

不同生境对雅安市老板山水麻枝叶构件特征的影响

姚小兰¹, 张柳桦¹, 王媚臻¹, 周楷玲¹, 魏丽萍¹, 郝建锋^{1,2}, 齐锦秋^{1,3}

(1. 四川农业大学 林学院, 四川 成都 611130; 2. 四川农业大学 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 四川 成都 611130; 3. 四川农业大学 木材工业与家具工程重点实验室, 四川 成都 611130)

摘要: 为探究植物(种群)生存及其对环境的适应对策和进化机制, 以四川省雅安市老板山林内、林缘、沟边丛生以及林内单株水麻 *Debregeasia orientalis* 为研究对象, 对其分枝数、分枝长度、分枝角度、枝径比、逐级分枝率以及叶片数、叶面积等构件特征进行调查分析。结果表明: ①不同生境下, 水麻分枝数以一级枝为主, 沟边丛生水麻分枝长度优于其他生境, 但无三四级枝生长, 其分枝角度整体表现为收敛型, 空间拓展能力较其他生境强; ②同一生境下, 二三级枝枝径比($R_{BD3:2}$)最大, 三四级枝逐级分枝率($S_{BR3:4}$) < 一二级枝逐级分枝率($S_{BR1:2}$) < 二三级枝逐级分枝率($S_{BR2:3}$), 二三级枝之间水分、养分运输效率高, 分枝能力最强; ③叶片数与分枝数变化规律一致, 林缘丛生水麻叶片数最多, 其叶面积与沟边丛生都大于其他生境, 同一生境中, 叶面积二级枝 > 一级枝 > 三级枝; ④林缘生境更适合水麻聚集生长, 沟边丛生水麻护坡、固土效果明显。表明不同生境水麻对光照、空间等环境条件响应不同, 可采取措施以最大限度获取生境资源, 更好地发挥水土保持功能。图 3 表 2 参 27

关键词: 植物学; 水麻; 不同生境; 枝叶构件; 变化规律

中图分类号: S718.3; Q945

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)04-0649-08

Effect of different habitats on the branch and leaf module characteristics of *Debregeasia orientalis* in Laoban Mountain, Ya'an, Sichuan

YAO Xiaolan¹, ZHANG Lihua¹, WANG Meizhen¹, ZHOU Kailing¹, WEI Liping¹, HAO Jianfeng^{1,2}, QI Jinqiu^{1,3}

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China; 2. Key Laboratory for Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China; 3. Key Laboratory for Wood Industry and Furniture Engineering, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: By analyzing the branch and leaf module characteristics, including branch number, branch length, branch angle, the ratio of branch diameter, branch ratio, leaf number and area of *Debregeasia orientalis* from the forest plant, forest edge cluster, river bank cluster and forest cluster in Laoban Mountain, Ya'an, the research tried to understand mechanism how the plant (population) survived and adapted to environment. The results showed that: (1) Under different habitats, the first class branch of *D. orientalis* had the largest number of branches. The branch lengths of *D. orientalis* in river bank cluster were higher than those in other habitats and the branch angles were small, forming a convergence and having a great space expansion capacity; but it had no third and fourth class branch. (2) The $R_{BD3:2}$ was bigger and the branch ratio showed $S_{BR3:4} < S_{BR1:2} < S_{BR2:3}$ under the same habitat. They indicated that the transportation of moisture and nutrient as well as the branch capacity between the second and third class branches were higher. (3) Leaf numbers changed with the branch numbers. The *D. orientalis* in forest edge had a lot of leaves, and their areas were larger than those in other

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370628); 四川省教育厅一般项目(自然科学)(15ZB0020); 四川农业大学“双支”计划资助项目(03571838)

作者简介: 姚小兰, 从事森林生态学研究。E-mail: yaoxiaolan44@sina.com。通信作者: 郝建锋, 副教授, 博士, 从事森林生态学研究。E-mail: haojf2005@aliyun.com

habitats as well as river bank. The leaf areas showed the second class branch > the first class branch > the third class branch. (4) Forest edge cluster was more suitable for *Debregeasia orientalis* having an aggregation growth and the *D. orientalis* in river bank had an obvious effect on slope protection and soil fixation. It indicates that *D. orientalis* in different habitats has different response to environmental conditions including light as well as space, and we can take measures to obtain the maximum habitat resources, play better functions of soil and water conservation. [Ch, 3 fig. 2 tab. 27 ref.]

