



闽西南红壤侵蚀区黑莎草功能性状特征及其与土壤因子的关系

郜鹏畅, 陈志彪, 陈志强, 牛玉娇, 区晓琳, 王海燕

引用本文:

郜鹏畅, 陈志彪, 陈志强, 牛玉娇, 区晓琳, 王海燕. 闽西南红壤侵蚀区黑莎草功能性状特征及其与土壤因子的关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(6): 842–011–1.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4538>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黔中喀斯特9种木质藤本叶功能性状研究

Studies on Leaf Functional Traits of Nine Woody Lianas in the Karst Area of Central Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 455–464 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4328>

海南岛滨海沙生植物叶片功能性状分异及其与土壤因子的关系

Difference of Leaf Functional Traits of Coastal Psammophytes in Hainan Island and Its Relationship with Soil Chemical Properties

热带亚热带植物学报. 2022, 30(5): 708–717 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4519>

郭岩山不同海拔丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系

Functional Characteristics of *Castanopsis fargesii* Fine Roots and Their Relationship with Soil Factors at Different Elevations in Guoyan Mountain

热带亚热带植物学报. 2022, 30(3): 413–422 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4452>

井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应

Response of Leaf Functional Traits of Shrubs to Altitude in *Rhododendron latoucheae* Communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 129–138 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3930>

不同品系福建山樱花叶功能性状研究

Leaf Functional Characteristics in Different Strains of *Prunus campanulata*

热带亚热带植物学报. 2015(2): 191–196 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.011>

向下翻页，浏览PDF全文

闽西南红壤侵蚀区黑莎草功能性状特征及其与土壤因子的关系

郜鹏畅, 陈志彪*, 陈志强, 牛玉娇, 区晓琳, 王海燕

(福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

摘要: 为了解黑莎草(*Gahnia tristis*)在南方红壤侵蚀区的适应状况, 测定了长汀县红壤侵蚀区的黑莎草叶片、根系的功能性状及土壤理化性质, 并应用数理统计方法分析了黑莎草叶片与根系功能性状之间的相关性, 及其对土壤因子的响应。结果表明, 黑莎草叶片表型性状在冬夏季间存在显著差异, 叶长、叶宽、叶组织密度和叶绿素表现为夏季显著大于冬季, 根系表型性状则更具稳定性, 冬季的根系养分含量均高于夏季, 养分的分配上叶片养分高于根系养分。叶组织密度与叶绿素含量呈显著正相关, 与比叶面积呈显著负相关; 根组织密度与比根长和比根面积均呈显著负相关, 叶片和根系养分间均呈显著正相关, 土壤碳、氮、磷含量是影响黑莎草功能性状主要因子。因此, 黑莎草可通过调节功能性状以适应环境变化, 可作为地带性植物应用于南方红壤侵蚀区的植被恢复和水土流失治理。

关键词: 黑莎草; 功能性状; 土壤因子; 冗余分析; 红壤侵蚀区; 华南

doi: 10.11926/jtsb.4538

Functional Traits of *Gahnia tristis* and Its Relationship with Soil Factors in the Red Soil Erosion Area of Southwestern Fujian

GAO Pengchang, CHEN Zhibiao*, CHEN Zhiqiang, NIU Yujiao, OU Xiaolin, WANG Haiyan

(School of Geographical Science, Fujian Normal University, Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to understand the adaptation of *Gahnia tristis* in the red soil erosion zone of southern China, the functional traits of leaves and roots of *G. tristis*, and the physicochemical properties of soil were determined and their correlations and the responses of leaves and roots of *G. tristis* to soil factors were analyzed by using mathematical statistics method. The results showed that there were significant differences in phenotypic traits of *Gahnia tristis* leaves between winter and summer, leaf length, leaf width, leaf tissue density and chlorophyll content were significantly higher in summer than those in winter, while the root phenotypic traits were more stable. The nutrient content of roots in winter was higher than that in summer, and the nutrient allocation in leaves was higher than that of roots. Leaf tissue density had positive correlation with chlorophyll content and negative with specific leaf area. There was significant negative correlation between root tissue density and specific root length and specific root area, and significant positive correlation between leaf and root nutrients. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents were the main factors affecting the functional properties of *G. tristis*. Therefore, it was suggested that *G. tristis* could adapt to environmental changes by adjusting its functional traits, which could be used as a zonal plant for vegetation restoration and soil erosion control in the red soil erosion areas of south China.

收稿日期: 2021-09-28 接受日期: 2021-12-22

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2020N5007)资助

This work was supported by the Project for Industry-university Cooperation in Fujian (Grant No. 2020N5007).

作者简介: 郜鹏畅(1996 生), 女, 硕士研究生, 主要从事退化地生态恢复研究。E-mail: 1449207321@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhibiao@fjnu.edu.cn

Key words: *Gahnia tristis*; Functional trait; Soil factor; Redundancy analysis; Red soil erosion region; South China

植物功能性状是与其生存发育有密切相关的核心属性, 可以反映对环境变化的适应性, 并且影响生态系统的功能^[1-3]。植物在应对环境及生态系统变化时进行自我调节, 从形态等方面表达其对环境的适应程度^[4], 功能性状的变化最大程度地减少了环境对自身不利的影 响, 反映出植物的最优“适应原则”^[5], 揭示植物群落对于环境变化的适应策略及在逆境条件下的生物多样性恢复机制^[2]。植物功能性状之间是相互协同与权衡的关系, 通过各性状间组合联动来实现生存与延续^[6-7]。

叶片是植物进行光合作用和与大气能量交换的主要器官^[8], 目前对于影响叶片性状的 因素较多且没有统一的认识, 丁佳等^[9]研究表明, 土壤水分和氮含量影响森林生态系统幼龄植物叶片性状变异的主要因子, 而在老龄林中影响叶片性状的主要因素有土壤有机质和磷含量。Jager 等^[10]对新西兰热带雨林 30 树种的研究表明, 叶片氮磷含量、比叶面积、叶厚以及叶干物质含量均与土壤肥力存在相关关系。刘昱霞等^[11]对甘南高寒草甸植物性状的研究表明, 土壤 pH 与土壤水分共同对植物性状产生影响。根系是植物吸收水分和养分的重要器官, 根系功能性状是反映植物对水分和养分利用效率的重要指标^[12], 其研究是了解植物对资源利用效率高低的重要途径。根系对环境的适应能力是茎叶部分生长发育和增强植物自身环境适应性的重要因素^[13], 为应对生境变化, 根系形成了自身特点, 为适应极端干旱的环境植物会延长根深以抵御干旱^[14], 张帆等^[15]研究表明, 柠条人工林的细根根长密度受土壤温度等因子影响存在季节波动性。在植物生长发育的过程中, 植物的功能性状与温度、水分和养分等有紧密的联系^[16]。研究作为植物体重要的营养与表型器官的功能性状, 有助于了解和掌握植物对生态系统中环境变化的适应程度。许多学者逐渐意识到可以通过对植物功能性状的研究辅助解决植物生态学问题, 越来越多的研究开始侧重于在环境梯度的变化下所导致的植物功能性状的改变及对生态系统功能的改变等方面^[17]。

