

DOI: 10.20103/j.stxb.202401240222

张萨如拉, 贺俊英, 苏亚拉图, 赵敏, 马少薇. 浑善达克沙地黄柳小枝功能性状对风蚀环境响应的性别差异. 生态学报, 2024, 44(15): 6874-6880.
Zhang Sarula, He J Y, Suyalatu, Zhao M, Ma S W. Sex differences in response of twig functional traits to wind erosion of *Salix gordejvii* in Hunshandake sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6874-6880.

浑善达克沙地黄柳小枝功能性状对风蚀环境响应的性别差异

张萨如拉, 贺俊英, 苏亚拉图, 赵敏, 马少薇*

内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 呼和浩特 010022

摘要: 植物功能性状及性状间权衡关系对揭示植物生长策略、资源分配模式以及探讨其生理生态过程的内在机制具有重要意义, 但针对雌雄异株植物功能性状对其生境响应的性别差异却鲜有报道。以雌雄异株植物黄柳当年生末端小枝为研究对象, 从枝水平、叶水平比较雌雄植株功能性状及性状间权衡关系对风蚀环境响应的性别差异。结果显示: 小枝水平上, 对照环境下雌雄植株茎干重-总叶干重之间的权衡均倾向于总叶干重, 风蚀环境下则倾向于茎干重, 且雌株权衡值分别为雄株的 4.3 倍和 3.7 倍; 雌雄植株茎干重-总叶面积的权衡在各生境下均偏向于茎干重, 两性的权衡值差异不大。叶水平上, 相同叶片干重下, 风蚀对雄株叶片面积生长的抑制作用更显著; 雌株叶片干重与叶柄干重呈等速生长关系, 而雄株呈小于理论值 1 的异速生长关系, 且在风蚀环境中, 相同叶柄干重下, 雌株叶片干重的累积速率比雄株快。研究表明, 黄柳雌雄植株小枝各功能性状间的关系对风蚀环境具有不同的响应, 雌株比雄株更倾向于将资源投资在光合器官生长中, 且风蚀对雄株光合器官生长的抑制作用更显著。

关键词: 黄柳; 雌雄异株; 风蚀; 功能性状; 异速生长; 权衡

Sex differences in response of twig functional traits to wind erosion of *Salix gordejvii* in Hunshandake sandy land

ZHANG Sarula, HE Junying, Suyalatu, ZHAO Min, MA Shaowei*

College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

Abstract: Trade-off relationships among plant functional traits are key variables for revealing plant growth strategies and resource allocation patterns and exploring the underlying mechanisms of their physiological and ecological processes. Dioecious plants have been considered to be a consequence of different requirements for disseminating pollen and producing fruits and seeds, and played major roles in maintaining the function of terrestrial ecosystems. Previous studies have shown that sexual differences in trade-off relationships among twig components in dioecious species existed, and females tended to have more photosynthetic organ area, mass and stoichiometric element contents than males. The trade-off relationships were not only determined by the genetic characteristics of plants, but also influenced by external environmental factors. However, little attention has been paid to sex differences in the response of functional traits to habitat in dioecious plants. To explore the sex differences, male and female *Salix gordejvii* shrubs growing on inter-dune land (no erosion) and on the windward slope (20 cm wind erosion) of the dune in Hunshandake Sandy Land were chosen and their twig functional traits, such as lamina mass, lamina area, petiole mass, and stem mass were measured, respectively. The results showed that at the twig level, the trade-offs between stem mass and total leaf mass of males and females in control condition were beneficial for total

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2022LHQN03007); 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目 (NJZZ22589)

收稿日期: 2024-01-24; **采用日期:** 2024-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mashaowei1992@163.com

leaf mass, while that in wind erosion group were beneficial for stem mass. The trade-off values of females were 4.3 times and 3.7 times that of males, respectively. The trade-offs between stem mass and total leaf area in both sexes were beneficial for stem mass under control and wind erosion condition, and there was no difference in the trade-off value between the sexes. At the leaf level, the negative impact of wind erosion on males was greater than that on females in growth of lamina area under the same lamina mass. Furthermore, an isometric relationship between lamina mass and petiole mass was existed in females, while an allometric relationship with a slope <1.0 was existed in males. In the wind erosion condition, the accumulation rate of lamina mass in females was faster than that in males under the same petiole mass. Our results demonstrated that the relationships among twig functional traits of male and female *S. gordejvii* had different responses to wind erosion, with females tending to invest more resources in the growth of photosynthetic organs than males. Meanwhile, wind erosion inhibited the growth of photosynthetic organs more in males than in females. These reflected resource allocation strategy and environmental adaptation in both sexes.

