-blown stress

风沙流 / (m·s ⁻¹) Wind sand blown	风沙流胁迫后不同时间段 /d Different period after the stress of wind sand-blown					
	1	3	5	8	12	15
10	10%~20% 新枝 顶端颜色发暗,	5% 枝条顶部颜色 发暗, 中部枝条 表面有风蚀痕迹	枝条色泽基本恢 复原状, 植株恢 复正常状态			
13	20%~30% 新枝顶 端颜色发暗, 迎 风面部分枝条表 面发青, 植株中 部部分枝条弯曲 下垂	10%~20% 新生枝 顶端颜色发暗, 迎风面枝条表 面有风蚀痕迹, <5% 枝条弯曲	2% 新生枝顶端 发黑干枯, 中下 部枝条迎风面颜 色发白, 大部分 枝条恢复正常生 长状态	2% 新生枝顶端 发黑干枯, 部分 枝条顶端颜色呈 黄绿色, 分支处 枝条迎风面颜色 发白	植株正常生长状 态	
16	30%~50% 新枝 顶端颜色发暗, >15% 枝条弯曲 下垂, 迎风面 30% 枝条表面发 青、发暗	20%~30% 新生 枝顶端颜色仍发 暗, 10% 枝条顶 部弯曲, 迎风面 10% 枝条表面颜 色仍发青	10% 左右枝条顶 端失水, 部分黑 色, 分支处部分 新芽枯死, 20% 枝条迎风面有风 蚀痕迹, 呈灰白 色并呈弯曲状	5%~8% 新生枝 顶端发黑干枯, 新枝顶端呈淡黄 色, 植株中下部 枝条迎风面颜色 呈灰白, 并呈弯 曲状	5%~8% 新生枝 顶端发黑永久枯 死, 中下部枝条 迎风侧呈灰白, 10%~20% 枝条 呈卷曲状, 其余 枝恢复正常	5% 新生枝顶 端发黑枯死, 10%~15% 枝条 迎风侧色泽灰白 并呈卷曲状, 部 分枝条色泽呈暗 绿色
18	整株枝条色泽发 暗, >80% 枝条 弯曲下垂, 植株 迎风侧 >60% 色 泽呈灰白,	>80% 枝条色泽 发暗; 中上部枝 顶端发黑, >60% 新生枝顶端脱水 干枯, >70% 枝 条下垂	80% 新生枝顶端 发黑枯死, >60% 枝条迎风侧呈灰 白, 中上部脱水 有皱痕; 80% 枝 条卷曲状	>60% 新生枝条 永久枯死, 整株 50% 左右枝条枯 死, 其余枝条呈 卷曲状	>60% 枝条枯死, 存活枝条植株颜 色发黄, 呈卷曲 状, 表层伤痕明 显	>60% 枝条枯死, 存活枝大部呈卷 曲状, 枝条迎风 面色泽灰白, 主 枝迎风面颜色仍 发青

(表2)。不同风沙流胁迫下梭梭冠幅累计增加量大小排序为： $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。梭梭植株空间体积累计增加量最大为 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 梭梭，增加量74.21%，最小为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 梭梭，植株体积累计增加量减小了80% (表3)。不同风沙流胁迫下，梭梭体积累计增加量大小排序为： $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>$

$13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}>16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整体上看，对照($0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和轻度($5、8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)风沙流胁迫对梭梭冠幅和体积的影响不大，中度($10、13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和重度($16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)对梭梭的生长产生了影响，在生长季内冠幅和体积大小相比试验前有变化。图3显示，尤其 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风沙流胁迫对梭梭生长产生了明显的影响，冠幅和体积均由外向内凹进，植株冠幅和体