福建省长汀县南方红壤侵蚀区是典型的生态系统严重退化区, 植被恢复是恢复与重建退化生态系统的前提, 寻找优良草本成为水土流失治理与退

化生态系统恢复与重建的关键。在土壤贫瘠, 干热化严重的退化生态系统中很多植被难以存活发育, 但近年来我们在调查研究中发现, 本土植物黑莎草 (*Gahnia tristis*) 能与代表性草本植物芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 共生甚至生长更健壮, 根系发达, 地上与地下连接处保水作用十分明显。但经初步调查发现, 黑莎草的分布存在明显的地域性, 原因有待进一步探索。目前关于黑莎草的研究主要集中在植物群落多样性和生物量等方面^[18-20], 功能性状的相关研究鲜有报道。本研究以黑莎草为研究对象, 分析黑莎草叶片和根系的功能性状特征, 结合土壤因子的变化, 明晰其功能性状与土壤环境因子的关系, 探讨黑莎草在红壤侵蚀区的环境适应状况, 期为黑莎草投入侵蚀区水土流失治理工作提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省西南部的长汀县 (25°38'15"~25°42'55" N, 116°23'30"~116°30'30" E), 属于中亚热带湿润气候, 多年平均气温 18.3 °C, 无霜期年均 260 d, 1 月平均气温 8.1 °C, 7 月平均气温 27.2 °C; 年降水量为 1 700~2 000 mm, 且降水的季节变化较明显, 其中 3—8 月为集中降水期, 降水量占全年的 70% 以上。土壤以花岗岩风化淋溶形成的红壤和侵蚀红壤为主, 抗侵蚀能力极低^[21]。长期以来受自然和人为等因素的影响, 植被遭到严重破坏, 产生严重的土壤侵蚀现象, 退化生态系统面积不断扩大。研究区内草本以黑莎草、芒萁和宽叶雀稗 (*Paspalum wettsteinii*) 为主。

1.2 样地选择、样品采集与处理

根据典型性和代表性原则并结合当地的植物调查, 在长汀县来油坑和黄泥垄选取侵蚀样地 3 处, 分别命名为 1、2、3 样地 (表 1, 2), 样地内的黑莎草植株均为自然生长。

不同季节的光照强度、月均温和水分供应不同, 植物以不同的形态和习性等特征来适应生长环境, 另外不同温度和水分条件会影响土壤有机碳、

表 1 样地概况

Table 1 Overview of plots

样地编号 Plot No.	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔 (m) Altitude	坡向 (°) Aspect	盖度 /% Coverage	黑莎草株高 (cm) Height of <i>Gahnia tristis</i>
1	116°30'30"	25°42'55"	365	80	60	78.74
2	116°23'30"	25°38'15"	345	270	10	78.86
3	116°16'52"	25°31'49"	324	135	20	81.89

表 2 土壤环境因子特征

Table 2 Characteristics of soil environmental factors

土壤因子 Soil factor	7 月 July			12 月 December		
	1	2	3	1	2	3
含水率 Moisture content (SMC) /%	16.83±1.97	16.96±1.01	19.93±1.80	12.63±0.85	12.18±0.84	13.90±1.41
容重 Bulk density (SBD, g/cm ³)	1.43±0.09	1.46±0.15	1.33±0.08	1.39±0.08	1.33±0.12	1.29±0.08
pH	5.08±0.29	4.78±0.10	5.07±0.10	4.98±0.21	4.67±0.11	4.89±0.09
全碳含量 Total C content (STC, g/kg)	6.89±2.18	6.22±1.11	2.32±1.13	5.10±0.87	7.92±0.92	1.24±0.26
全氮含量 Total N content (STN, g/kg)	0.42±0.24	0.45±0.10	0.16±0.08	0.55±0.10	0.65±0.07	0.30±0.04
全磷含量 Total P content (STP, g/kg)	0.06±0.01	0.09±0.01	0.12±0.02	0.11±0.01	0.15±0.02	0.17±0.03
全钾含量 Total K content (STK, g/kg)	8.14±1.33	8.64±0.73	28.81±7.22	16.33±1.43	14.83±0.77	37.83±9.21
铵态氮 Ammonium nitrogen (SAN, mg/kg)	28.00±2.14	29.33±2.35	22.18±2.08	3.17±0.47	4.73±0.37	3.04±0.15
硝态氮 Nitrate nitrogen (SNN, mg/kg)	1.15±0.29	0.80±0.08	1.58±0.34	1.13±0.23	0.70±0.11	0.97±0.06
速效磷 Available phosphorus (SAP, mg/kg)	0.52±0.07	0.40±0.09	0.58±0.07	0.36±0.05	0.36±0.08	0.54±0.08
速效钾 Available potassium (SAK, mg/kg)	108±7.48	104±10.20	106±14.97	80±12.65	106±14.97	90±8.94

总氮、总磷等含量和植物的生理功能及养分转移^[22-23]。本研究选定采样时间为 7 月(夏季)和 12 月(冬季), 分别代表一年中的 2 个极端情况, 通过测量冬夏季黑莎草各项功能性状指标和土壤理化性质, 更有利于认识黑莎草对环境的适应性。分别于 12 月与次年 7 月采集样品, 3 个样地自西向东布设 20 m×20 m 的样方, 再分别设置 5 个 5 m×5 m 的小样方, 每个小样方内挑选 1 株黑莎草植株。黑莎草地上部分采取收获法, 随机选取 20 片发育良好的完整叶片, 用润湿滤纸相夹装入编号自封袋然后放入 4 °C 冰盒保存, 地下部分采取挖掘法, 将伴有须根和细根的土壤一并放入编号自封袋, 带回实验室。按照 5 点法采集土样均匀混合成 1 个样品后装入写好标签的自封袋中; 同时采用环刀-铝盒采集各样点的原状土, 用自封袋密封保存带回实验室。

在实验室中将采集回的植物样本用蒸馏水冲洗后阴干并将带有土壤的细根、须根用蒸馏水进行浸泡清洗, 随后将黑莎草地上、地下部分样本分开装入牛皮纸信封袋中于 75 °C 鼓风干燥箱中烘干后称量质量, 计算地上部分(叶片)、地下部分(根系)的生物量。最后将黑莎草样本用粉碎机进行粉碎, 再过 100 目筛装入自封袋保存于干燥处, 用于测定元素含量。除去土样中的石子、树根、枯草等杂质,

放置在干燥通风的地方自然风干。风干后的土壤样本研磨过 100 目筛, 用于测定土壤养分等。

1.3 方法

叶片表型性状的测定 挖取黑莎草植株前, 随机选取 3 片完整叶片, 分别在叶基、叶中和叶尖部分用 PJ-4N 便携式叶绿度测量仪(郑州明检农业科技有限公司)测定叶绿素相对含量(SPAD 值)。然后用游标卡尺(精度 0.02 mm)按叶基、叶中和叶尖的顺序测量叶片宽度(mm)和厚度(mm)。清除叶片表面杂质, 使用佳能 2580S 扫描仪对叶片进行扫描, 运用 Image J 图像分析软件计算叶面积(cm²)、叶长(cm)。以上数据均取平均值。对叶片编号入档。采用精度为 0.0001 g 的电子天平称量叶片鲜质量(g), 然后置于 4 °C 水中浸泡 12 h, 取出吸干表面水分, 称量饱和叶片鲜质量(g)。叶片样品在烘箱内经 105 °C 杀青 30 min 后, 在 70 °C 下烘干, 称量叶片干质量(g)。使用 Excel 2010 计算比叶面积(specific leaf area, SLA)、叶干物质含量(leaf dry matter content, LDMC)、叶组织密度(leaf tissue density, LTD)和叶相对含水率(leaf relative water content, LRWC), 比叶面积(cm²/g)=叶面积(cm²)/叶干质量(g); 叶干物质含量(g/g)=叶干质量(g)/叶饱和鲜质量(g); 叶组织密

