

DOI: 10.5846/stxb201806151343

王楚楚, 钟全林, 程栋梁, 余华, 徐朝斌. 引种期同质园翅荚木主要叶功能性状与种源地环境关系. 生态学报, 2019, 39(13): - .

Wang C C, Zhong Q L, Cheng D L, Yu H, Xu C B. Relationship between the leaf functional traits of *Zenia insignis* and the provenance environments in common gardens during the introduction period. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

引种期同质园翅荚木主要叶功能性状与种源地环境关系

王楚楚^{1,2}, 钟全林^{1,2,3,*}, 程栋梁^{1,2,3}, 余 华^{1,2}, 徐朝斌^{1,2}

1 福建师范大学福建省植物生理生态重点实验室, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

3 福建师范大学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:从比叶面积(SLA)、叶片相对含水量(LRWC)、叶组织密度(LTD)、叶片干物质含量(LDMC)、叶片碳(C)氮(N)磷(P)含量及其化学计量比等方面对在引种期同质园的广西桂林市(GGL)、广西靖西市(GJX)、湖南江华县(HJH)、湖南通道市县(HTD)、广东英德市(GYD)等 5 翅荚木种源叶片主要功能性状进行差异分析及相关性分析,并研究翅荚木叶功能性状与种源地环境因子的关系。结果显示,(1)不同种源间叶片 C、N 含量及 C/N 差异显著,5 种源间叶片 C 含量 GYD 最高、GGL 最低,N 含量 GJX 最高、GYD 最低,C/N 为 GYD 最高、GJX 最低。(2)比叶面积与叶组织密度呈显著负相关;叶片 N 含量与 C/N 和 C/P 呈显著负相关,与 N/P 呈显著正相关;C/P 与 P 含量呈显著负相关,与 C/N 呈显著正相关;C/N 与 N/P 呈显著负相关。(3)翅荚木叶功能性状主要受七月均温、年均温和相对湿度等地理环境因子影响。七月均温与 C/P、比叶面积呈正相关,与叶片 N 含量、叶片干物质含量、叶组织密度呈负相关;年均温与 C/N 呈正相关,与 N/P 呈负相关;相对湿度与叶片 P 含量、叶组织密度呈正相关,与 C/P、比叶面积呈负相关。研究结果有助于理解翅荚木对引种区的环境适应特征及其在引种期的生长与生存策略,对探究翅荚木的营养利用策略、揭示其对环境变化的响应机制等具有重要意义,并为相关部门选择适宜的翅荚木引种栽培种源及开展其优良种源的遗传改良等提供理论指导与决策参考。

关键词:叶功能性状;种源地环境;冗余分析;引种期同质园;翅荚木

Relationship between the leaf functional traits of *Zenia insignis* and the provenance environments in common gardens during the introduction period

WANG Chuchu^{1,2}, ZHONG Quanlin^{1,2,3,*}, CHENG Dongliang^{1,2,3}, YU Hua^{1,2}, XU Chaobin^{1,2}

1 Fujian Provincial Key Laboratory for Plant Eco-physiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: The specific leaf area(SLA), leaf relative water content(LRWC), leaf tissue density(LTD), leaf dry matter content(LDMC), the leaf carbon(C), nitrogen(N), and phosphorus(P) content and their stoichiometric ratios were the selected functional traits of *Zenia insignis*. We analyzed the differences and their correlations of the functional traits among five provenances including Guilin City, Guangxi(GGL), Jingxi City, Guangxi(GJX), Jianghua County, Hunan(HJH),

基金项目:国家自然科学基金项目(31170596, 31170374, 31370589);中央财政林业科技推广项目(2015-12);国家重点研发计划(2017YFC0505400);福建省种业创新和产业化工程项目(2014S1477-4);福建省科技厅重大项目(2014N5008);福建省自然科学基金项目(2018J01479)

收稿日期:2018-06-15; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qlzhong@126.com