Key Words: *Salix gordejvii*; dioecious; wind erosion; functional traits; allometric growth; trade-off

植物功能性状对植物的形态、生理和生活史具有很强的生态指示作用,是联系环境与植物的纽带,研究植物功能性状及性状间权衡关系既可以了解植物是如何将有限地资源合理分配给各个器官以保证其生长和繁殖的需要,还可以很好地揭示植物对其生长环境适应的生态策略^[1]。植物小枝,尤其是当年生小枝是植物体上最具活力的部分,其次级组织较少,营养物质和碳水化合物的流动率高,比整个植物体更能反映植物对环境的响应^[2]。目前,在植物因生境变化而采取的生存策略的相关研究中,多通过异速生长理论分析植物小枝性状间的权衡关系,以阐述植物在不同环境中利用资源的能力和资源分配策略^[3-4]。因此,研究小枝功能性状特征及性状间权衡关系对反映和揭示植物的生活史对策具有重要意义。

雌雄异株植物是地球陆地生态系统的重要组成部分,约占被子植物总数的 6%,对保护物种多样性和维持生态系统稳定性具有十分重要的作用^[5]。由于长期进化的结果,这类植物的雌雄植株在形态生长、资源需求以及生殖投入等方面具有明显的性别差异^[6]。研究表明,为雌雄植株繁殖功能服务的小枝及其所支持的叶片之间的权衡关系也存在差异,雌株在相同支撑器官质量下具有较大的光合器官面积或干重,同时也需要更多的碳、氮、磷等化学计量特征含量,从而满足其在生殖投入方面的需求^[7-9]。然而,功能性状间的关系除了由植物自身的遗传特性决定,还受外界环境因素所决定^[10],但针对雌雄异株植物功能性状间的关系对其生境响应的性别差异还鲜少被报道。

黄柳(*Salix gordejvii*)隶属于杨柳科(Salicaceae)柳属(*Salix*),是典型的雌雄异株植物,具有生长迅速、耐干旱、抗风沙等特性,是京津风沙源治理区首选推广的生物沙障之一,在改善沙区生态环境、逆转荒漠化过程中起着不可替代的作用^[11]。前期研究发现,风蚀环境下,黄柳雌株比雄株具有更强的抗逆性,雌株通过维持较高的光合作用以保证植株的生长,从而表现出比雄株更强的抗风蚀能力^[12],据此我们推测,黄柳雌雄植株小枝功能性状权衡关系对风蚀环境的响应也存在差异,雌株更倾向于将资源投资在光合器官生长上。因此,本研究以不同生境下的黄柳雌雄植株为研究对象,对末端小枝各功能性状之间的权衡关系进行分析,以期揭示黄柳雌雄植株功能性状间关系对风蚀环境响应的性别差异。研究结果可为探究雌雄异株植物两性植株资源分配模式提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浑善达克沙地腹地正蓝旗境内(41°56'—43°11' N, 115°00'—116°42' E),属中温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,夏季温热短促。年平均温度 1.7 °C,极端最高温度 35.9 °C,极端最低温度-36.6 °C,平均日照时数 3037 h, ≥ 10 °C 年积温为 2000 °C;年平均降水量为 355 mm,主要集中在 7—9 月,约占全年的

80%—90%;年均蒸发量为 1931.4 mm;无霜期 110 d;年平均风速 4 m/s,主要风向为西北风,在冬春两季风力强大且频繁。土壤类型为栗钙土,其上分布有风沙土。植被种类较为丰富,常见植物有沙地榆(*Ulmus pumila* var. *sabulosa*)、黄柳、小红柳(*S. microstachya* var. *bordensis*)、褐沙蒿(*Artemisia halodendron*)、羊草(*Leymus chinensis*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等^[12]。