度(mg/mm^3)=叶干质量(g)/[叶面积(cm^2)×叶厚(mm)]; 叶相对含水率(%)=[叶鲜质量(g)-叶干质量(g)]/[叶饱和鲜质量(g)-叶干质量(g)]×100%。

根系表型性状的测定 将植物根系上附着的土用水洗干净, 并分离出细根(直径<2 mm)装入自封袋内并做好标签, 放于4℃冰箱保存鲜样。用佳能2580S扫描仪对根系进行扫描, 采用WinRHIZO 8.0软件对根系形态进行分析。测量根长(root length, RL)、根表面积(root superficial area, RSA)、根体积(root volume, RV)和平均根直径(root average diameter, RAD)等指标, 根系经70℃烘干后, 利用精度为0.0001g的电子天平称量根干质量(g), 计算比根长、根组织密度、比根面积。比根长(m/g)=根长(m)/根干质量(g); 根组织密度(mg/cm^3)=根干质量(g)/根体积(cm^3); 比根面积(cm^2/mg)=根表面积(cm^2)/根干质量(g)。

叶片和根系养分含量的测定 将采集的叶片和根系于烘箱中105℃杀青30min后, 70℃烘干, 分别进行粉碎研磨、过100目尼龙筛, 装袋待测。叶片和根系全碳和全氮含量采用Elementar Vario ELIII碳氮元素分析仪(德国)测定, 全磷含量采用高氯酸消煮法, 用Skalar san++连续流动分析仪(荷兰)测定; 全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮法, 用FP 640火焰光度仪(中国)测定。

土壤因子测定 用五点法采集10cm厚土样, 每样方设置3组重复, 相同样地不同样方的土壤混合均匀, 同时, 采用环刀-铝盒采集原状土。采用环刀法测定土壤容重; 铝盒烘干法测定土壤含水率; 以水:土=1:2.5水浸-电位测定土壤pH值。有机碳和全氮采用Elementar Vario MAX碳氮元素分析仪测定; 全磷采用高氯酸消煮法、用Skalar san++连续流动分析仪测定; 全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮法, 用FP 640火焰光度仪测定; 速效氮(铵态氮、硝态氮)采用2mol/L KCl浸提法, 用Skalar san++连续流动分析仪测定; 速效磷采用Mehlich3法浸提, 用Skalar san++连续流动分析仪测定; 速效钾采用1mol/L NH_4OAc 浸提, 用FP 640火焰光度仪测定。

1.4 数据处理和分析

采用Excel 2010和SPSS 22软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)及LSD多重比较进行显著性检验, 用冗余分析(RDA)法对黑莎草叶片、根系表型性状与土壤理化性质之

间的关系进行分析。相关图表在Excel 2010、Origin 2018和Canoco 5内完成。

2 结果和分析

2.1 黑莎草功能性状特征

2.1.1 表型性状特征

除叶面积外, 其余叶片表型性状在冬夏季间均存在差异(图1)。叶长、叶宽、叶组织密度和叶绿素含量表现为夏季显著大于冬季($P<0.05$), 比叶面积则相反。3个样地的叶面积在冬夏季间差异不显著。

根系表型性状同样表现出差异性(图2)。3个样地的根直径在冬夏季的差异均不显著($P>0.05$); 样地1和样地2的比根长、根组织密度和比根面积在冬夏季均有显著差异($P<0.05$); 冬季的比根长和比根面积高于夏季, 根组织密度则相反。样地2夏季的比根长和比根面积均最小。

2.1.2 养分含量特征

从图3可见, 黑莎草叶片的碳、氮、磷和钾含量分别为403.65~433.45、4.17~5.82、0.14~0.24和11.97~25.20g/kg。样地3的叶片碳含量最低, 氮、磷、钾含量最高, 冬夏季叶片碳、氮和钾含量分别仅在样地1、样地3和样地2存在显著差异($P<0.05$), 而叶片磷含量在样地1和样地3均差异显著($P<0.05$)。

从图4可见, 根系的碳、氮、磷和钾含量分别为258.85~428.22、1.49~2.76、0.09~0.21和5.6~21.27g/kg。样地3的根系碳含量最低, 钾含量最高, 且根系碳含量在冬夏季的差异显著($P<0.05$); 冬季根系氮、磷含量高于夏季, 且样地2和样地3的差异显著($P<0.05$)。

总体上, 除碳含量和12月根系氮含量外, 其余养分均以样地3较高, 冬季的根系养分含量均高于夏季, 养分的分配上叶片高于根系。

2.2 相关分析

由表3和4可见, 叶组织密度与比叶面积呈显著负相关, 而与叶绿素含量则呈显著正相关关系; 叶绿素含量与叶片全碳和全氮含量相关; 叶干物质含量与叶片氮、磷、钾含量均呈负相关关系。根组织密度与比根长、比根面积和根系全磷含量均呈显著负相关, 叶片和根系氮、磷、钾含量之间均显著正相关。