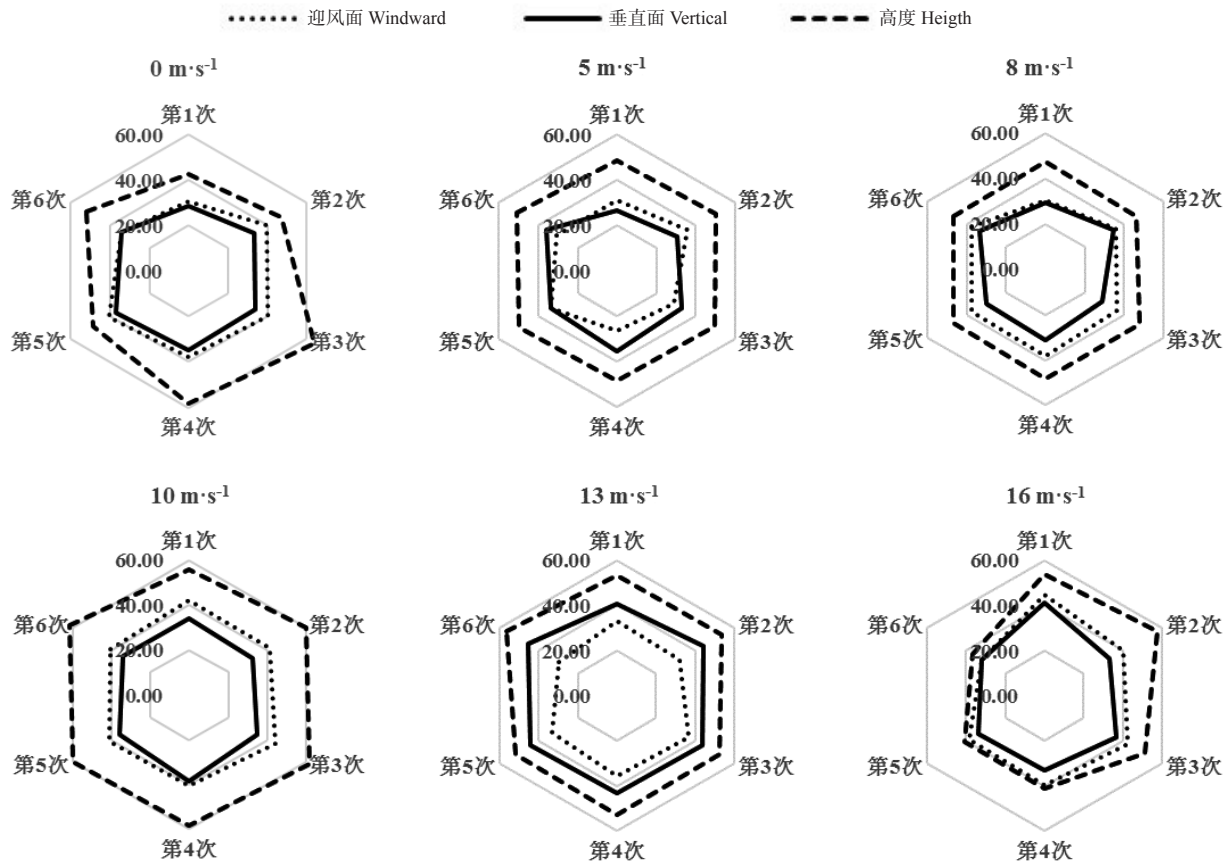


图2 不同风沙流胁迫下梭梭植株迎风面、垂直面和高度变化特征

Fig.2 Windward, vertical and height change of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