1.2 试验设计与测定方法

本试验以 2019 年在浑善达克沙地流动沙丘上扦插种植的黄柳人工林为取样地,扦插时,将长度约为 50 cm 的插穗插入土壤中,其上留约 5 cm 裸露于地表。2023 年 4 月(盛花期),根据繁殖器官(柔荑花序)识别并标记生长在丘间地(对照组)和迎风坡(风蚀组)上的植株性别;同年 8 月,根据插穗的裸露程度在每个生境下选取对照组和风蚀组的试验材料,其中对照组插穗顶部裸露程度仍为 5 cm(无风蚀),风蚀组插穗顶部裸露程度为 25 cm(风蚀 20 cm)。在每个样地中,分别选择生长正常、无明显病虫害的雌雄植株各 10 株作为样株,共计 40 株,各植株之间距离不小于 5 m。取样时从每株植株阳光充足处取 3—4 个末端无分枝的当年生小枝,将小枝的茎和其上所有的叶(叶片、叶柄)分别进行收获,并对各小枝的叶数量、叶片面积等性状进行记录和测量,随后将茎、叶片和叶柄分别置于 60 ℃ 的烘箱中烘干 24 h 至恒重,用分析天平称其干重。

土壤指标测定:土壤含水量的测定采用烘干称重法,土壤 pH 值采用 pH 计测定;土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法,全氮含量的测定采用元素分析法,全磷含量的测定采用钼锑抗比色法,全钾含量的测定采用火焰光度计法^[13]。具体样地概况见表 1。

表 1 各样地土壤环境因子

Table 1 Soil environmental factors of each sampling site

生境 Condition	土壤含水量/% Soil water content	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K
对照 Control	4.52±0.30a	6.51±0.08b	0.68±0.09a	0.04±0.01a	0.04±0.01a	24.57±1.06a
风蚀 Wind erosion	1.21±0.07b	6.84±0.06a	0.56±0.04a	0.04±0.01a	0.05±0.01a	26.36±0.55a

测定值以平均值±标准误表示(下同);同列测定值不同字母表示不同生境间同一指标在 0.05 水平下差异显著

1.3 数据分析

在数据分析前,先计算每个小枝功能特征的算术平均值。采用 SPSS 18.0 软件中单因素方差分析(one-way ANOVA)的 Duncan 多重比较检验(平均值±标准误),比较不同生境下雌雄植株各性状数据的差异。

1.3.1 权衡值计算

为定量地表示成对性状的权衡,采用 Bradford & D' Amato 建立的一套计算权衡值的方法^[14]进行计算。首先对性状观测值标准化,以避免单位的不同。对某一性状 A,其标准化值 A_{std} 的计算方法如下:

$$A_{std} = \frac{A_{OBS} - A_{min}}{A_{max} - A_{min}}$$

式中, A_{OBS} 、 A_{max} 、 A_{min} 分别为性状 A 的观测值、最大值、最小值。单个植株的权衡值可用成对性状标准值的均方根误差(Root mean square error, RMSE)表示,而 RMSE 在二维坐标轴中,可看做成对性状标准值的坐标到对角线(1:1)的距离^[14—15]。权衡值的计算采用 R 4.3.3 软件完成。

1.3.2 异速生长分析

对小枝任意两个功能性状间的权衡关系进行研究前,先对每个小枝功能特征的算术平均值进行对数转换(以 10 为底),使之符合正态分布,并采用 $y = bx^a$ 方程来描述,线性转换为 $\log(y) = \log(b) + a\log(x)$,其中 x 和 y 为所研究的两个性状变量, b 为性状关系的截距, a 为相关性的斜率,即异速生长参数或相对生长指数,当 $a=1$ 时为等速生长,当 a 大于或小于 1 时为异速生长^[16]。采用标准化主轴估计(Standardized major axis estimation, SMA)方法^[17]进行异速生长方程的参数估计,每一个回归斜率的置信区间根据 Pitman^[18]方法计算,并采用 Warton 和 Weber 的方法检验回归斜率的异质性^[19],若斜率存在异质性则进行斜率间的多重比较;

若斜率间无显著差异,则给出共同斜率,并进一步分析指标间在共同斜率下是否存在截距的显著差异^[20]。斜率与截距的计算与比较均采用(S)MATR Version 2.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 黄柳雌雄植株小枝功能性状特征比较