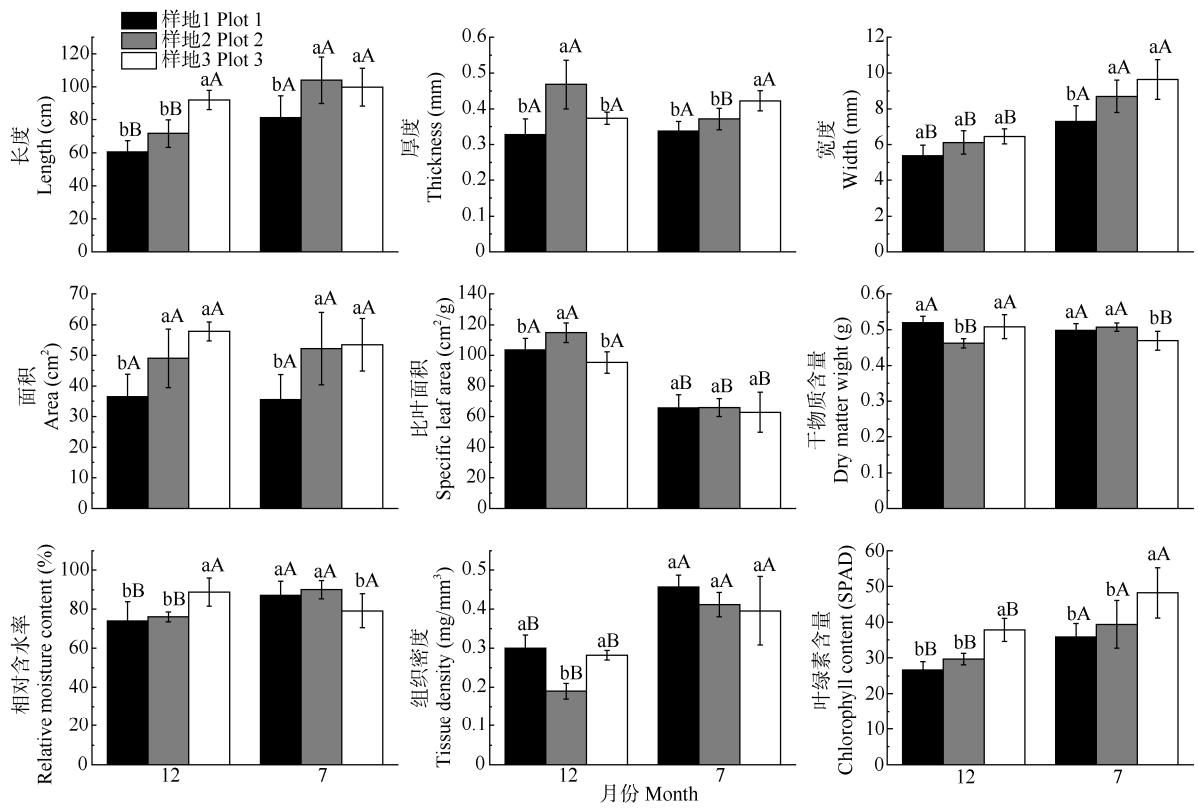


图 1 黑莎草叶片表型性状特征。柱上大写字母表示 7 和 12 月间差异显著 ($P < 0.05$), 小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Fig. 1 Leaf phenotypic characteristics of *Gahnia tristis*. Capital letters upon column indicate significant differences between July and December at 0.05 level, while lowercase letters indicate differences among plots at 0.05 level. The same below