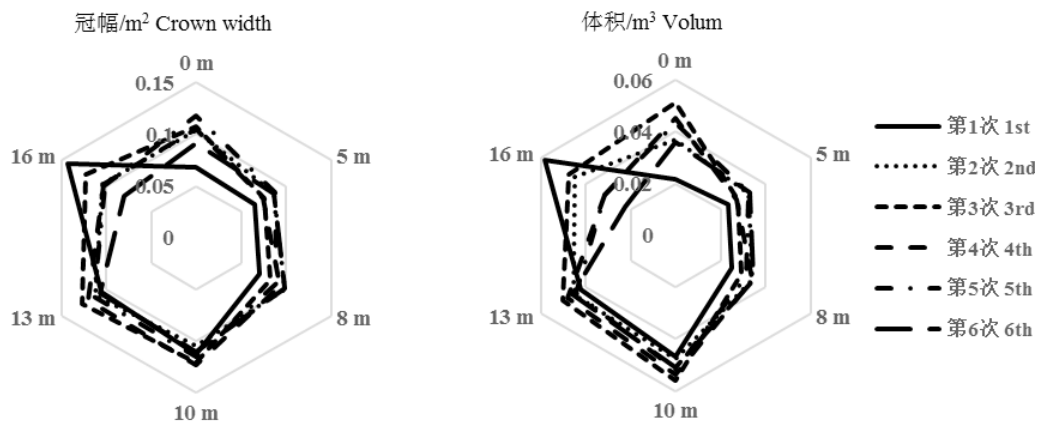


图3 不同风沙流胁迫下梭梭植株冠幅、体积变化

Fig.3 Changes of crown width and volum of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

表 2 不同风沙流胁迫下梭梭植株冠幅增量变化
Table 2 Increase changes of crown width of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

吹蚀次数 Simulated times	风速 /(m · s ⁻¹) Wind speed					
	0	5	8	10	13	16
第 1~2 次 1-2 times	52.06	-2.05	41.61	-6.41	6.81	-27.32
第 2~3 次 2-3 times	2.86	1.77	-17.34	15.23	13.57	17.54
第 3~4 次 3-4 times	-2.21	-0.62	14.32	1.23	-5.06	-16.33
第 4~5 次 4-5 times	13.13	16.82	-5.10	-6.19	-6.06	-0.43
第 5~6 次 5-6 times	-22.42	-1.56	10.13	-4.52	-5.65	-21.43
累计增加量 Cumulative increase	43.42	34.38	43.62	-0.67	3.62	-47.97

表 3 不同风沙流胁迫下梭梭植株体积增量变化
Table 3 Increase volume changes of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

吹蚀次数 Simulated times	风速 /(m · s ⁻¹) Wind speed					
	0	5	8	10	13	16
第 1~2 次 1-2 times	68.69	2.00	38.62	1.43	7.82	-22.83
第 2~3 次 2-3 times	39.07	-0.25	-14.36	17.78	10.41	5.24
第 3~4 次 3-4 times	-11.37	-1.96	15.11	-4.25	-4.15	-33.17
第 4~5 次 4-5 times	-5.07	20.02	-7.71	-3.51	-8.14	-0.43
第 5~6 次 5-6 times	-17.11	0.41	10.13	-1.87	3.48	-29.10
累计增加量 Cumulative increase	74.21	41.93	41.78	9.58	9.42	-80.30

积均减小。

2.4 枝条长度变化

由图 4 可知,梭梭在轻度(5、8 m · s⁻¹)和中度(10、13 m · s⁻¹)风沙流吹蚀后枝条长度变化不明显,基本呈缓慢增加的一种趋势;但是在 13 m · s⁻¹风沙流吹蚀下梭梭枝条长度呈缓慢下降趋势,重度(16 m · s⁻¹)胁迫下枝条长度在每次风沙流吹蚀下减少明显。如图 5 所示,0、16 m · s⁻¹胁迫下梭梭枝条长度数值分散,变幅大,二者间差异显著($P<0.05$),0 m · s⁻¹胁迫下梭梭枝条最长,而 16 m · s⁻¹胁迫下梭梭枝条最短,轻度(5、8 m · s⁻¹)和中度(10、13 m · s⁻¹)胁迫下梭梭枝条数值集中,变幅较小,8 m · s⁻¹、10 m · s⁻¹两者间差异不显著($P>0.05$),但是 8 m · s⁻¹和 13 m · s⁻¹胁迫下梭梭之间差异显著($P<0.05$)。