如表 2 所示,与对照相比,风蚀显著降低了雌雄植株的单叶柄干重、雄株的单叶片面积以及雌株的茎干重,增加了雄株的总叶片干重。在对照条件下,雌雄植株在总叶柄干重和茎干重上差异显著,表现为雌株的总叶柄干重和茎干重显著高于雄株,而在风蚀条件下无显著的性别差异。

表 2 不同生境下黄柳雌雄植株小枝功能性状特征

Table 2 The functional traits of male and female *S. gordejvii* twigs under different conditions

生境 Condition	性别 Sex	总叶片面积 Total lamina area/mm ²	单叶片面积 Individual lamina area/mm ²	总叶片干重 Total lamina mass/mg	单叶片干重 Individual lamina mass/mg	总叶柄干重 Total petiole mass/mg	单叶柄干重 Individual petiole mass/mg	茎干重 Stem mass/mg
对照	雌株	1894.42±126.98a	123.25±6.07a	205.17±10.34ab	13.48±0.56a	8.14±0.48a	0.53±0.03a	115.62±8.82a
Control	雄株	1623.22±127.92a	129.86±6.44a	161.75±13.51b	13.00±0.70a	5.81±0.65b	0.46±0.04ab	91.67±10.03b
风蚀	雌株	1968.20±138.56a	111.42±6.22ab	240.93±19.63a	13.50±0.91a	6.90±0.54ab	0.39±0.03bc	71.64±5.78b
Wind erosion	雄株	1697.38±135.05a	98.78±5.97b	228.51±16.75a	13.14±0.57a	5.52±0.50b	0.32±0.02c	71.65±7.70b

同列测定值不同字母表示不同处理间同一性状在 0.05 水平下差异显著

2.2 黄柳雌雄植株小枝性状间的权衡特征

如图 1 所示,黄柳茎干重-总叶干重之间的权衡在不同生境下偏好不同性状,对照环境下雌雄植株的性状均倾向总叶干重,且雌株权衡值为雄株的 4.3 倍;而风蚀环境下则倾向于茎干重,且雌株权衡值为雄株的

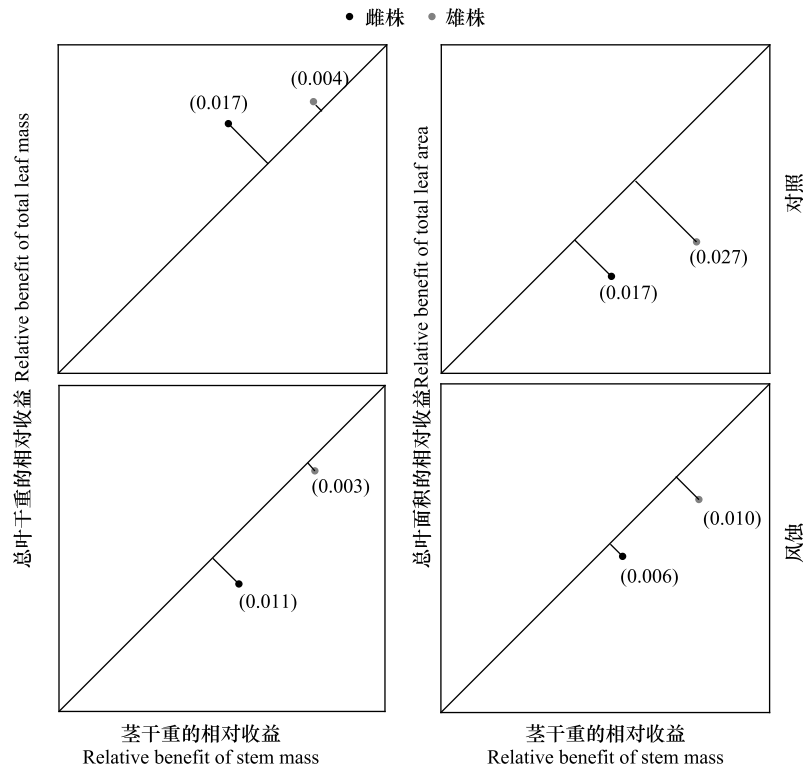


图 1 不同生境下黄柳雌雄植株小枝成对性状间的权衡

Fig.1 Trade-offs of the paired traits of male and female *S. gordejvii* under different conditions