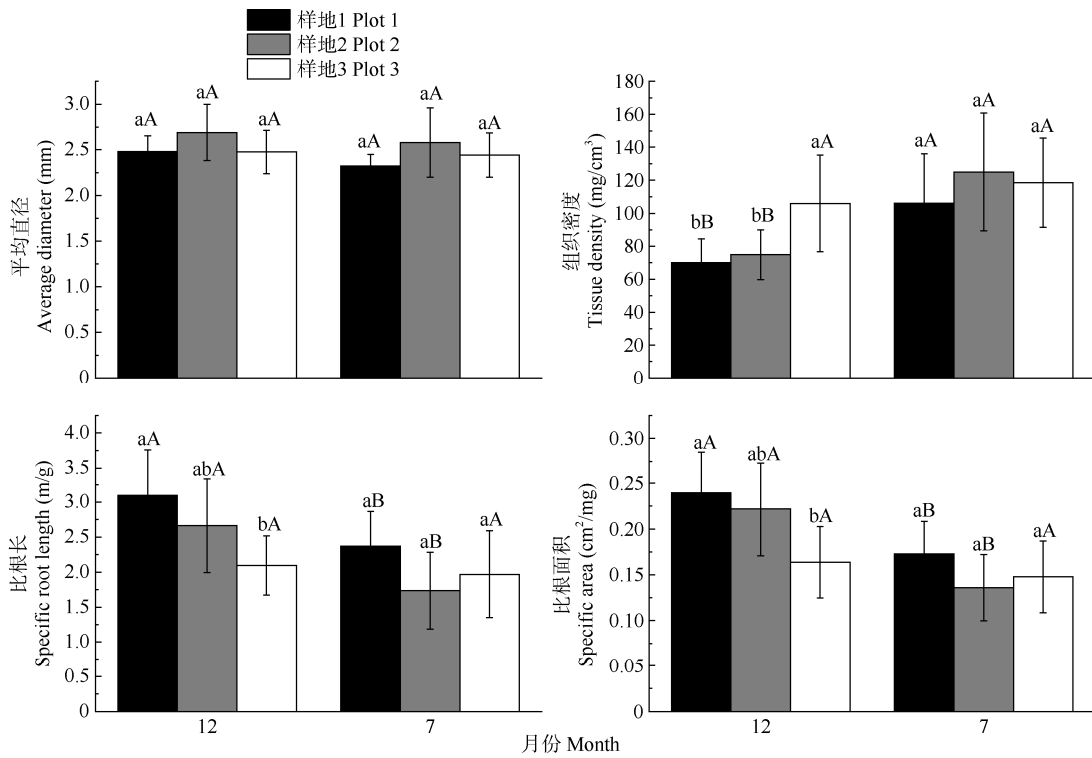


图 2 黑莎草根系表型性状特征

Fig. 2 Root phenotypic characteristics of *Gahnia tristis*

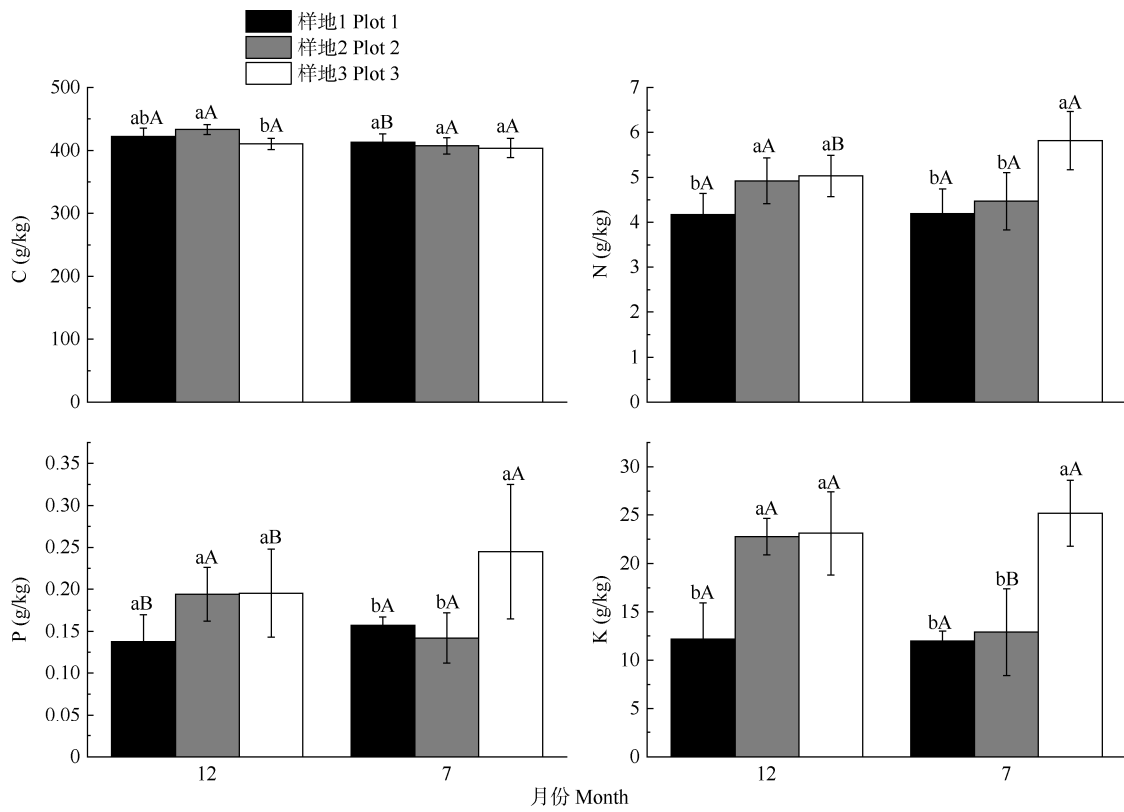


图 3 黑莎草叶片养分含量特征

Fig. 3 Characteristics of nutrient content in leaf of *Gahnia tristic*

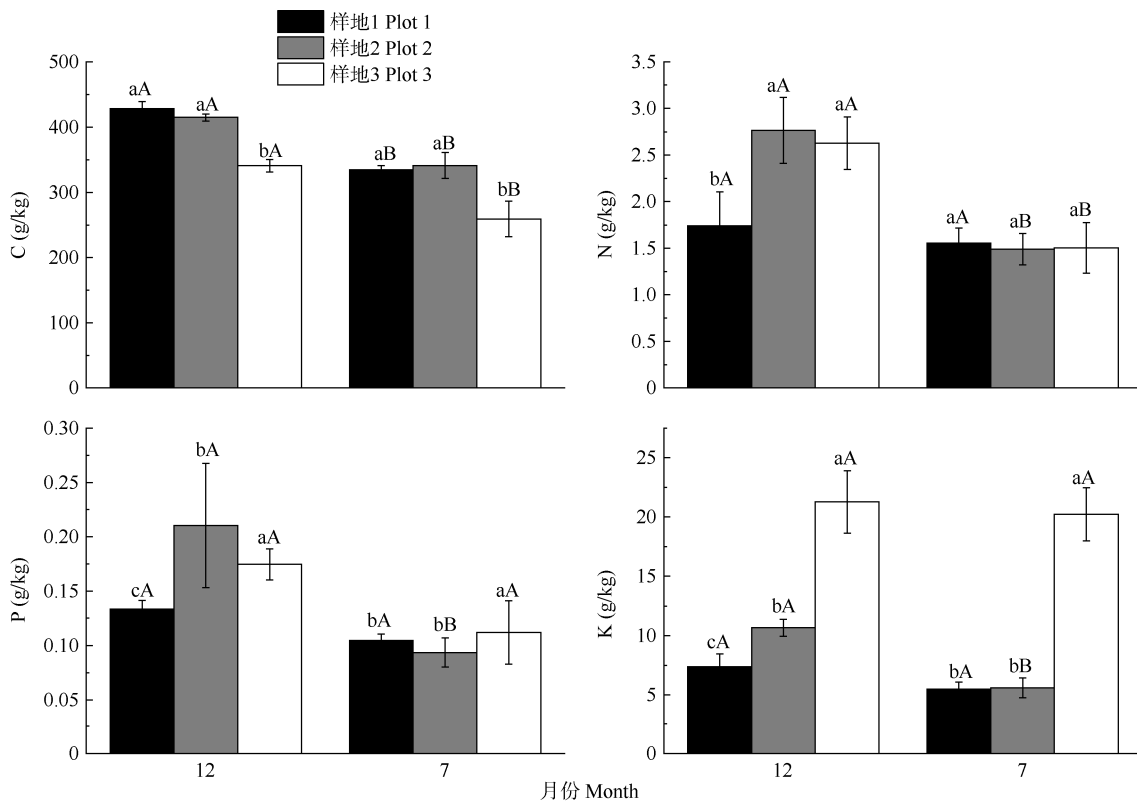


图 4 黑莎草根系养分含量特征

Fig. 4 Characteristics of nutrient content in root of *Gahnia tristic*

表 3 黑莎草叶片功能性状间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of leaf functional traits of *Gahnia tristis*

性状 Trait	LL	LT	LW	LA	SLA	LDMC	LRWC	LTD	Chl	LTC	LTN	LTP	LTK
LL	1												
LT	0.282	1											
LW	0.807**	0.26	1										
LA	0.648**	0.469**	0.520**	1									
SLA	-0.660**	-0.001	-0.794**	-0.075	1								
LDMC	0.099	-0.542**	-0.087	-0.076	-0.145	1							
LRWC	0.331	-0.24	0.271	0.163	-0.246	0.459*	1						
LTD	0.414*	-0.387*	0.613**	-0.198	-0.882**	0.279	0.269	1					
Chl	0.658**	0.190	0.765**	0.477**	-0.666**	-0.225	0.339	0.483**	1				
LTC	-0.382*	0.279	-0.379*	-0.066	0.475**	-0.237	-0.35	-0.499**	-0.471**	1			
LTN	0.288	0.629**	0.366*	0.567**	-0.051	-0.444*	-0.07	-0.227	0.427*	0.250	1		
LTP	0.184	0.530**	0.258	0.473**	0.071	-0.463**	-0.017	-0.265	0.304	0.218	0.730**	1	
LTK	0.145	0.708**	0.142	0.519**	0.166	-0.536**	-0.169	-0.428*	0.300	0.345	0.834**	0.857**	1

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; LL: 叶长; LT: 叶厚; LW: 叶宽; LA: 叶面积; SLA: 比叶面积; LDMC: 叶干物质含量; LRWC: 叶相对含水率; LTD: 叶组织密度; Chl: 叶绿素含量; LTC: 叶全碳含量; LTN: 叶全氮含量; LTP: 叶全磷含量; LTK: 叶全钾含量。下同

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; LL: Leaf length; LT: Leaf thickness; LW: Leaf width; LA: Leaf area; SLA: Specific leaf area; LDMC: Leaf dry matter content; LRWC: Leaf relative water content; LTD: Leaf tissue density; Chl: Chlorophyll; LTC: Leaf total C content; LTN: Leaf total N content; LTP: Leaf total P content; LTK: Leaf total K content. The same below

表 4 黑莎草根系功能性状间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of root functional traits of *Gahnia tristis*

性状 Trait	AD	RTD	SLR	SRA	RTC	RTN	RTP	RTK
AD	1.000							
RTD	-0.400*	1.000						
SLR	-0.141	-0.789**	1.000					
SRA	0.118	-0.926**	0.949**	1.000				
RTC	0.115	-0.574**	0.535**	0.546**	1.000			
RTN	0.036	-0.201	0.127	0.128	0.336	1.000		
RTP	0.281	-0.437*	0.274	0.333	0.447*	0.745**	1.000	
RTK	0.192	0.009	-0.175	-0.127	-0.234	0.440*	0.560**	1.000

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; RAD: 根直径; RTD: 根组织密度; SRL: 比根长; SRA: 比根面积; RTC: 根全碳含量; RTN: 根全氮含量; RTP: 根全磷含量; RTK: 根全钾含量。下同

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$; RAD: Root average diameter; RTD: Root tissue density; SRL: Specific root length; SRA: Specific root surface area; RTC: Root total C content; RTN: Root total N content; RTP: Root total P content; RTK: Root total K content. The same below

2.3 功能性状对土壤因子的响应

为进一步探讨黑莎草叶片和根系功能性状与土壤因子间的关系,将 7 和 12 月的功能性状指标分别与土壤含水率、pH、容重、土壤全量养分和速效养分等 11 个指标进行冗余分析(RDA)。由表 5 可见,12 月第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.982 9 和 0.916 6,共解释了 60.28%的叶功能性状变化和 73.9%的叶功能性状与土壤因子关系;7 月第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.944 1 和 0.977 4,共解释了 66.94%的叶功能性状变化和 76.21%的叶功能