Key words: botany; *Debregeasia orientalis*; different habitats; the branch and leaf module; rule of change

高等植物是由根、枝、叶、花、果等基本构件单位不断重复增加而形成的构件生物^[1-2], 其外部形态具有高度可塑性, 这种可塑性与植物对环境的适应性密切联系, 是植物适应异质环境的重要手段^[3-6]。通过观察植物构件特征变化, 可以了解植物个体构件结构的复杂程度和其对空间的占据及利用潜力。枝是植物重要的构件单位, 为植物生长输导水分和养分, 其伸长和分枝有利于叶和花扩大生存空间, 并达到生长的最佳位置, 同时, 枝长、枝径粗、分枝角度、分枝数等的不同组合, 将直接影响植株对空间、光等资源的利用和适应策略^[7]。叶是植物进行光合作用的重要器官, 叶片数能直接或间接影响植物枝构件生长, 叶面积大小影响着植物对光能的截获和利用, 影响植物生产力^[8-9]。目前, 关于植物构件特征与环境关系的研究不断增多, 研究对象包括乔木、灌木、草本。如闫宝龙等^[10]对大兴安岭南段白桦 *Betula platyphylla* 种群构件研究, 程伟等^[11]对石山和土山 2 种生境条件下西南桦 *Betula alnoides* 的生殖构件及其空间格局进行研究, 于应文等^[12]分析了主要气候因子(气温、日照和降水)对混播草地中黑麦草 *Lolium perenne*, 白三叶 *Trifolium repens* 和白苞蒿 *Artemisia lactiflora* 等构件生长的影响, 皆是从构件水平研究植物与环境的关系, 揭示植物对环境的适应机制。但当前涉及水麻 *Debregeasia orientalis* 的研究较少, 仅有水麻扦插实验、野生果树资源研究、水麻化学成分及抗菌作用分析等^[13-15], 缺乏对水麻在不同生境的生长发育和适应策略以及水麻在环境中所起功能作用的研究。水麻, 为荨麻科 *Urticaceae* 水麻属 *Debregeasia* 植物, 性喜湿耐阴, 树势健壮, 易繁殖, 丰产性强, 主要分布在中国亚热带中部及北部、秦岭南坡, 对坡面的负荷小, 能防止浅层土壤崩塌, 是水土保持优良树种, 具有重要的生态功能^[16-17], 在解决 20 世纪 50 年代四川农业大学老板山水土流失问题中发挥了重要作用。当前, 水麻已成为雅安市老板山优势植被类型。本研究比较和分析不同生境下水麻枝叶构件特征的变化, 旨在探究环境对水麻生长的影响以及水麻枝叶构件对环境的适应对策和进化机制, 为进一步增强水土保持功能提供依据。

1 研究区概况

老板山(28°30'~30°33'N, 101°13'~101°33'E)位于雅安市雨城区四川农业大学内, 是四川农业大学的人文地标, 山体成东西走向, 东西全长约 1 300 m, 南北最宽约 430 m, 海拔为 592~735 m。该区属亚热带湿润季风气候, 降水集中于夏季, 多夜雨, 年平均气温为 16.2 °C, 1 月平均气温为 6.1 °C, 7 月平均气温为 25.4 °C, 年降水量达 2 000.0 mm, 年平均蒸发量为 838.8 mm, 平均湿度为 79%, 土壤为紫色土, 呈微酸性。研究区内植被为亚热带常绿阔叶林, 覆盖率 95% 以上, 乔木层主要是以慈竹 *Neosinocalamus affinis*, 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, 柳杉 *Cryptomeria fortunei*, 樟树 *Cinnamomum camphora* 等为主要树种, 所研究的灌木层以水麻为主, 伴生植物主要有毛竹 *Phyllostachys edulis*, 灯台树 *Bothrocaryum controversum* 等, 草本层包括鸭跖草 *Commelina communis*, 土牛膝 *Achyranthes aspera* 和蕨类等植物。历史上, 老板山水土流失问题严重, 乔木在坡度较大、土层覆盖率较低的地方难以生长。以水麻为主的灌木在水土保持, 固土护坡方面发挥了重要作用。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

通过实地调查, 根据水麻生长的地理位置以及造成个体构件生存策略转变的自身生长类型的不同, 在雅安市四川农业大学老板山实践基地选取林内单株、林缘丛生、沟边丛生、林内丛生等 4 个不同生境类型样地(表 1), 每个生境选取生长良好且具有代表性的水麻各 12 株进行定株调查, 测定其地径(距地

表 1 水麻生境及生长情况

Table 1 Condition of habitats and growth of *Debregeasia orientalis*

生境类型	海拔/m	生境郁闭度	土壤类型	平均高度/cm	平均地径/cm	伴生植物
林内单株	663	0.7	紫色土	295	3.09	水杉, 柳杉, 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>
林缘丛生	625	0.4	紫色土	346	3.78	柳杉, 灯台树
沟边丛生	627	0.1	紫色土	386	2.46	鸭跖草, 棠叶悬钩子 <i>Rubus malifolius</i>
林内丛生	658	0.7	紫色土	306	3.47	水杉, 柳杉, 朴树 <i>Celtis sinensis</i>