2.5 新生枝条长度变化

新生枝尤其是新生枝顶端对风沙流胁迫较为敏感,易受到伤害。在整个生长季,不同风沙流胁迫

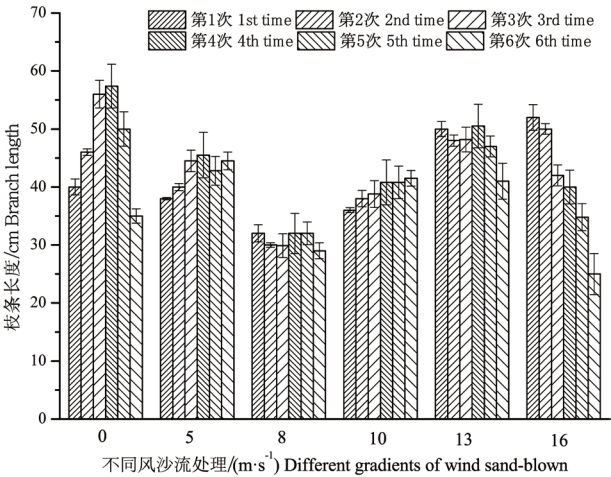
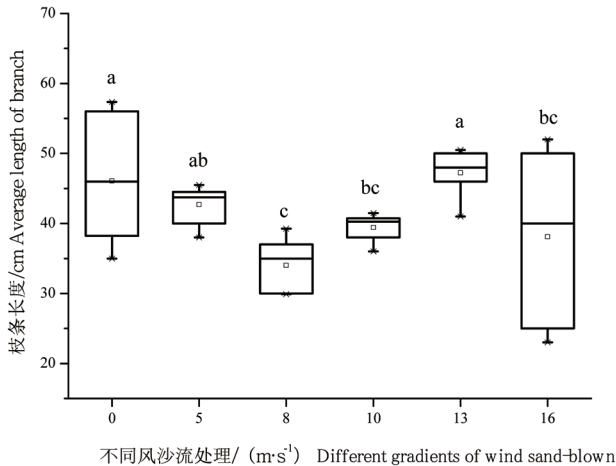


图 4 不同风沙流胁迫次数梭梭枝条长度变化
Fig. 4 Change of *Haloxylon ammodendron*'s branch length under different times of wind sand-blown

下梭梭新生枝条长度发生了不同程度的变化。新生枝平均长度在 4.0~9.0 cm,方差分析表明:10 m · s⁻¹胁迫下梭梭新生枝平均长度显著最长($P<0.05$),

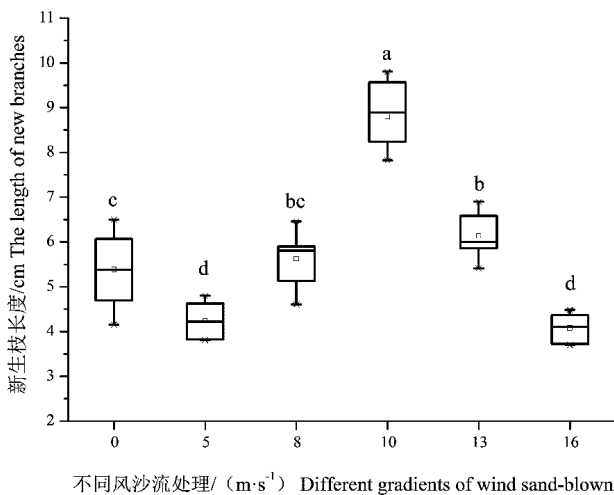


不同风沙流处理/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Different gradients of wind sand-blown
注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。
Note: different letters mean significant different among treatments at 0.05 level.

图 5 风沙流胁迫后梭梭枝条平均长度

Fig. 5 The average length of *Haloxylon ammodendron*'s branches after wind sand-blown stress

$16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 胁迫下长度显著最短 ($P < 0.05$), 各处理梭梭新生枝长度大小排序为: $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (8.8 cm) $> 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6.1 cm) $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (5.6 cm) $> 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (5.4 cm) $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (4.5 cm) $> 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (4.1 cm)。对各处理新生枝条平均长度进行方程拟合, 符合二项式曲线 ($Y = 4.3062 + 0.9605X - 0.0927X^2$, $R^2 = 0.2832$) 变化趋势, 表明从 0 到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随风沙流强度的逐渐增强, 新生枝条长度总体上表现出先增加后减少的变化趋势。与 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (对照) 相比, 轻度、中度和重度风沙流胁迫使梭梭新生枝条长度分别减少 4.7%, 增加了 38.2%, 减少了 24.5%。



不同风沙流处理/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Different gradients of wind sand-blown
注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。
Note: different letters mean significant different among treatments at 0.05 level.