图中括号内数值为权衡值

3.7 倍。不同生境下,雌雄植株茎干重-总叶面积之间的权衡具有趋同性(即偏好同一性状),均倾向于茎干重,且各生境下雌株和雄株的权衡值差异不大。

2.3 黄柳雌雄植株叶功能性状间关系

2.3.1 叶片面积与叶片干重的关系

由表 3 可知,不同生境下黄柳雌雄植株总叶片面积与总叶片干重、单叶片面积与单叶片干重均呈显著正相关关系($P<0.05$),且存在共同斜率,分别为 0.981(95%置信区间=0.854—1.129)、0.991(95%置信区间=0.833—1.183),均与理论值 1 无显著差异,即叶片面积与叶片干重的生长速率相等。在共同斜率下,风蚀环境下雄株总叶片面积与总叶片干重、单叶片面积与单叶片干重关系的 y 轴截距均显著小于对照环境下的截距,而雌株与对照无显著差异。表明在给定叶片干重下,与对照相比,风蚀环境显著降低了雄株的叶片面积,对雌株影响不显著。

表 3 不同生境下黄柳雌雄植株叶功能性状间的 SMA 分析

Table 3 SMA regression parameters for the relationships between leaf functional traits of male and female *S. gordejvii* under different conditions

$y-x$	生境 Condition	性别 Sex	R^2	斜率(95%置信区间) Slope(95% confidence interval)	异速关系 Allometric relationship	共同斜率 (95%置信区间) Common slope (95% confidence interval)	共同斜率下的截距 Intercept at common slope
总叶片面积-总叶片干重 Total lamina area- Total lamina mass	对照	雌株	0.559 **	1.167(0.879—1.547) a	I	0.981(0.854—1.129) ns	1.002AB
		雄株	0.684 **	0.997(0.751—1.324) a	I		1.044A
	风蚀	雌株	0.695 **	0.824(0.654—1.037) a	I	0.991(0.833—1.183) ns	0.968BC
		雄株	0.506 **	1.055(0.777—1.433) a	I		0.912C
单叶片面积-单叶片干重 Individual lamina area- Individual lamina mass	对照	雌株	0.399 **	1.055(0.760—1.465) a	I		0.969AB
		雄株	0.402 **	0.841(0.572—1.237) a	I		1.013A
	风蚀	雌株	0.484 **	0.851(0.631—1.146) a	I	0.766(0.635—0.929) **	0.934BC
		雄株	0.218 *	1.400(0.956—2.205) a	I		0.878C
总叶片面积-总叶柄干重 Total lamina area- Total petiole mass	对照	雌株	0.207 *	1.008(0.693—1.467) a	I		2.538B
		雄株	0.618 **	0.749(0.549—1.022) a	I		2.606AB
	风蚀	雌株	0.617 **	0.835(0.645—1.080) a	I	—	2.620A
		雄株	0.363 **	0.697(0.493—0.985) a	A		2.641A
单叶片面积-单叶柄干重 Individual lamina area- Individual petiole mass	对照	雌株	0.052 ns	0.923(0.613—1.388) a	I		2.298A
		雄株	0.327 *	0.619(0.412—0.932) a	A		2.382A
	风蚀	雌株	0.389 **	0.836(0.605—1.156) a	I	—	2.364A
		雄株	0.140 ns	0.695(0.466—1.035) a	I		2.384A
总叶片干重-总叶柄干重 Total lamina mass- Total petiole mass	对照	雌株	0.521 **	0.864(0.644—1.160) ab	I		—
		雄株	0.827 **	0.751(0.608—0.928) b	A		—
	风蚀	雌株	0.876 **	1.013(0.874—1.174) a	I	—	—
		雄株	0.590 **	0.660(0.499—0.873) b	A		—
单叶片干重-单叶柄干重 Individual lamina mass- Individual petiole mass	对照	雌株	0.399 **	0.874(0.629—1.214) a	I		—
		雄株	0.652 **	0.740(0.547—0.992) ab	A		—
	风蚀	雌株	0.789 **	0.983(0.811—1.191) a	I	—	—
		雄株	0.392 **	0.496(0.354—0.996) b	A		—