面3.00 cm 处直径)、株高、冠幅。枝级划分：运用 Strahler 法^[18]确定枝级。枝叶构件指标的测定：测量其枝条数、枝条长度、枝径粗、分枝角度；统计各级枝的叶片数，同时在各级枝上随机选取 30 片大小不等的叶片，利用 Photoshop CS5 软件测定叶面积。

2.2 数据处理

依据吕志伟等^[19]对植物枝构件特征的运算方法计算枝径比，采用 WHITNEY^[20]提出并经 STEINGRAEBER 等^[21]修改的方法计算逐级分枝率。枝径比是指植物枝与枝之间枝条直径之比；逐级分枝率是植物某一级枝与其下一个高级枝的枝数比。

$$R_{BD}=D_{i+1}/D_i;$$
$$S_{BR}=N_i/N_{i+1}。$$

其中： R_{BD} 为枝径比； D_i 为第 i 级枝直径； D_{i+1} 为第 $i+1$ 级枝直径； S_{BR} 为逐级分枝率； N_{i+1} 为第 $i+1$ 级枝数目； N_i 为第 i 级枝数目。运用 Excel 2010 和 DPS 15.10 进行数据统计和处理，用 Origin 9.0 制图。

3 结果与分析

3.1 不同生境水麻枝构件特征

3.1.1 分枝数 分枝数与枝条发展潜力密切相关，体现着植物对空间资源的获取和利用潜力。由表 2 可知：林缘丛生的水麻一级枝、二级枝、三级枝、四级枝分枝数均大于其他生境，生长潜力大。沟边丛生水麻无三级枝、四级枝，一级枝、二级枝分枝数与其他生境水麻同级分枝数存在显著差异($P<0.05$)，其他生境水麻各级枝数均表现为一级枝>二级枝>三级枝>四级枝，且一级枝到二级枝分枝数变幅较大，表明水麻以一级枝为主。

3.1.2 分枝长度 分枝长度是测定枝质量的重要指标，影响着叶和芽的空间分布，能间接表明植物枝系吸收利用光能和二氧化碳的能力，反映植物生长活力的强弱和对环境的适应对策。表 2 表明：不同生境水麻四级枝分枝长度差异显著($P<0.05$)，其他枝级差异不明显。一级枝分枝长度变化为沟边丛生>林内单株>林内丛生>林缘丛生，二级枝为沟边丛生>林内丛生>林内单株>林缘丛生，三四级枝分枝角

表 2 不同生境水麻枝构件特征

Table 2 Branching module of *Debregeasia orientalis* in different habitats

枝构件	生境类型	一级枝	二级枝	三级枝	四级枝
分枝数	林内单株	134.08 ± 13.71 a	26.08 ± 2.77 a	4.08 ± 0.76 ab	2.00 ± 1.00 a
	林缘丛生	148.08 ± 20.32 a	29.75 ± 4.25 a	6.55 ± 2.02 a	2.00 ± 1.50 a
	沟边丛生	47.75 ± 6.15 b	6.58 ± 0.88 b		
	林内丛生	142.58 ± 29.72 a	24.42 ± 2.64 a	3.64 ± 0.80 ab	1.50 ± 0.50 a
分枝长度/cm	林内单株	65.85 ± 11.53 a	50.91 ± 3.99 a	38.87 ± 2.21 b	17.50 ± 0.87 c
	林缘丛生	52.03 ± 7.49 a	50.89 ± 3.07 a	44.14 ± 1.50 ab	56.00 ± 5.49 b
	沟边丛生	65.94 ± 13.72 a	58.43 ± 3.10 a		
	林内丛生	61.40 ± 8.78 a	57.12 ± 4.90 a	50.67 ± 2.40 a	86.00 ± 4.14 a
分枝角度/(°)	林内单株	59.59 ± 0.95 a	59.05 ± 1.75 a	62.03 ± 1.47 a	45.00 ± 1.12 a
	林缘丛生	56.20 ± 1.14 ab	56.43 ± 2.04 a	54.13 ± 4.03 a	58.33 ± 1.20 a
	沟边丛生	54.73 ± 1.54 b	51.46 ± 1.83 a		
	林内丛生	56.97 ± 1.07 ab	54.60 ± 2.23 a	59.74 ± 3.08 a	52.67 ± 1.20 a