图 6 不同风沙流胁迫梭梭新生枝条平均长度

Fig. 6 The average length of new branches of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

每次风沙流胁迫后, 新生枝条长度的增加量有增有减, 总体在 $-2 \sim 2 \text{ cm}$ 波动。随风沙流强度的增加, 新生枝长度累计增加量呈直线方程变化趋势 ($Y = -0.21X + 1.167$, $R^2 = 0.909$), 表明梭梭新生枝条长度的增加随风沙流强度的增大逐渐减小。

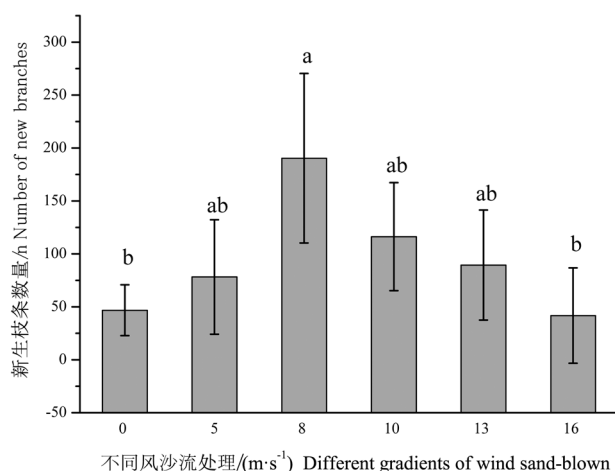
2.6 枝条数量和直径大小

由图 7 可知, 不同风沙流胁迫下梭梭新生枝数量间差异显著 ($P < 0.05$)。 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 梭梭枝条数量最高为 190 个, 显著高于 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 胁迫下梭梭 ($P < 0.05$), 其它处理梭梭新生枝数量有差异, 但相互间差异不显著 ($P > 0.05$), $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 梭梭新生枝数量最低, 仅为 41 个。不同风沙流胁迫下梭梭枝条数量大小排序为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随风沙流强度的增加, 梭梭新生枝条数量整体呈先增后降的二项式曲线变化趋势 ($Y = -16.998X^2 + 117.12X - 58.268$, $R^2 = 0.7223$)。表明轻度 (5 、 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、中度 (10 、 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫下可促使梭梭进一步分枝, 而重度 ($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫显著抑制了梭梭新生枝的分枝数量。

不同风沙流胁迫对梭梭枝条的直径大小产生了影响, 当年生新生枝条对风沙流胁迫较为敏感, 不同胁迫下梭梭间直径大小有差异, 由图 8 可知, $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风沙流胁迫下梭梭直径最小, 显著小于其它胁迫下的梭梭 ($P < 0.05$), 而其它胁迫下梭梭间新生枝直径差异不显著 ($P > 0.05$)。新生枝直径大小排序为: $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} > 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 讨论与结论

风沙流中的含沙量直接影响生长到地表的植物。风沙流对植物的影响包括沙粒在风的作用下对植物体表面造成的磨蚀、击打、刮擦等机械损伤。在轻度 (5 、 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和中度 (10 、 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫下, 由于含沙量较少, 对梭梭枝条的机械损伤并不明显, 但是随着风沙流强度的增大, 在重度 ($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫下, 对枝条的机械损伤较为严重, 尤其新生枝较为敏感, 大量新生枝顶端由于风沙流的机械损伤造成的伤害是不可逆的。梭梭具有很强的抗风蚀性能, 在不同的生境中梭梭构型能够表现出很强的环境变异^[11], 但是, 一旦超过风速阈值, 梭梭植株则表现出明显的受害特征: 生长受限、冠幅缩小、生长状态差, 甚