R^2 表示回归系数;不同小写字母表示异速生长指数(斜率)差异显著($P<0.05$);A表示斜率与理论值 1 差异显著(异速生长关系),I表示斜率与理论值 1 差异不显著(等速生长关系);共同斜率(95%置信区间)列表表示斜率与理论值 1 的差异显著性;不同大写字母表示共同斜率下的截距差异显著($P<0.05$);ns,无显著相关或差异;*, $P<0.05$;**, $P<0.01$

2.3.2 叶片面积与叶柄干重的关系

由表 3 可知,不同生境下黄柳雌雄植株总叶片面积与总叶柄干重呈显著正相关关系($P<0.05$),其共同斜率为 0.807(95%置信区间=0.691—0.944),极显著小于理论值 1($P<0.01$),即总叶片面积生长速率小于总叶

柄干重的累积速率。在共同斜率下,风蚀环境下雌株总叶片面积与总叶柄干重关系的 y 轴截距显著大于对照环境下的截距,而雄株与对照无显著差异。表明在给定总叶柄干重下,与对照相比,风蚀环境中雌株具有更高的总叶片面积,而雄株无显著差异。雌雄植株单叶片面积与单叶柄干重关系的共同斜率为 0.766(95%置信区间=0.635—0.929),极显著小于理论值 1($P<0.01$),即单叶片面积的生长速率小于单叶柄干重的累积速率。在共同斜率下,雌雄植株单叶片面积与单叶柄干重关系的 y 轴截距在风蚀和对照环境下均无显著差异。

2.3.3 叶片干重与叶柄干重的关系

由表 3 可知,不同生境下黄柳雌雄植株总叶片干重与总叶柄干重、单叶片干重与单叶柄干重呈极显著正相关关系($P<0.01$),且均不存在共同斜率。在对照和风蚀环境下,雌株总叶片干重与总叶柄干重、单叶片干重与单叶柄干重关系的斜率依次为 0.864(95%置信区间=0.644—1.160)、1.013(95%置信区间=0.874—1.174)、0.874(95%置信区间=0.629—1.214)、0.983(95%置信区间=0.811—1.191),呈现等速生长关系,表明雌株叶片干重与叶柄干重的累积速率相同;雄株上述关系的斜率依次为 0.751(95%置信区间=0.608—0.928)、0.660(95%置信区间=0.499—0.873)、0.740(95%置信区间=0.547—0.992)、0.496(95%置信区间=0.354—0.996),呈现小于理论值 1 的异速生长关系,表明雄株叶片干重的累积速率小于叶柄干重的累积速率。此外,在风蚀环境中,雌株叶片干重与叶柄干重关系的斜率显著高于雄株,表明在叶柄干重增加相同的情况下,雌株的叶片干重的累积速率比雄株快,而在对照环境中雌雄差异不显著。

3 讨论与结论

植物性状可根据环境的异质性而改变,性状间存在一定关联性,在长期适应中形成了相互协调、共同进化的关系^[4]。枝和叶是植物地上部分两个重要的营养器官,两者之间存在着密切的关系已在许多木本植物中被证实^[21—22]。本研究发现,黄柳雌雄植株茎干重-总叶干重之间的权衡在对照环境下倾向于总叶干重,而风蚀环境下则倾向于茎干重,这是由于受风蚀环境的影响,植株对支撑结构的要求会更加严苛,因此需要更多的生物量投资以应对静态拉力和风对叶片施加的阻力,以此提供机械支持^[23];另外,雌株的权衡值均高于雄株可能与其不同的生殖功能有关,雌株更多地偏向于增强叶的光合生产力以及茎的支撑力以保障花序(果序)的营养输送和着生空间。