性状与土壤因子关系。12 月第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.985 2 和 0.996 0,共解释了 72.31%的根系功能性状变化和 74.92%的根系功能性状与土壤因子关系;7 月第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.991 1 和 0.986 0,共解释了 72.03%的根系功能性状变化和 76.90%的根系功能性状与土壤因子关系。可见黑莎草叶片与根系功能性状和土壤因子有较好的相关关系,前两排序轴能较好地反映黑莎草功能性状和土壤因子的关系。由图 5、6 可见,12 月黑莎草叶片功能性状主要受土壤全碳

和铵态氮含量的影响, 根系功能性状主要受全量碳、磷、钾含量的影响。7 月黑莎草叶片功能性状主要受土壤全磷、全氮和硝态氮的影响, 根系功能性状主要受土壤全氮、全磷和速效磷的影响。可见黑莎草叶片与根系功能性状和土壤因子有较好的相关关系, 前 2 排序轴能较好地反映黑莎草功

能性状和土壤因子的关系。由图 5、6 可见, 12 月黑莎草叶片功能性状主要受土壤全碳和铵态氮含量的影响, 根系功能性状主要受全量碳、磷、钾含量的影响。7 月黑莎草叶片功能性状主要受土壤全磷、全氮和硝态氮的影响, 根系功能性状主要受土壤全氮、全磷和速效磷的影响。

表 5 叶片功能性状(LFT)与土壤因子(SF)的 RDA 分析

Table 5 RDA analysis of leaf functional traits (LFT) and soil factors (SF)

项目 Item	12 月 December				7 月 July			
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.457 2	0.145 6	0.091 0	0.050 0	0.375 4	0.293 9	0.081 7	0.049 5
LFT-SF 的相关系数 LFT-SF correlation coefficient	0.982 9	0.916 6	0.874 3	0.686 0	0.944 1	0.977 4	0.997 7	0.829 3
LFT 变化累计百分率 % of accumulative variation of LFT	45.720 0	60.280 0	69.380 0	74.370 0	37.540 0	66.940 0	75.100 0	80.050 0
LFT-SF 累计百分率 % of accumulative variation of LFT-SF	56.050 0	73.900 0	85.050 0	91.180 0	42.740 0	76.210 0	85.500 0	91.130 0
典型特征值总和 Sum of canonical eigenvalues	0.816 0				0.878 0			
F	1.200 0				2.000 0			
P	0.042 0				0.074 0			

表 6 根系功能性状(RFT)与土壤因子(SF)的 RDA 分析

Table 6 RDA analysis of root functional traits (RFT) and soil factors (SF)

项目 Item	12 月 December				7 月 July			
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.441 7	0.281 4	0.195 9	0.020 5	0.445 0	0.275 3	0.117 7	0.071 9
RFT-SF 的相关系数 RFT-SF correlation coefficient	0.985 2	0.996 0	0.975 6	0.942 9	0.991 1	0.986 0	0.890 8	0.9333
RFT 变化累计百分率 % of accumulative variation of RFT	44.170 0	72.310 0	91.900 0	93.950 0	44.500 0	72.030 0	83.790 0	90.980 0
RFT-SF 累计百分率 % of accumulative variation of RFT-SF	45.770 0	74.920 0	95.220 0	97.340 0	47.510 0	76.900 0	89.460 0	97.140 0
典型特征值总和 Sum of canonical eigenvalues	0.965				0.937			
F	7.600				4.000			
P	0.004				0.002			

3 结论和讨论

3.1 叶片和根系功能性状及其相关性

植物功能性状不是孤立发挥作用的, 在长期适应生存环境过程中, 黑莎草叶片和根系通过协同进化并最终形成最佳功能性状组合, 响应外部环境的同时对生态系统产生一定影响^[10]。植物通过比叶面积与叶组织密度共同作用来维持水分的平衡, 具体表现为比叶面积减小和叶组织密度增大^[24]。本研究中比叶面积和叶组织密度也呈显著负相关关系。目前有关叶面积与比叶面积的关系并未形成一致的认识^[25-26], 本研究中黑莎草的叶面积与比叶面积不存在显著相关关系, 表现出不同植物对特定环境的适应性不完全一致。叶绿素是植物光合作用的基

础^[27], 黑莎草叶绿素含量与叶片氮含量呈显著正相关关系, 这与前人^[28]的研究结果一致。比根长很大程度上反映了根系对水分与养分的吸收能力, 根组织密度则反映根系的抗拉力和防御能力, 黑莎草根系在 12 月表现出较高的比根长与较低的根组织密度来维持对养分的吸收, 在 7 月保持较高的根组织密度以防止水分过度流失以及高温损伤, 这与戚德辉等^[29]对铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)对环境变化的适应研究结果一致, 铁杆蒿在干旱贫瘠的环境中通过较高的比根长与较低的根组织密度维持对水分和养分的吸收, 黑莎草的比根长与根组织密度也存在显著负相关关系。通常具有较大比根长或比根面积的植物根组织密度较小, 可加快根系延伸与周转速率, 提高对养分和水分的吸收能力, 是植物吸收

受所处环境和养分有效性的制约,同时也与自身的生长节律密切相关^[34]。叶片和根系的氮、磷元素具有极显著的正相关关系,这与前人^[35-37]的研究结果一致,作为陆地生态系统植物生长的主要限制元素,氮、磷两者的正相关关系符合全球尺度的普遍性^[38]。

芒萁是南方红壤侵蚀区具有耐寒耐贫瘠特征的重要地带性植物^[39],黑莎草的叶面积、比叶面积、根直径和根组织密度及叶片与根系的钾含量远大于芒萁^[40],较大的比叶面积有利于黑莎草体内养分保持^[41-42],较高的根组织密度则体现黑莎草在贫瘠环境中的适应性^[43-44],黑莎草叶片和根系中较高的钾含量可促进糖类及蛋白质合成,提高纤维素和木质素含量,使得根茎膨大坚韧^[45],显示出比芒萁更大生物量、良好水土保持潜力且籽粒富含油脂,具有较高经济价值。

3.2 功能性状对土壤因子的响应

植物性状是由遗传因素和环境条件共同决定的^[46],土壤环境条件通过改变植物性状影响植物生存策略的调整^[14]。从冗余分析结果来看,土壤养分是影响黑莎草功能性状的主要因素,黑莎草12月功能性状主要受土壤碳、氮和磷含量的影响,7月功能性状主要受土壤氮、磷含量的影响。土壤养分是植物氮、磷营养的基础,进而影响植物代谢与生长^[47]。黑莎草叶片与根系养分含量与土壤养分之间具有很强的相关性。磷含量是限制植物生长的重要因素,低磷的环境使得植物不断调整自身形态来适应环境^[48],黑莎草叶面积和根直径与土壤全磷显著正相关。比叶面积可反映植物碳的获取策略^[49],在贫瘠土壤中的植物有较小比叶面积,养分充足的土壤环境中植物有较大的比叶面积^[50-51],本研究中黑莎草比叶面积与土壤全氮和速效钾显著正相关。植物叶片与根系的组织密度则体现植物的防御能力,叶组织密度高的植物分配较多氮素提高细胞壁韧性从而防治叶片损伤或失水过多^[52],本研究中叶组织密度与土壤氮含量存在密切相关性。