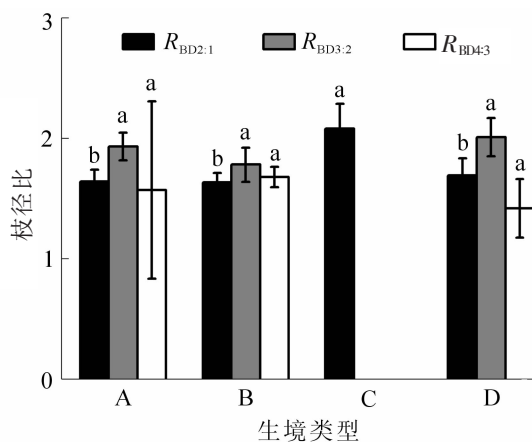
说明：数据为平均值±标准误。不同小写字母表示不同生境同一枝级差异显著($P<0.05$)

度变化均为林内丛生>林缘丛生>林内单株。沟边丛生的水麻无三四级分枝，一二级枝有充足时间进行生长，分枝长度为 65.94 和 58.43 cm，优于其他生境同级枝条；在同一生境中，林内单株水麻分枝长度随着枝级的增加逐渐减小，林缘和林内丛生水麻四级枝较上级枝长，这可能与萌生枝所处位置以及获取资源能力有关。

3.1.3 分枝角度 分枝角度指植株相邻枝级间的夹角，是枝条向空间拓展的形式之一，影响枝条的空间分布格局，反映植株对光照这一生境因子的利用。树木枝条的夹角主要受遗传基因控制，但不同生境中空间、光资源的不同以及各级枝为争夺资源等有利环境所产生竞争干扰程度不同，分枝角度也会发生相应的变化。由表 2 可知：在各生境中所调查的水麻分枝角度整体变化范围为 45.00°~63.00°，为中等分枝角度类型，变化幅度较小。不同生境下同一枝级水麻分枝角度差异不显著($P>0.05$)。一级分枝角度变化趋势为林内单株>林内丛生>林缘丛生>沟边丛生，二级枝分枝角度为林内单株>林缘丛生>林内丛生>沟边丛生，三级枝分枝角度呈现出林内单株>林内丛生>林缘丛生的变化，四级枝则为林缘丛生>林内丛生>林内单株；一般而言，分枝角度越大，表明植物的空间扩展和利用能力越强。同一生境内，林内单株水麻三级枝分枝角度为 62.03°，林缘丛生水麻四级枝条分枝角度为 58.33°，沟边丛生水麻一级枝分枝角度为 54.73°，林内丛生水麻三级枝分枝角度为 59.74°。沟边丛生水麻各级枝条分枝角度相对于其他生境较小，分枝角度表现为收敛型。

3.1.4 枝径比 枝径比能够反映植株不同级别枝条之间的承载能力以及相邻枝条水分和养分的运输情况。一般而言，枝径比与相邻枝间运输效率(水分、养分)呈正相关，枝径比越大，水分、养分运输效率越高，枝条生长发育得越好。由图 1 可知：在不同生境中，沟边丛生水麻一二级枝枝径比($R_{BD2:1}$)为 2.08，枝条承载力最强，其他生境 $R_{BD2:1}$ 差异不明显。林内丛生水麻二三级枝枝径比($R_{BD3:2}$)大于林内单株和林缘丛生水麻，林缘丛生水麻三四级枝枝径比($R_{BD4:3}$)最大，这与不同生境中光、热、水资源分布不同，植株所采取的生存策略存在差异有关。在同一生境中，枝径比均为 $R_{BD3:2}>R_{BD2:1}>R_{BD4:3}$ ，二三级枝之间水分、养分运输效率高，生长优势好。

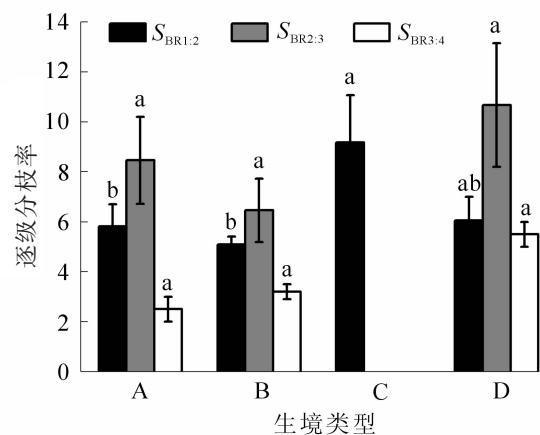
3.1.5 逐级分枝率 逐级分枝率是构型研究的重要指标，能反映枝条分枝能力以及各枝级间枝条数量配置状况和资源的分配状况。植株的逐级分枝率越小，枝条的分枝数就越多，分枝能力也越强，占据空间、获取资源的能力就越大。由图 2 可知：沟边丛生水麻一二级枝逐级分枝率($S_{BR1:2}$)为 9.17，且与其他生境差异显著($P<0.05$)，不同生境水麻二三级枝逐级分枝率($S_{BR2:3}$)表现为林缘丛生<林内单株<林内丛生，三四级枝逐级分枝率($S_{BR3:4}$)则为林内单株<林缘丛生<林内丛生。表明在不同生境中，水麻各级枝条对空间异质性的响应不同；在同一生境中，各级枝条逐级分枝率变化趋势一致， $S_{BR3:4}<S_{BR1:2}<S_{BR2:3}$ ，