叶是植物进行光合作用的主要器官和固碳的主要部位,由于较强的可塑性和环境敏感性,容易受到外界环境的影响,从而使叶各表型性状之间协同变化关系明显^[24—25]。在本研究中,黄柳叶片面积与叶片干重的关系为等速生长关系,这虽与“收益递减”假说叶面积的扩展速率要小于干物质的积累速率^[26]有所不符,但有研究表明生境特征、系统发育历史和个体发育状况等因素都会导致叶片面积和干重间权度关系的多变^[27],不同的生境特征以及雌雄个体的发育可能是造成叶片面积和叶片干重等速生长的主要因素。叶片面积与叶柄干重关系为显著小于 1 的异速生长,由于叶柄除了具有给叶片传导水分和营养物质等功能外,还具有机械支撑功能,需要抵抗风雨等因素带来的动态拉力,故叶柄干重的累积速率通常会快于叶片面积的生长速率^[28—29]。雌雄植株比较来看,在给定叶片干重下,风蚀显著降低了雄株的叶片面积,而对雌株无显著影响;在给定总叶柄干重下,与对照相比,风蚀环境中雌株具有更高的总叶片面积,而雄株无显著差异,说明风蚀对雄株叶片面积生长的抑制程度大于雌株,而雌株更倾向于增大光合面积以应对胁迫环境带来的损伤^[12,30]。另外,叶片干重与叶柄干重的生长关系无论是在对照还是风蚀环境下,雌株呈现等速生长关系,雄株呈现小于理论值 1 的异速生长关系,说明雌株与雄株相比更倾向于加快叶片干重的累积,特别是在风蚀环境下雌雄的异速生长指数差异更为显著,推测这可能与雌雄植株的生殖功能差异有关,叶片干重直接影响植物对光的截取和对碳的获取能力^[31],雌株较大的叶片干重可以提高光合能力和加快同化物质积累的速率,从而满足孕育果实和种子的资源需求^[32]。

综上所述,风蚀显著影响黄柳雌雄植株小枝功能性状间的权衡关系,雌雄植株对风蚀环境的响应具有性别差异。在叶水平上,雌株比雄株更倾向于将资源投资在光合器官生长上,且风蚀对雄株光合器官生长的抑

制作用更显著。研究表明,环境胁迫下柳属植物雌株比雄株具有更强的抗逆性,其原因可能是由于雌株并没有因较高的生殖耗费而缩减对营养生长的投入,反而还增强了其营养器官的生长和光合作用以提高自身抗性^[12,33],本研究从雌雄植株小枝功能性状间权衡关系的差异上验证了这一观点,即雌株表现出了比雄株更高的生长速率。此外,推测雌株较强的营养生长可能是一种补偿机制以弥补自身较高的生殖耗费,未来还需进一步深入研究雌雄生殖耗费与补偿机制的内容。以上研究结果从小枝功能性状权衡关系的角度揭示了黄柳雌雄植株间具有不同的生活史对策,这不仅为雌雄异株植物对环境响应差异的原因探寻提供了线索,还为黄柳在浑善达克沙地植被恢复治理中的性别选择提供了理论依据,这对其种群建成和生态学效应的最大化发挥具有重要的实践意义。

参考文献 (References):