本研究主要侧重于黑莎草生长指标与土壤因子的相关性方面,在今后的研究中可考虑添加对其它环境因子的研究,如降水量、温度、湿度、日照强度以及日照时长等。

黑莎草叶片表型性状在冬夏季间存在显著差异。叶长、叶宽、叶组织密度和叶绿素表现为夏季

显著大于冬季,根系表型性状与叶片相比季节差异较小,黑莎草根表型性状比叶片更具稳定性,冬季的根系养分含量均高于夏季,养分的分配上叶片养分高于根系养分。叶组织密度与叶绿素显著正相关,与比叶面积显著负相关;根组织密度与比根长和比根面积均显著负相关,叶片和根系养分之间均显著正相关。土壤碳、氮、磷含量是影响黑莎草功能性状主要因子。黑莎草通过调节功能性状指标对环境变化表现出适应性策略,可作为地带性植物引入南方红壤侵蚀区的植被恢复和水土流失治理。

参考文献

- [1] LIU X J, MA K P. Plant functional traits: Concepts, applications and future directions [J]. *Sci Sin Vitae*, 2015, 45(4): 325-339. doi: 10.1360/N052014-00244.
刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325-339. doi: 10.1360/N052014-00244.
- [2] MENG T T, NI J, WANG G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning [J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31(1): 150-165.
孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 150-165.
- [3] REICH P B, WRIGHT I J, CAVENDER-BARES J, et al. The evolution of plant functional variation: Traits, spectra, and strategies [J]. *Int J Plant Sci*, 2003, 164(S3): S143-S164. doi: 10.1086/374368.
- [4] VAN KLEUNEN M, FISCHER M. Constraints on the evolution of adaptive phenotypic plasticity in plants [J]. *New Phytol*, 2005, 166(1): 49-60. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01296.x.
- [5] BLONDER B, BALDWIN B G, ENQUIST B J, et al. Variation and macroevolution in leaf functional traits in the Hawaiian silversword alliance (Asteraceae) [J]. *J Ecol*, 2016, 104(1): 219-228. doi: 10.1111/1365-2745.12497.
- [6] WESTOBY M, WRIGHT I J. Land-plant ecology on the basis of functional traits [J]. *Trends Ecol Evol*, 2006, 21(5): 261-268. doi: 10.1016/j.tree.2006.02.004.
- [7] SHI Y, WEN Z M, GONG S H. Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(22): 6805-6814.
施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [8] MAO W, LI Y L, ZHANG T H, et al. Research advances of plant leaf traits at different ecology scales [J]. *J Desert Res*, 2012, 32(1): 33-41.
毛伟, 李玉霖, 张铜会, 等. 不同尺度生态学中植物叶性状研究概

- 述 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 33–41.
- [9] DING J, WU Q, YAN H, et al. Effects of topographic variations and soil characteristics on plant functional traits in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Biodiv Sci, 2011, 19(2): 158–167. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.10312.
丁佳, 吴茜, 闫慧, 等. 地形和土壤特性对亚热带常绿阔叶林内植物功能性状的影响 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 158–167. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.10312.
- [10] JAGER M M, RICHARDSON S J, BELLINGHAM P J, et al. Soil fertility induces coordinated responses of multiple independent functional traits [J]. J Ecol, 2015, 103(2): 374–385. doi: 10.1111/1365-2745.12366.
- [11] LIU M X, MA J Z. Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of south Gansu, northwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2012, 23(12): 3295–3300. doi: 10.13287/j.1001-9332.2012.0410.
刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3295–3300. doi: 10.13287/j.1001-9332.2012.0410.
- [12] THOMAS J M, ROSE T P. Environmental isotopes in hydrogeology [J]. Environ Geol, 2002, 43(5): 532. doi: 10.1007/s00254-002-0677-x.
- [13] ZHOU Y S, WANG L Q, ZHANG P, et al. Responses of the root architecture of *Stipa grandis* to grassland degradation [J]. Pratac Sci, 2011, 28(11): 1962–1966.
周艳松, 王立群, 张鹏, 等. 大针茅根系构型对草地退化的响应 [J]. 草业科学, 2011, 28(11): 1962–1966.
- [14] CATFORD J A, JANSSON R. Drowned, buried and carried away: Effects of plant traits on the distribution of native and alien species in riparian ecosystems [J]. New Phytol, 2014, 204(1): 19–36. doi: 10.1111/nph.12951.
- [15] ZHANG F, CHEN J W, WANG M B. The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young *Caragana korshinskii* plantation [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(17): 5484–5493. doi: 10.5846/stxb201111041669.
张帆, 陈建文, 王孟本. 幼龄柠条细根的空间分布和季节动态 [J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5484–5493. doi: 10.5846/stxb201111041669.
- [16] FENG Q H, SHI Z M, DONG L L. Response of plant functional traits to environment and its application [J]. Sci Silv Sin, 2008, 44(4): 125–131. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.04.023.
冯艳红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用 [J]. 林业科学, 2008, 44(4): 125–131. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.04.023.
- [17] HE P C, YE Q. Plant functional traits: from individual plant to global scale [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(5): 523–533. doi: 10.11926/jtsb.4108.
贺鹏程, 叶清. 基于植物功能性状的生态学研究进展: 从个体水平到全球尺度 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 523–533. doi: 10.11926/jtsb.4108.
- [18] HU Y Q, KE X D, XU M F, et al. Herbaceous plant in response to understory light regimes in a subtropical forest community [J]. J CS Univ For Technol, 2016, 36(8): 72–76. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.08.014.
胡砚秋, 柯娴氛, 徐明锋, 等. 亚热带森林群落草本植物对林下光环境的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 72–76. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.08.014.
- [19] WANG J. Effect of drought stress on the relationship of biodiversity and ecosystem function [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2006.
王江. 干旱胁迫对生物多样性与生态系统功能关系的影响 [D]. 广州: 中山大学, 2006.
- [20] TU H T. The model of biomass and carbon of shrub and herb under three forest types [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
涂宏涛. 三种森林类型下灌草生物量及碳储量模型 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [21] CHEN Z B, CHEN Z Q, YUE H. Comprehensive Research on Soil and Water Conservation in Granite Red Soil Region [M]. Beijing: Science Press, 2013: 197.
陈志彪, 陈志强, 岳辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究: 以福建省长汀朱溪小流域为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] LI D W, WANG Z Q, TIAN H X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation [J]. Acta Pedol Sin, 2017, 54(1): 160–170. doi: 10.11766/trxb201604140096.
李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160–170. doi: 10.11766/trxb201604140096.
- [23] YAN Q Y, DUAN Z Q, LI X, et al. Effect of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils [J]. Acta Pedol Sin, 2013, 50(4): 752–760. doi: 10.11766/trxb201206280258.
闫秋艳, 段增强, 李汛, 等. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响 [J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 752–760. doi: 10.11766/trxb201206280258.
- [24] GUO R, WEN Z M, WANG H X, et al. Relationships among leaf traits and their expression in different vegetation zones in Yanhe River Basin, northwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2015, 26(12): 3627–3633. doi: 10.13287/j.1001-9332.20151016.016.
郭茹, 温仲明, 王红霞, 等. 延河流域植物叶性状间关系及其在不