A. 林内单株; B. 林缘丛生; C. 沟边丛生; D. 林内丛生。不同小写字母表示不同生境同一级别枝径比差异显著($P<0.05$)。 $R_{BD2:1}$ 为一二级枝枝径比; $R_{BD3:2}$ 为二三级枝枝径比; $R_{BD4:3}$ 为三四级枝枝径比

图 1 不同生境水麻枝径比

Figure 1 Ratio of branching diameter of *D. orientalis* in different habitats



A. 林内单株; B. 林缘丛生; C. 沟边丛生; D. 林内丛生。不同小写字母表示不同生境同一级别逐级分枝率差异显著($P<0.05$)。 $S_{BR1:2}$ 为一二级枝逐级分枝率; $S_{BR2:3}$ 为二三级枝逐级分枝率; $S_{BR3:4}$ 为三四级枝逐级分枝率

图 2 不同生境水麻逐级分枝率

Figure 2 Branching ratios of *D. orientalis* in different habitats

表明水麻在二三级枝间分枝能力较强。

3.2 不同生境水麻叶构件特征

植物能进行光合作用主要靠叶。作为光合器官，叶片数量、叶面积大小以及其配置等都会对叶片接受光量、光强等产生影响，从而决定植物光能利用效率，影响植物生长。叶在进行光合作用时，叶片数能够直接或间接影响植物的植株高度、基径、枝和其上叶质量。如果叶的数量和面积处于劣势，那么必然导致植物在种内、种间竞争时生长发育受阻。

从叶片数来看(图 3)，不同生境各级枝叶片数差异不显著($P>0.05$)。在不同生境中，一级枝叶片数，林缘丛生>林内单株>林内丛生>沟边丛生，二级枝叶片数，林内丛生>林内单株>沟边丛生>林缘丛生，三级枝上叶片数变化较小；在同一生境中，各级枝叶片数变化趋势一致，为一级枝>二级枝>三级枝。

叶面积的大小与植株利用光能的多少呈正比，但也有人认为，在光照不充足时，叶片会通过增大叶面积来获取更多的光环境资源，进行光合作用，促进植物光合产物的积累。不同生境下，一级枝上叶面积呈现出沟边丛生>林缘丛生>林内丛生>林内单株，二级枝叶面积林缘丛生>林内单株>林内丛生>沟边丛生(图 3)；在同一生境下，不同枝级水麻总体上表现出二级枝叶面积较一级枝和三级枝叶面积大，这既是构件种群内部竞争引起的结果，亦是植物在不同生育时期，不断调整各构件个体间生长和营养物质的分配，以满足其他构件个体生长的结果。

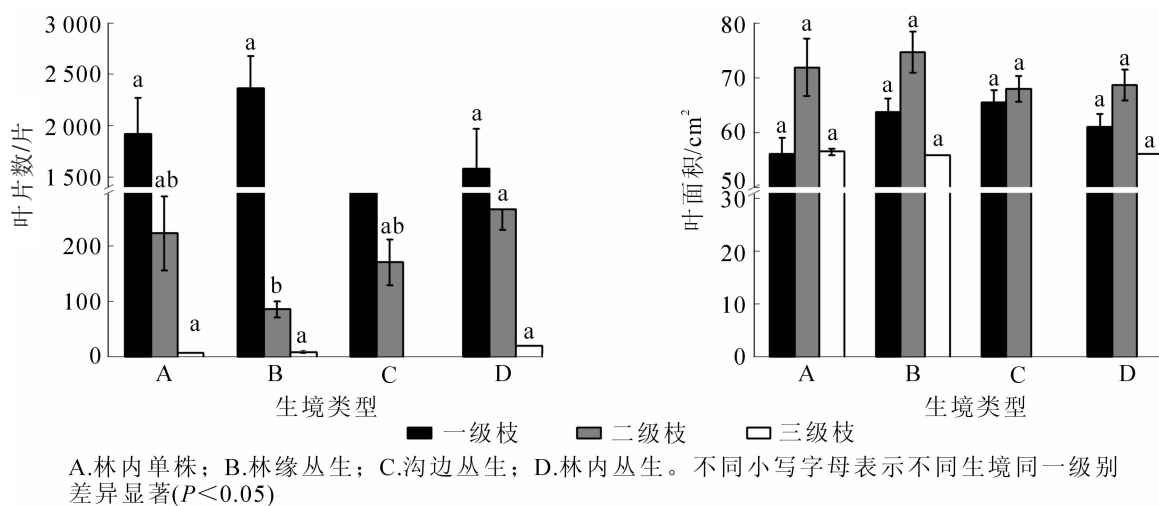


图 3 不同生境水麻叶构件特征

Figure 3 Leaves module characteristics of *Debregeasia orientalis* in different habitats