- [1] 宋光满, 韩涛涛, 洪岚, 张玲玲, 李晓波, 任海. 演替过程中植物功能性状研究进展. 生态科学, 2018, 37(2): 207-213.
- [2] Sun S C, Jin D M, Shi P L. The leaf size-twig size spectrum of temperate woody species along an altitudinal gradient: an invariant allometric scaling relationship. *Annals of Botany*, 2006, 97(1): 97-107.
- [3] LaBarbera M. Analyzing body size as a factor in ecology and evolution. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 20: 97-117.
- [4] 张宁, 王金牛, 石凝, 王丽华, 朱牛, 田炳辉, 张林, 盖艾鸿. 岷江源区两种优势针叶树当年生小枝性状与生物量分配随海拔的分异规律. 生态学报, 2023, 43(23): 9814-9826.
- [5] Renner S S. The relative and absolute frequencies of angiosperm sexual systems: dioecy, monoecy, gynodioecy, and an updated online database. *American Journal of Botany*, 2014, 101(10): 1588-1596.
- [6] Barrett S C H, Hough J. Sexual dimorphism in flowering plants. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(1): 67-82.
- [7] 翟军团, 李秀, 韩晓莉, 张山河, 陈家力, 李志军. 胡杨茎叶化学计量和异速生长关系特征随发育阶段变化的性别差异. 西北植物学报, 2022, 42(9): 1570-1582.
- [8] 马少薇. 浑善达克沙地黄柳雌雄性格局及性别差异研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [9] Yang Y X, He X H, Xu X, Yang D M. Scaling relationships among twig components are affected by sex in the dioecious tree *Populus cathayana*. *Trees*, 2015, 29(3): 737-746.
- [10] 张芯毓. 内蒙古温带灌木的植物功能性状研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [11] 刘冠志, 刘果厚, 兰庆, 李红颖, 曹瑞, 王健, 刘利红. 黄柳与小柳导管分子形态特征及其生态适应性比较研究. 西北植物学报, 2016, 36(2): 316-322.
- [12] Ma S W, Liu G H, Wang L, Liu G Z, Xu X. *Salix gordejewii* females exhibit more resistance against wind erosion than males under aeolian environment. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1053741.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-108.
- [14] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [15] 吴江航, 李洋, 王迎新, 刘向, 孙建. 高寒草地植物群落地上-地下净初级生产力权衡. 生态学报, 2024, 44(2): 793-804.
- [16] Harvey P H, Pagel M D. *The Comparative Method in Evolutionary Biology*. Oxford: Oxford University Press, 1999: 169-172.
- [17] Warton D I, Wright I J, Falster D S, Westoby M. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, 81(2): 259-291.
- [18] Pitman E J G. A note on normal correlation. *Biometrika*, 1939, 31(1/2): 9-12.
- [19] Warton D I, Weber N C. Common slope tests for bivariate errors-in-variables models. *Biometrical Journal*, 2002, 44(2): 161-174.
- [20] 马莉, 符德欢, 苏钦, 王丽, 蒲星宇, 李双良. 不同海拔滇重楼生物量分配及异速生长分析. 时珍国医国药, 2023, 34(3): 697-701.
- [21] Chen H, Niklas K J, Yang D M, Sun S C. The effect of twig architecture and seed number on seed size variation in subtropical woody species. *The New Phytologist*, 2009, 183(4): 1212-1221.
- [22] 商侃侃, 张希金, 宋坤. 上海辰山植物园不同生活型木本植物枝叶大小关系的比较. 植物研究, 2020, 40(5): 641-647.
- [23] Niklas K J. A mechanical perspective on foliage leaf form and function. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 19-31.
- [24] 祁鲁玉, 陈浩楠, 库丽洪·赛热别力, 籍天宇, 孟高德, 秦慧颖, 王宁, 宋逸欣, 刘春雨, 杜宁, 郭卫华. 基于植物功能性状的暖温带 5 种灌木幼苗生长策略. 植物生态学报, 2022, 46(11): 1388-1399.
- [25] 代景忠, 白玉婷, 卫智军, 张楚, 闫瑞瑞. 切根对羊草营养生长期植物功能性状的影响. 植物生态学报, 2021, 45(12): 1292-1302.
- [26] Niklas K J, Cobb E D, Niinemets U, Reich P B, Sellin A, Shipley B, Wright I J. "Diminishing returns" in the scaling of functional leaf traits across and within species groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(21): 8891-8896.
- [27] Sun J, Fan R R, Niklas K J, Zhong Q L, Yang F C, Li M, Chen X P, Sun M K, Cheng D L. "Diminishing returns" in the scaling of leaf area vs. dry mass in Wuyi Mountain bamboos, Southeast China. *American Journal of Botany*, 2017, 104(7): 993-998.
- [28] 李露, 金光泽, 刘志理. 阔叶红松林 3 种阔叶树种柄叶性状变异与相关性. 植物生态学报, 2022, 46(6): 687-699.
- [29] Li G Y, Yang D M, Sun S C. Allometric relationships between lamina area, lamina mass and petiole mass of 93 temperate woody species vary with leaf habit, leaf form and altitude. *Functional Ecology*, 2008, 22(4): 557-564.
- [30] 马少薇, 刘果厚, 王蕾, 兰庆, 胥晓. 干旱胁迫对黄柳雌雄扦插苗生长和生理特性的影响. 西北植物学报, 2019, 39(7): 1250-1258.
- [31] 杨克彤. 青藏高原东缘木本植物叶性状间关系随海拔升高的变化[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [32] Kavanagh P H, Lehnbach C A, Shea M J, Burns K C. Allometry of sexual size dimorphism in dioecious plants: do plants obey Rensch's rule? *The American Naturalist*, 2011, 178(5): 596-601.
- [33] Liao J, Song H F, Tang D T, Zhang S. Sexually differential tolerance to water deficiency of *Salix paraplesia*-A female-biased alpine willow. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(15): 8450-8464.