Tongdao County, Hunan (HTD) and Yingde City, Guangdong (GYD) in common gardens during the introduction period, in order to understand the relationship between leaf functional traits and environmental factors of provenances. The results were as follows: (1) the leaf C, N content and C/N differed significantly among seedlings from different provenances. the leaf C content in GYD was the highest, but the lowest in GGL. the leaf N content in GJX was the highest and the lowest in GYD. The C/N in GYD was the highest and the lowest in GJX. (2) there was a significant negative correlation between SLA and LTD. There were negative correlations between N and C/N, C/P, but positively with N/P. The C/P were negatively correlated with P, but positively with C/N, whereas the C/N were negatively correlated with N/P. (3) the leaf traits of *Zenia insignis* were mainly affected by environmental factors, such as July temperature, mean annual temperature, and relative humidity. The July temperature showed a positive correlation with C/P and SLA, but negative with N, LDMC and LTD. Mean annual temperature demonstrated a positive correlation with C/N, but negative with N/P. Relative humidity showed a positive correlation with P and LTD, but negative with C/P and SLA. The results facilitated a better understanding of the adaptations of *Zenia insignis* to the introduction environment and the growth and survival strategies during the introduction period. It played a vital role in the nutrient utilization strategies of *Zenia insignis* and revealed the response mechanism of plants to the environmental changes. It also provided theoretical guidance and decision reference for the forestry departments to carry out excellent provenance selection and genetic improvement during the introduction period.

Key Words: leaf function trait; provenance environment; redundancy analysis; common garden during introduction period; *Zenia insignis*

植物叶片作为进行光合作用的主要构件^[1],其主要功能性状如比叶面积(SLA, Specific leaf area)、叶片相对含水量(LRWC, Leaf relative water content)、叶组织密度(LTD, Leaf tissue density)、叶片干物质含量(LDMC, Leaf dry matter content)、叶片碳(C, Leaf C content)、氮(N, Leaf N content)磷(P, Leaf P content)含量及其化学计量比等与植物的养分利用密切相关^[2],反映了植物响应与适应环境变化的生长与生存策略^[2-4]。在全球范围内,植物叶功能性状在不同生境和不同物种之间差异变化很大^[5],同种植物其叶片性状在不同环境中也表现着较大的差异。了解植物叶片主要功能性状特征及其之间的关系,分析并筛选出对其影响的主要环境因子,将有助于理解植物在生长过程中对资源的分配、利用及其对环境变化的响应和适应机制,并为林业部门开展林木优良种源选择、选取适宜的造林与引种区环境等提供理论支持^[6]。

植物对不断变化的环境的应对策略一直是生态学研究的核心方向。目前,国内外对植物叶性状的研究主要体现在某一种或几种植被类型的若干个主要性状的深度剖析^[7-9],干旱胁迫、人为控制(不同耕作方式)等因素对叶性状的影响^[10-11]、外来物种与本地物种叶性状差异^[12]以及从全球尺度、区域多物种尺度研究叶性状与环境因子的关系^[13-15]等方面。大量研究表明,物种间叶功能性状存在差异,种内变异^[16-17]同样不可忽视,但目前对种内种源间叶功能性状变异研究相对较少。因此,可通过研究不同种源的单一物种的种内性状变异,探讨物种对环境梯度变化的响应与适应策略。

翅荚木(*Zenia insignis*)为苏木科乔木落叶树种,主要分布于粤、黔、湘、滇、桂等省。其适应性强,生长迅速,是工业原料树种,又是能源树种,具有广泛的生产利用价值,野生资源已濒危灭绝^[18]。因此,近年对其研究越来越多,研究内容主要集中在翅荚木育苗栽培^[18-20]、植物修复^[21]、抗寒性^[22]、净光合速率^[23]等方面,但有关翅荚木叶功能性状方面研究目前还未见相关文献报道。为此,本研究基于引种在福建省顺昌县同质园内的苗木来自于省外5种源地的7年生(即引种期6年)翅荚木叶片,从比叶面积、叶片相对含水量、叶组织密度、叶片干物质含量、叶片碳氮磷含量及其化学计量比等方面对其叶片主要功能性状进行差异分析及相关性分析,并分析其叶片主要功能性状与种源地环境因子的关系,以期解决以下几个问题:(1)同质园内翅荚木不同种源间叶片主要功能性状是否存在差异?(2)其叶片主要功能性状之间存在何种关系?(3)叶片主要功能性状是否受种源地环境影响?研究结果有助于理解翅荚木对引种区的环境适应特征及其在引种期的生长与

生存策略,对探究翅荚木的养分利用策略、揭示其对环境变化的响应机制等具有重要意义,并为相关部门选择适宜的翅荚木引种栽培种源及开展其优良种源的遗传改良等提供理论指导与决策参考。