4 结论与讨论

植物的构件特征是植物在特定环境下的形态反映，与植物内部生理生化性质关系密切，其枝系构件主要由分枝角度、分枝数、分枝长度及分枝率等组成，是连接其他构件(叶、芽)的中介，它决定着植物叶空间分布，影响植物光合作用、水分和养分的运输与吸收，对植物适应环境变化至关重要^[22]。本研究在对老板山水麻枝叶构件调查分析中发现，不同生境以及不同植物生长类型(单生、丛生)都会对水麻枝系构件产生影响。林缘丛生生境土壤肥沃，光热水资源充足，水麻分枝数量大，枝条发育良好，生长旺盛。这与赵友华等^[23]发现适度遮光可以使栲树 *Castanopsis fargesii* 分枝数增多的结论相悖，三四级枝分枝数最少，但其叶、芽密度最大，最有发展潜力^[24]；沟边丛生生境土壤肥力较低，土层较薄，无三四级枝生长，但其一二级枝分枝长度明显超过其他生境，原因可能是水麻作为沟边生境绝对的优势种，竞争资源，获取养分的优势明显且自身养分仅供一二级枝生长，无三四级枝对资源进行竞争；分枝角度受光照、水分及空间资源的影响，在一定的空间内，植物通过改变自身角度将枝伸展到最大利用空间资源的位置来适应环境^[25]。林缘丛生和沟边丛生生境水麻分枝角度较小，主要在于这 2 种生境皆位于林地边缘，空间范围广，光照资源充足，水麻只有通过减小分枝角度，来最大限度地获取光照，促进植株生

长; 林内单株和丛生的水麻, 因水杉、柳杉等乔木对光照的截获, 林内光资源匮乏, 水麻必须通过扩大分枝角度, 占据空间资源, 促进植株生长, 这与贾程等^[8]在构件研究中得出的结论一致。同一生境内, 水麻二三级枝枝径比($R_{BR3,2}$)最大, 各级别逐级分枝率 $S_{BR3,4} < S_{BR1,2} < S_{BR2,3}$, 二三级枝水分、养分运输效率高, 分枝能力强, 生长优势好。实地调查显示, 水麻生长的沟边生境, 土壤固结, 土层紧实, 主要原因可能是水麻根系固土护坡作用强且树冠在林内形成二次降水, 降低雨水对坡面的直接冲刷小, 水土流失较少。

叶片通过光合作用, 可为植物生长发育提供营养物质和储存能量, 与植物对环境的利用有紧密关系^[26], 植物叶片数和叶面积是其在环境中竞争能力的表现。本研究中林缘丛生水麻叶片数最多, 与分枝数变化规律一致。谢元贵等^[25]在研究桃叶杜鹃 *Rhododendron annae* 种群构件特征时也得出相似结论, 即分枝数的增加导致构件种群内部竞争更加激烈, 为更多地弥补因竞争而损失的物质能量积累, 植物又通过增加叶片数量以充分的利用资源环境^[27]; 叶片面积的大小不仅与外界环境密切相关, 还与植株内部构造及叶的发育期有关。沟边和林缘丛生水麻叶面积较大, 这主要与植株利用光能的多少呈正比。沟边和林缘生境皆不受乔木层影响, 光照充足, 光热条件较好, 利于叶片进行充足的光合利用, 物质积累和代谢增加, 叶面积增大; 林内丛生水麻叶面积比林内单株大, 这也说明适当的遮光可使叶面积增大, 以最大限度利用光能, 进行光合作用。另外, 在同一生境中, 叶面积二级枝 > 一级枝 > 三级枝, 这是不同叶片发育期, 光合速率存在差异, 老枝上的叶所占据的营养物质减少, 促进新叶叶面积增长, 避免叶自身竞争, 这与刺五加 *Acanthopanax senticosus* 种群的生长状况相似。同时, 分枝数的多少关系着植物内部的竞争, 对叶面积的大小也存在一定影响^[27]。

水麻易繁殖, 丛生比单株生长良好。在乔木无法生长、易滑坡的坡面, 水麻护坡、固土作用强。通过分析比较不同生长类型水麻对不同生境光照、空间等资源的利用和适应策略, 对水麻进行科学管理, 以最大限度获取生境资源, 实现生态效益的最优化。