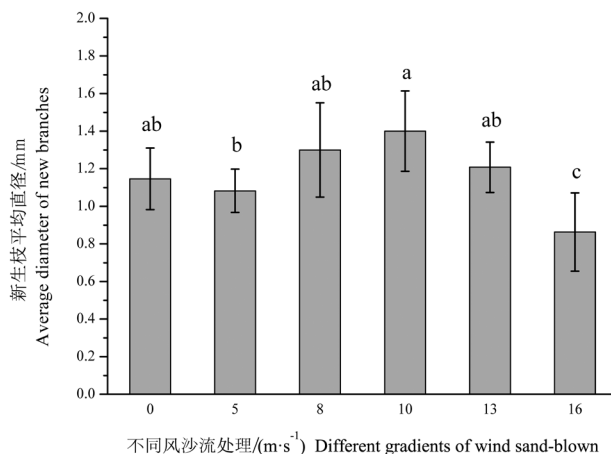


注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: different letters mean significant different among treatments at 0.05 level.

图 7 不同风沙流胁迫梭梭新生枝数量

Fig. 7 The number of new branches of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown



注：不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: different letters mean significant different among treatments at 0.05 level.

图 8 不同风沙流胁迫梭梭枝条直径大小

Fig. 8 The diameter of new branches of *Haloxylon ammodendron* under different wind sand-blown

至死亡^[12]。在风沙流吹袭中，沙粒对叶片磨蚀导致的物理伤害引发叶片失水，在轻度 ($5、8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和中度 ($10、13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫下，枝条失水可以很快的恢复，对梭梭生长没有影响，但是当风沙流胁迫加剧，机械损伤严重时导致枝条失水的物理伤害是永久不可逆的，在重度和极重度风沙流环境中梭梭植株受害明显，尤其在极重度 ($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫 20 min 后梭梭枝条失水严重枯死，已经不能正常的恢复生长，因此 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 吹蚀 20 min 已经达到了风沙流胁迫的阈值。

植物受到风的吹蚀会引起茎干弯曲，植株变矮^[13]，基径会变得较为粗壮。长期在自然大风条件下木本猪毛菜 *Salsola arbuscula* 和霸王 *Zygophyllum xanthoxylum* 二者株高均减小，基径增粗^[14]。对玉米的研究表明在风的作用下，玉米茎秆变得更为粗壮^[15]，同时影响植物的冠幅大小。本研究中，梭梭在不同的风沙流强度胁迫下枝条长度先增加、平均直径也逐渐增大，表明轻度 ($5、8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和中度 ($10、13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的风沙流对植株的生长具有促进作用，但是在重度 ($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和极重度 ($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的风沙流胁迫下，枝条长度和直径显著减小，此时，梭梭已经受到了风沙流胁迫的伤害，严重影响到梭梭的正常生长。风沙流胁迫下，梭梭通过逐渐缩短枝条长度，减小冠幅、体积大小，进而减少了空气阻力，使其更好的适应环境^[12,16]。分布在沙质海岸带上的黑松 *Pinus*

thunbergii 通过减小自身冠幅适应风环境，同时通过减小分枝长度、分枝率来增强抗风折能力^[17]。

植物体在不同生境中最先作出反应的应该是在构件水平上，通过其构件的数量和生长状况使得植株表现出对不同生境的适应状况^[18-19]。本研究中，梭梭枝条数量随着风沙流胁迫强度的增加表现出先增加后减少的趋势，枝条数量增多植株构型会变得较为复杂，植株所受到风的阻力也会相应的增加，但是此时梭梭受到的风沙流胁迫并不足以对植株造成伤害，而是刺激植物产生更多的新生枝，占据更多的空间资源为其提供更广阔的光合作用场地，进而提高自身光能利用效率，增强自身对其他资源的占有和利用率^[20-21]，从而揭示了梭梭在一定的风沙流胁迫下分枝格局具有很好的可塑性和变异性。