1 材料与方法

1.1 引种期同质园概况

引种的同质园位于福建省南平市顺昌县(117.64°E,26.72°N),海拔 550 m,属中亚热带海洋性季风气候,气候温暖,阳光充足,雨量充沛。年平均气温为 18.9℃,最冷月 1 月份平均气温 7.9℃,最热月 7 月份平均气温 28.1℃。年平均降水量一般在 1600—1900 mm 之间,降水多集中在 2—9 月。全年平均无霜期为 305 d,年平均日照时数约 1740.7 h。造林地立地条件为Ⅱ类地,土壤为红壤,0—40 cm 深度的土壤平均 pH 值及全氮与全磷含量分别为 5.8、1.279 mg/g 和 0.318 mg/g。

1.2 材料和方法

2009 年春利用来自广西桂林市、广西靖西市、湖南江华县、湖南通道县、广东英德市的 5 种源地的 1 年生翅荚木实生苗进行同质园引种造林试验,各苗木种源地基本情况见表 1,其中气候数据来源于所在气象台站,部分来源于国家气象局数据中心。造林株行距为 1.8 m×1.8 m。采用炼山、块状整地、挖明穴方式造林,造林当年和次年分别进行了 1 次抚育。

表 1 翅荚木 5 种源地的地理位置与气候因子^[24]

Table 1 The geographic and climatic conditions of the origins of 5 provenances of <i>Zenia insignis</i>												
种源地 Provenance	地理坐标		海拔	年均温	七月均温	一月均温	>10℃年 积温	生长季 均温	年均降水量	无霜期	生长季 降水量	相对湿度
	Geographical coordinates		Altitude	Mean	July	January	>10℃	Growing	Mean	Frost-free	Growing	Relative
	/°E /°N		/m	annual	annual	annual	>10℃	season	annual	season/d	season	humidity/%
				temperature /℃	temperature /℃	temperature /℃	Annual accumulated temperature /℃	average temperature /℃	precipitation /mm		precipitation /mm	
广西桂林市 GGL	110.31	25.3	169	18.9	28.2	8.1	5900	23.1	1515	309	1604	75
广西靖西市 GJX	106.08	22.59	931	19.3	25.2	11.5	6860	22.4	1631	330	1488	79
湖南江华县 HJH	112.25	24.38	642	16.2	28.3	7.4	5539	22.9	1700	308	1174	77
湖南通道县 HTD	109.77	26.16	397	16.3	26.3	5.4	5256	20.8	1480	280	1223	82
广东英德市 GYD	113.38	24.17	537	20.8	29	11.6	7576	24.8	1875	353	1593	76

GGL:广西桂林市 Guilin City,Guangxi;GJX:广西靖西市 Jingxi City,Guangxi;HJH:湖南江华县 Jianghua County,Hunan;HTD:湖南通道县 Tongdao County,Hunan;GYD:广东英德市 Yingde City,Guangdong

2015 年 7 月 23—25 日对同质园分别典型设置 3 个 10 m×10 m 的调查样方,对样方内林木进行每木调查。其中,调查时 GGL、GJX、HJH、HTD 和 GYD 5 个种源翅荚木的立木保留密度分别为 (1338±120)、(716±67)、(1069±104)、(750±66) 株/hm²和 (1367±129) 株/hm²,平均胸径分别为 (12.75±0.04)、(14.55±0.04)、(15.90±0.07)、(12.15±0.07) cm 和 (14.15±0.04) cm,树高分别为 (12.65±1.00)、(10.40±2.94)、(17.40±1.76)、(13.70±0.11) m 和 (17.8±2.37) m。

对每个样方典型选取 3 株接近林分平均胸径的样木,分别东、南、西、北 4 个方向,采用人工攀爬方式截取冠层中部外圈枝条,全部摘取枝条上健康完整的叶片。分别样方将其混合,并测定其叶面积、叶鲜重、饱和鲜重、叶干重和叶片 C、N、P 含量等叶片性状指标,每种源各有 3 次重复。测定方法如下:

(1) 叶片主要形态性状指标的测定:选择长势良好、无病虫害的完整的新鲜叶片,用便携式叶面积仪(LI-3000c,美国)测定其叶面积。用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺在叶片非叶脉的前、中、末端分别测量叶片厚

度,取平均值作为叶厚度。用电子天平称量叶鲜量,精确到 0.01 g,然后将叶片放入装满水的自封袋中 24 h 后取出,用吸水纸巾擦去表面的水分,在电子天平上称量饱和鲜重,将叶片放入 70℃ 烘箱内烘干至恒重后,称量干重。