5 参考文献

- [1] 李海燕, 杨允菲, 李建东, 等. 不同植被类型大油芒种群构件特征的比较研究[J]. 中国草地学报, 2011, **33**(6): 35 – 40.
LI Haiyan, YANG Yunfei, LI Jiandong, et al. Comparison of module characteristics of *Spodiopogon sibiricus* populations in different vegetation types [J]. *Chin J Grassland*, 2011, **33**(6): 35 – 40.
- [2] 陈波, 宋永昌, 达良俊. 天童常绿阔叶树种栲树生殖个体大小及其生殖构件特征[J]. 植物研究, 2004, **24**(1): 80 – 85.
CHEN Bo, SONG Yongchang, DA Liangjun. Study on reproductive unit size and reproductive modules dynamics of *Castanopsis fargesii* in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province [J]. *Bull Bot Res*, 2004, **24**(1): 80 – 85.
- [3] 苏智先, 钟章成, 杨万勤, 等. 四川大头茶种群生殖生态学研究(I)生殖年龄、生殖年龄结构及其影响因素研究[J]. 生态学报, 1996, **16**(5): 517 – 524.
SU Zhixian, ZHONG Zhangcheng, YANG Wanqing, et al. Studies on the reproductive ecology *Gordonia acuminata* population (I) studies on the reproductive age, reproductive age structure and their affecting factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 1996, **16**(5): 517 – 524.
- [4] 蒲高忠, 唐赛春, 潘玉梅, 等. 入侵植物银胶菊在不同生境下表型可塑性和构件生物量[J]. 广西植物, 2010, **30**(5): 641 – 646.
PU Gaozhong, TANG Saichun, PAN Yumei, et al. Phenotypic plasticity and modular biomass of invasive *Parthenium hysterophorus* in different habitats in south China [J]. *Guihaia*, 2010, **30**(5): 641 – 646.
- [5] 周兵, 闫小红, 肖宜安, 等. 不同生境下入侵植物胜红蓟种群构件生物量分配特性研究[J]. 生态学报, 2015, **34**(8): 2602 – 2608.
ZHOU Bing, YAN Xiaohong, XIAO Yi'an, et al. Module biomass of *Ageratum conyzoides* populations in different habitats [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **34**(8): 2602 – 2608.
- [6] DAVIDSON A M, JENNIONS M, NICOTRA A B. Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta analysis [J]. *Ecol Lett*, 2011, **14**(4): 419 – 431.