综上所述，(1) 不同强度的风沙流吹蚀 20 min 后对梭梭枝条外表产生的伤害特征表现不一，吹后恢复正常生长所需的时间也不同。轻度风沙流胁迫后梭梭未表现出明显的伤害特征；中度 ($10、13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫后梭梭部分新生枝顶端失水枯死，在吹后 8~10 d 恢复正常生长状态；重度 ($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫后梭梭 5%~10% 枝条脱水枯死，吹后 12~15 d 植株恢复生长；极重度 ($18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫已经达到梭梭致死伤害的风速，枝条永久死亡。

(2) 梭梭冠幅和植株体积随着风沙流胁迫强度

的增加呈先升高后逐渐降低的趋势, 轻度风沙流胁迫后梭梭累计增加量最高, 中度 ($10 \sim 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫变化不大, 而重度 ($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风沙流胁迫后累计增加量显著减小。

(3) 梭梭枝条长度、分枝数、枝条直径具有较强的形态可塑性及变异性, 随风沙流胁迫强度的增加, 均呈先增加后减小的二项式曲线变化。新生枝对风沙流胁迫较为敏感, 随着风沙流胁迫强度的增加, 新生枝长度累计增加量呈直线方程快速减少。

参考文献

- [1] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 3(4): 257-266.
- [2] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 等. 民勤荒漠草场植物群落自然更新和退化演替初探[J]. 草业科学, 2008, 25(8): 13-18.
- [3] 张龙生, 程小云, 李萍, 等. 甘肃省森林资源现状及动态变化分析[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(3): 73-79.
- [4] 林文欢, 詹潮安, 郑道序, 等. 粤东岩质海岸困难立地造林树种选择[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(5): 86-92.
- [5] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 等. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 53-58.
- [6] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 等. 风沙流对植物生长影响的研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 262-267.
- [7] 唐霞, 崔建垣, 曲浩, 等. 风对科尔沁地区几种常见作物幼苗光合、蒸腾特性的影响[J]. 生态学杂志, 2011(3): 471-476.
- [8] 李嵩, 郑新军, 唐立松, 等. 基于异速生长理论的准噶尔盆地荒漠灌丛形态研究[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 471-479.
- [9] 马克明, 祖元刚. 植被格局的分形模型: 植被格局的分形特征[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 111-117.
- [10] SPRUGEL D G, HINCKLEY T M, SCHAAP W. The theory and practice of branch autonomy[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1991, 10.1146/annurev.es.22.110191.001521.
- [11] 宋于洋. 梭梭构件格局的环境变异[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 60-65.
- [12] 周瑞莲, 逢金强, 宋玉. 海岸抗风优势植物紫穗槐对净风和风沙流的生理响应[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 40-52.
- [13] 赵哈林, 李瑾, 周瑞莲, 等. 玉米幼苗对风沙流强度变化的生理响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 61-66.
- [14] 南江, 赵晓英, 原慧, 等. 霸王和木本猪毛菜在遮风和不遮风环境下的表型特征差异[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5758-5765.
- [15] WHITEHEAD F H. Experimental studies of the effect of wind on plant growth and anatomy II. Helianthus Annuus[J]. New Phytologist, 1962, 61(1): 59-62.
- [16] 陈晓娜, 赵纳祺, 高君亮, 等. 风和风沙流对植物的影响研究综述[J]. 世界林业研究, 2020, 33(5): 37-41.
- [17] 张丹, 李传荣, 许景伟, 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.
- [18] TELEWSKI F W, JAFFE M J. Thigmomorphogenesis: Field and laboratory studies of Abies fraseri in response to wind or mechanical perturbation[J]. Physiologia Plantarum, 1986, 66(2): 211-218.
- [19] 李罡, 张文辉, 于世川, 等. 辽东栎林内不同小生境下幼树植冠构型分析[J]. 西北植物学报, 2016, 36(3): 588-595.
- [20] 许强, 杨自辉, 郭树江, 等. 梭梭不同生长阶段的枝系构型特征[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 50-54.
- [21] 热孜 古力米热. 长期大风对霸王和木本猪毛菜叶解剖结构的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.