(2) 叶片 C、N、P 养分含量的测定:将以上测定完的叶片及剩余叶片(为了满足养分测定所采的样品)进行烘干,粉碎,过孔径为 0.149 mm 的 100 目筛,利用 CHNOS 元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III,德国)进行植物叶片 C、N 含量测定,采用($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮)钼锑抗比色法测定 P 含量。比叶面积、叶片相对含水量和叶组织密度计算公式如下:

比叶面积(SLA, cm^2/g) = 叶面积/叶干重

叶片相对含水量(LRWC, %) = (叶鲜重-叶干重)/(叶饱和鲜重-叶干重) × 100%

叶组织密度(LTD, g/cm^3) = 叶干重/叶体积, 叶体积 = 叶面积 × 叶厚度

叶片干物质含量(LDMC, g/g) = 叶干重/叶饱和鲜重

1.3 数据处理

所有数据统计分析和作图均利用 SPSS 19.0、Canoco 4.5 软件和 Excel 2003 完成。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)法分析 5 个种源间各性状差异显著性,并用最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,并用 pearson 相关系数检验翅荚木各叶功能性状之间的相关性;利用冗余分析(RDA)法分析种源地环境因子对翅荚木叶功能性状的影响。文中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同种源翅荚木叶功能性状差异比较

单因素方差分析结果表明,不同种源翅荚木叶片 C、N 含量及 C/N 存在明显的差异性($P < 0.05$, 表 2)。其中,叶片 C 含量以 GYD 种源为最高, GGL 种源最低;叶片 N 含量以 GJX 为最高, GYD 最低;叶片 C/N 以 GYD 为最大, GJX 最小。不同种源翅荚木的比叶面积、叶片相对含水量、叶组织密度、叶片干物质含量和叶片 P 含量及 C/P、N/P 等差异不显著。

表 2 不同种源翅荚木叶功能性状差异

Table 2 Differences of leaf functional traits of *Zenia insignis* from different provenances

种源地 Provenance	广西桂林市 GGL	广西靖西市 GJX	湖南江华县 HJH	湖南通道县 HTD	广东英德市 GYD
比叶面积 Specific leaf area/(cm^2/g)	214.45 ± 14.12a	201.07 ± 114.10a	275.29 ± 34.54a	197.19 ± 80.14a	245.68 ± 52.60a
叶片相对含水量 Leaf relative water content/%	91.26 ± 7.00a	79.05 ± 13.91a	87.45 ± 8.02a	77.87 ± 1.13a	65.96 ± 21.95a
叶组织密度 Leaf tissue density/(g/cm^3)	0.11 ± 0.01a	0.14 ± 0.08a	0.09 ± 0.01a	0.13 ± 0.05a	0.10 ± 0.02a
叶片干物质含量 Leaf dry matter content/(g/g)	0.23 ± 0.01a	0.27 ± 0.12a	0.19 ± 0.05a	0.20 ± 0.05a	0.21 ± 0.03a
叶片 C 含量 Leaf C content/(mg/g)	454.00 ± 7.60b	463.27 ± 2.77a	457.74 ± 2.97b	466.59 ± 5.75a	474.37 ± 3.66a
叶片 N 含量 Leaf N content/(mg/g)	27.31 ± 2.88b	34.64 ± 0.18a	31.33 ± 3.39a	32.82 ± 1.92a	25.36 ± 2.88b
叶片 P 含量 Leaf P content/(mg/g)	1.21 ± 0.15a	1.35 ± 0.01a	1.30 ± 0.11a	1.43 ± 0.09a	1.29 ± 0.04a
叶片 CN 比 Leaf C/N	16.74 ± 1.64a	13.37 ± 0.01b	14.73 ± 1.58b	14.25 ± 0.90b	18.82 ± 1.99a
叶片 CP 比 Leaf C/P	377.69 ± 43.53a	344.44 ± 0.25a	353.49 ± 25.51a	327.90 ± 20.68a	367.88 ± 9.26a
叶片 NP 比 Leaf N/P	22.54 ± 0.42a	25.75 ± 0.01a	24.16 ± 2.85a	23.12 ± 2.79a	19.63 ± 1.58a

同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$);相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)

2.2 翅荚木叶片各功能性状间的相关性

对不同种源翅荚木叶功能性状进行相关性分析,由表 3 可以看出,比叶面积与叶组织密度呈极显著的相关性($P < 0.01$),且表现为负相关;叶片 N 含量与 C/N 存在极显著的负相关,与 N/P 存在极显著的正相关,与