- [7] 李姝, 蒋泽波. 植物种群构件的理论概述及研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(36): 12795 – 12797, 12802.
LI Shu, JIANG Zebo. Theory and research progresses in plant population modular [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, **42**(36): 12795 – 12797, 12802.
- [8] 贾程, 何飞, 樊华, 等. 植物种群构件研究进展及其展望[J]. 四川林业科技, 2010, **31**(3): 43 – 50.
JIA Cheng, HE Fei, FAN Hua, *et al.* Researches on plant population modules [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2010, **31**(3): 43 – 50.
- [9] 朱春全, 雷静品, 刘晓东, 等. 不同经营方式下杨树人工林叶面积分布与动态研究[J]. 林业科学, 2001, **37**(1): 46 – 51.
ZHU Chunquan, LEI Jingpin, LIU Xiaodong, *et al.* The distribution and seasonal change of leaf area in poplar plantations managed in different ways [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37**(1): 46 – 51.
- [10] 闫宝龙, 赵清格, 周梅, 等. 大兴安岭南段白桦种群构件特征分析[J]. 内蒙古林业调查设计, 2016, **39**(2): 23 – 27.
YAN Baolong, ZHAO Qingge, ZHOU Mei, *et al.* Feature analysis of the *Betula platyphylla* population annual modules in the south of Great Khingan Mountains [J]. *Inner Mongolia For Invest Des*, 2016, **39**(2): 23 – 27.
- [11] 程伟, 曾杰, 赵志刚, 等. 2 种生境条件下西南桦的生殖构件及其空间格局[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, **18**(1): 75 – 81.
CHENG Wei, ZENG Jie, ZHAO Zhigang, *et al.* Reproductive modules and their spatial patterns of *Betula alnoides* in two habitats [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, **18**(1): 75 – 81.
- [12] 于应文, 梁天刚, 陈家宽. 气候因子对混播草地不同种群生长及其个体消长的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2003, **9**(5): 474 – 478.
YU Yingwen, LIANG Tiangang, CHEN Jiakuan. Effects of climatic factors on growth of different populations and their individual growth and decline characteristics in mixed pasture [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2003, **9**(5): 474 – 478.
- [13] 张应团, 易咏梅, 王贞. 水麻扦插的插穗类型与扦插时间效应分析[J]. 安徽农业科学, 2013, **41**(13): 5713 – 5715.
ZHANG Yingtuan, YI Yongmei, WANG Zhen. Cutting types and time effects on cutting propagation of *Debregeasia orientalis* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, **41**(13): 5713 – 5715.
- [14] 晁无疾, 陈志平. 野生果树水麻资源研究[J]. 中国野生植物, 1992(4): 1 – 4.
CHAO Wuji, CHEN Zhiping. Study on the *Debregeasia orientalis* of wild fruit trees [J]. *Chin Wild Plant*, 1992(4): 1 – 4.
- [15] 杨再昌, 马小彦, 乐意, 等. 用秀丽隐杆线虫观察 43 种中药的体内抗菌药效[J]. 时珍国医国药, 2010, **21**(5): 1174 – 1175.
YANG Zaichang, MA Xiaoyan, LE Yi, *et al.* Observation the antibacterial efficacy in 43 kinds of traditional Chinese medicine using *Caenorhabditis elegans* [J]. *Lishizhen Med Mat Med Res*, 2010, **21**(5): 1174 – 1175.
- [16] 张俊斌. 多孔性护岸工程之植物根力研究[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(3): 144 – 146.
ZHANG Junbin. Study on the root strength of plants for porous revetment engineering [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2007, **14**(3): 144 – 146.
- [17] 李丹雄, 杨建英, 史常青, 等. 汶川地震滑坡迹地植被恢复中优势种的种间关联性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(5): 938 – 943.
LI Danxiong, YANG Jianying, SHI Changqing, *et al.* Interspecific association of dominant species in the vegetation recovery process after landslide of Wenchuan Earthquake [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20**(5): 938 – 943.
- [18] OOHATA S I, SHIDEI T. Studies on the branching structure of trees (I) bifurcation ratio of trees in Horton's law [J]. *Jpn J Ecol*, 1971, **21**(1/2): 7 – 14.
- [19] 吕志伟, 边才苗. 天台山云锦杜鹃幼树的构型分析[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(6): 696 – 701.
LÜ Zhiwei, BIAN Caimiao. Architectural analysis of *Rhododendron fortunei* saplings in Mountain Tiantai, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(6): 696 – 701.
- [20] WHITHEY G G. The bifurcation ratio as an indicator of adaptive strategy in woody plant species [J]. *Bull Torrey Bot*

- Club*, 1976, **103**(2): 67 – 72.
- [21] STEINGRAEBER D A, WALLER D M. *Non-stationary of Tree Branching Pattern and Bifurcation Ratio* [M]. London: Proceedings of the Royal Society, 1986.
- [22] 何丙辉, 钟章成. 不同光强与干旱胁迫对银杏枝叶构件生长的影响[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2005, **23**(3): 66 – 69.
- HE Binghui, ZHONG Zhangcheng. Effects of environmental stress on modular growth of leaf and branch population in *Ginkgo biloba* [J]. *J Guangxi Norm Univ*, 2005, **23**(3): 66 – 69.
- [23] 赵友华. 遮阴条件下栲树幼苗枝、叶构件统计学研究[J]. 渝州大学学报(自然科学版), 1997, **14**(1): 28 – 31.
- ZHAO Youhua. Study on leaf and branch demography in *Castanopsis fargesii* seedlings under shading condition [J]. *J Yuzhou Univ Nat Sci Ed*, 1997, **14**(1): 28 – 31.
- [24] 魏媛, 喻理飞. 构树枝构件种群生态特征研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29**(5): 34 – 37.
- WEI Yuan, YU Lifei. Study on ecological characteristics of *Broussonetia papyrifera* branches module population [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, **29**(5): 34 – 37.
- [25] 谢元贵, 廖小峰, 龙秀琴, 等. 桃叶杜鹃种群构件的特征研究[J]. 贵州农业科学, 2012, **40**(8): 171 – 175.
- XIE Yuangui, LIAO Xiaofeng, LONG Xiuqin, *et al.* Study on the modular characteristics of *Rhododendron annae* population [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2012, **40**(8): 171 – 175.
- [26] 苏磊, 杨浩, 徐杰. 木本植物构件生态学研究概述[J]. 世界林业研究, 2014, **27**(2): 17 – 22.
- SU Lei, YANG Hao, XU Jie. Study on modular ecology of woody plants [J]. *World For Res*, 2014, **27**(2): 17 – 22.
- [27] 郇慧慧, 胥晓, 刘刚, 等. 不同分枝数对桑树幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 823 – 831.
- XUN Huihui, XU Xiao, LIU Gang, *et al.* Effect of branch number on the growth and development of *Morus alba* saplings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(4): 823 – 831.