- 同植被带的表达 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3627–3633. doi: 10.13287/j.1001-9332.20151016.016.
- [25] ZHANG X, WANG Z N, LU J Y, et al. Responses of leaf traits to drought at different growth stages of alfalfa [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(9): 2669–2676. doi: 10.5846/stxb201406261324.
- 张曦, 王振南, 陆姣云, 等. 紫花苜蓿叶性状对干旱的阶段性响应 [J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2669–2676. doi: 10.5846/stxb201406261324.
- [26] NIKLAS K J, COBB E D, NIINEMETS U, et al. “Diminishing returns” in the scaling of functional leaf traits across and within species groups [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104(21): 8891–8896. doi: 10.1073/pnas.0701135104.
- [27] LUO Z, LIU H, ZHAO W P, et al. Effects of reduced nitrogen rate on cotton yield and nitrogen use efficiency as mediated by application mode or plant density [J]. Field Crops Res, 2018, 218: 150–157. doi: 10.1016/j.fcr.2018.01.003.
- [28] LI D D, TIAN M Y, CAI J, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings [J]. Plant Growth Regul, 2013, 70(3): 257–263. doi: 10.1007/s10725-013-9797-4.
- [29] QI D H, WENG Z M, YANG S S, et al. Trait-based responses and adaptation of *Artemisia sacrorum* to environmental changes [J]. Chin J Appl Ecol, 2015, 26(7): 1921–1927. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150506.016.
- 戚德辉, 温仲明, 杨士梭, 等. 基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1921–1927. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150506.016.
- [30] ZHENG Y. The Spatial and temporal variation of plant leaf and fine root traits in the Yanhe River Catchment, Shaanxi, China [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2014.
- 郑颖. 延河流域植物叶片与细根功能性状的时空变化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [31] XU K, LI F L, GOU S Y, et al. Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(1): 215–225. doi: 10.5846/stxb201011261679.
- 徐琨, 李芳兰, 苟水燕, 等. 岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(1): 215–225. doi: 10.5846/stxb201011261679.
- [32] REN S J, YU G R, TAO B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. Environ Sci, 2007, 28(12): 2665–2673. doi: 10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001.
- 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665–2673. doi: 10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001.
- [33] MA Y Z, ZHONG Q L, JIN B J, et al. Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China [J]. Chin J Plant Ecol, 2015, 39(2): 159–166. doi: 10.17521/cjpe.2015.0015.
- 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 等. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 159–166. doi: 10.17521/cjpe.2015.0015.
- [34] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. Adv Ecol Re, 1999, 30: 1–67. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60016-1.
- [35] ZHANG H W, MA J Y, SUN W, et al. Altitudinal variation in functional traits of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* and their relationship to soil factors in Tianshan Mountains, northwest China [J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(21): 5747–5758.
- 张慧文, 马剑英, 孙伟, 等. 不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5747–5758.
- [36] ZHOU P, GENG Y, MA W H, et al. Linkages of functional traits among plant organs in the dominant species of the Inner Mongolia grassland, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2010, 34(1): 7–16. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.003.
- 周鹏, 耿燕, 马文红, 等. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 7–16. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.003.
- [37] XIANG L, CHEN F Q, GENG M Y, et al. Response of leaf functional traits of shrubs to altitude in *Rhododendron latoucheae* communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- 向琳, 陈芳清, 耿梦娅, 等. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- [38] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428(6985): 821–827. doi: 10.1038/nature02403.
- [39] CHEN Z Q, CHEN Z B, BAI L Y. Growth Characteristics and Ecological Restoration Effects of *Dicranopteris dichotoma* in the Eroded Red Soil Area of South China [M]. Beijing: Science Press, 2018: 33–37.
- 陈志强, 陈志彪, 白丽月. 南方红壤侵蚀区芒萁的生长特征与生态恢复效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 33–37.
- [40] WANG J Z. Functional traits of the leaves and roots of *Dicranopteris dichotoma* and their relationship with soil factors under different ages of erosion restoration in Southeast China [D]. Fuzhou: Fujian Normal

- University, 2019. doi: 10.27019/d.cnki.gfjsu.2019.001294.
- 王敬哲. 南方红壤侵蚀区不同治理年限下芒萁叶片与根系功能性状及其与土壤因子的关系 [D]. 福州: 福建师范大学, 2019. doi: 10.27019/d.cnki.gfjsu.2019.001294.
- [41] HU Y S, YAO X Y, LIU Y H. Specific leaf area and its influencing factors of forests at different succession stages in Changbai Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(5): 1480–1487. doi: 10.5846/stxb201310132459.
- 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段比叶面积及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1480–1487. doi: 10.5846/stxb201310132459.
- [42] ZHANG L, LUO T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, 28(6): 844–852.
- 张林, 罗天祥. 植物叶寿命及其相关性性状的生态学研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 844–852.
- [43] KRAMER-WALTER K R, BELLINGHAM P J, MILLAR T R, et al. Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum [J]. *J Ecol*, 2016, 104(5): 1299–1310. doi: 10.1111/1365-2745.12562.
- [44] YESTE A, BLANCO J A, IMBERT J B, et al. *Pinus sylvestris* L. and *Fagus sylvatica* L. effects on soil and root properties and their interactions in a mixed forest on the southwestern Pyrenees [J]. *For Ecol Manag*, 2021, 481(4): 118726. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118726.
- [45] XING S L, DING Y, HUANG W J. *Core Theory of Botany and Research on Protection and Utilization* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018: 58–65.
- 邢顺林, 丁燕, 黄文娟. 植物学核心理论及其保护与利用研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 58–65.
- [46] YAO T T, MENG T T, NI J, et al. Leaf functional trait variation and its relationship with plant phylogenetic background and the climate in Xinjiang Junggar Basin, NW China [J]. *Biodiv Sci*, 2010, 18(2): 188–197.
- 尧婷婷, 孟婷婷, 倪健, 等. 新疆准噶尔荒漠植物叶片功能性状的进化和环境驱动机制初探 [J]. *生物多样性*, 2010, 18(2): 188–197.
- [47] BRADLEY R L, TITUS B D, PRESTON C M, et al. Improvement of nutritional site quality 13 years after single application of fertiliser N and P on regenerating cedar-hemlock cutovers on northern Vancouver Island, B.C. [J]. *Plant Soil*, 2000, 223(1/2): 197–208. doi: 10.1023/A:1004896116130.
- [48] HUANG X, YAO L, WANG J, et al. Effect of soil nutrients on leaf functional traits of different life form plants [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2018, 38(12): 2293–2302. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.12.2293.
- 黄小, 姚兰, 王进, 等. 土壤养分对不同生活型植物叶功能性状的影响 [J]. *西北植物学报*, 2018, 38(12): 2293–2302. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.12.2293.
- [49] WRIGHT I J, WESTOBY M, REICH P B. Convergence towards higher leaf mass per area in dry and nutrient-poor habitats has different consequences for leaf life span [J]. *J Ecol*, 2002, 90(3): 534–543. doi: 10.1046/j.1365-2745.2002.00689.x.
- [50] WESTOBY M, FALSTER D S, MOLES A T, et al. Plant ecological strategies: Some leading dimensions of variation between species [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 2002, 33: 125–159. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452.
- [51] FONSECA C R, OVERTON J M, COLLINS B, et al. Shifts in trait: Combinations along rainfall and phosphorus gradients [J]. *J Ecol*, 2000, 88(6): 964–977. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00506.x.
- [52] TURNER I M. Sclerophylly: Primarily protective? [J]. *Funct Ecol*, 1994, 8(6): 669–675. doi: 10.2307/2390225.