C/P 存在显著的负相关($P<0.05$);C/P 与 P 含量呈极显著负相关,与 C/N 呈显著正相关;C/N 与 N/P 呈极显著负相关。

表 3 翅荚木叶功能性状间的相关性系数
Table 3 Correlation coefficients among leaf functional traits of *Zenia insignis*

叶功能性状指标 leaf functional trait indexes	比叶面积 Specific leaf area	叶片相对 含水量 Leaf relative water content	叶组织 密度 Leaf tissue density	叶片干 物质含量 Leaf dry matter content	叶片 C 含量 Leaf C content	叶片 N 含量 Leaf N content	叶片 P 含量 Leaf P content	叶片 CN 比 Leaf C/N	叶片 CP 比 Leaf C/P
叶片相对含水量 Leaf relative water content	-0.250								
叶组织密度 Leaf tissue density	-0.973 **	0.278							
叶片干物质含量 Leaf dry matter content	-0.317	-0.060	0.183						
叶片 C 含量 Leaf C content	0.134	-0.319	-0.070	-0.447					
叶片 N 含量 Leaf N content	-0.355	0.009	0.417	0.003	-0.069				
叶片 P 含量 Leaf P content	-0.099	-0.204	0.159	-0.556	0.555	0.555			
叶片 CN 比 Leaf C/N	0.335	-0.087	-0.389	0.001	0.181	-0.986 **	-0.515		
叶片 CP 比 Leaf C/P	0.125	0.127	-0.188	0.494	-0.449	-0.648 *	-0.986 **	0.619 *	
叶片 NP 比 Leaf N/P	-0.331	0.165	0.351	0.437	-0.534	0.748 **	-0.135	-0.767 **	0.015

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$

2.3 翅荚木叶功能性状与种源地环境因子的关系

在进行冗余分析之前,先对叶功能性状进行去趋势对应分析(DCA),确定其属于基于单峰模型排序分析还是基于线性模型排序分析。结果显示,最大排序轴长为 $0.056<3$,以基于线性模型排序分析的 RDA 方法较适合于本研究。因此,本研究以种源地环境因子为解释变量,以叶功能性状为响应变量,通过 RDA 分析不同种源下叶功能性状对各种源地环境因子的响应关系。考虑到并不是所有的解释变量对于响应变量的解释都有显著贡献,本文采用逐步迭代的分析方法筛选出对叶功能性状有显著解释性的环境因子。经计算,影响翅荚木主要叶功能性状的种源地环境因子主要为:七月均温、年均温与相对湿度。

结果显示(图 1),第 1 排序轴解释全部叶功能性状变化的 54.1%,第二排序轴解释全部叶功能性状变化的 29.6%,前两个排序轴很好地反映了叶功能性状与种源地环境因子的相关性。七月均温和年均温与第 1 排序轴呈正相关,且七月均温相关性大于年均温;相对湿度与第 1 排序轴呈负相关。指示环境因子的箭头与指示叶功能性状的箭头之间夹角的余弦值表示两者之间的相关程度。经过蒙特卡罗检验可以看出七月均温与 C/P、比叶面积呈正相关,与叶片 N 含量、叶片干物质含量、叶组织密度呈负相关;年均温与 C/N 呈正相关,与 N/P 呈负相关;相对湿度与叶片 P 含量、叶组织密度呈正相关,与 C/P、比叶面积呈负相关。

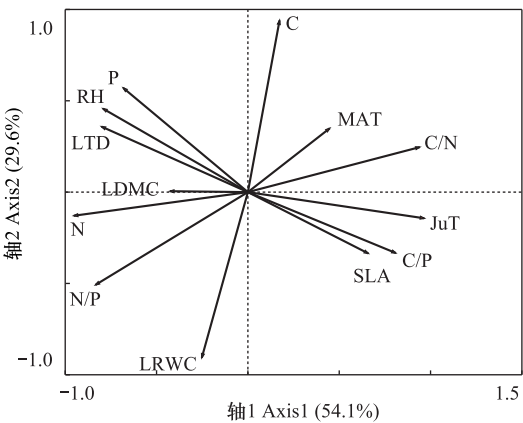


图 1 翅荚木叶功能性状与种源地环境因子的 RDA 排序
Fig.1 Redundancy analysis ordination of leaf functional traits of *Zenia insignis* and geographic environmental factors
RH: 相对湿度, Relative humidity; MAT: 年均温, Mean annual temperature; JuT: 七月均温, July annual temperature

3 讨论

3.1 不同种源间的主要叶功能性状的表现特征

翅荚木种群分布区域广泛,种源地立地与气候环境差异必然会导致种群在生理生态特性方面的分化,形成不同的地理种源。但引种区的立地与气候环境对其性状也有重要影响。本研究结果显示,5种源地翅荚木的比叶面积、叶片相对含水量、叶组织密度、叶片干物质含量等叶功能性状差异不显著,原因可能是这些叶形态性状指标主要受引种期同质园的立地与气候环境影响,表现出翅荚木叶形态性状对新的引种区环境具有较强的适应性。

不同种源翅荚木叶片 C、N 含量及 C/N 存在差异显著,说明其主要叶片养分性状可能主要受长期的种源地环境影响,这一结果与大部分研究结果一致^[4,25]。C 是植物结构性物质,是植物体内的主要元素之一,其主要以碳水化合物的形式存在,并为植物叶片光合作用提供所需的能量,因此较高的叶片 C 含量更有利于其有机物合成和能量获取。叶片 N 含量直接决定了叶片的光合能力,N 含量越高,越有利于其进行光合作用^[4]。叶片的 C/N 反映植物吸收营养所能同化 C 的能力,并且在一定程度上还反映了植物的养分利用效率,具有重要的生态学意义。在本次引种的 5 种源翅荚木中,叶片 C 含量及 C/N 均以 GYD 种源为最高,说明该种源具有较高的养分利用效率与 C 同化效率,较适合于本引种区栽培;叶片 N 含量以 GJX 种源为最高,考虑到该树种本身为固 N 树种及同质园试验地生物生长量并不表现为最优的实际状况,说明该种源可能具有相对较强的生物固 N 能力。P 对植物光合速率和蛋白质的合成产生重要影响,在植物叶片可利用有效 P 减少时,会引起其光合速率下降^[26]。但本研究发现在引种期,同质园内 5 种源翅荚木叶片 P 含量差异不明显,分析原因可能是其叶片 P 主要来源于土壤中的有效 P,而同质园内的土壤有效 P 含量基本一致。

另外,与全球尺度的数据相比,本研究中翅荚木叶片 C/N 低于全球尺度^[27]的 C/N (22.5 ± 10.6 , $n = 398$),而 C/P 和 N/P 高于全球尺度的 C/P (232 ± 145 , $n = 406$) 和 N/P (12.7 ± 6.82 , $n = 325$),主要原因可能是由于该树种本身具有生物固 N 能力,且所在的引种区为 P 缺乏区域,造成 N 含量偏高,P 含量偏低。有研究表明,植物生长受 N 和 P 限制的 N/P 阈值为 14 和 16,即当 $N/P < 14$ 时,群落水平上的植物生长主要受 N 限制; $N/P > 16$ 时,植物生长主要受 P 限制; N/P 在 14 到 16 之间时,受 N、P 的共同限制^[28]。本研究中叶片 N/P 均值最小为 (19.634 ± 1.584) 大于 16,综合判断翅荚木在该引种区主要受 P 限制,因此,在引种翅荚木时,还需结合考虑其对低磷环境适应特征,选取 P 利用效率较高的种源进行引种。

3.2 主要叶功能性状间关系

植物各功能性状不是独立发挥作用的,各性状间存在一定的相关性^[29],揭示各性状间的关联性,有助于了解植物生长、生存策略。比叶面积反映植物对不同生长环境的适应特征和获取外界资源的能力,包括碳摄取策略^[26]和水分利用策略,叶组织密度与植物水分维持策略和抵抗外界伤害的能力有关^[7],两者均反映植物对水分的维持策略。本研究中,比叶面积与叶组织密度存在极显著的负相关,与戚德辉、郑颖、郭茹等^[30-32]人研究一致,反映了翅荚木通过两者之间的平衡形成对不同水分环境的应对策略。

叶片 C 含量与 C/N、C/P、N/P 之间无显著相关性,叶片 N 含量与 C/N 存在极显著的负相关,叶片 P 含量与 C/P 存在极显著的负相关,可以认为翅荚木叶片 C 含量相对较稳定且满足自身需求。叶片 N 含量与 C/P 呈负相关,C/P 与 C/N 呈正相关,这一结果与姜沛沛、张珂等^[8,28]对植物叶片化学计量比的研究结论一致,表明翅荚木对 N、P 的需求在一定程度上具有一致性。但由于翅荚木根系带有根瘤菌,自身具有固 N 的功能,导致 N 元素对不同营养元素的响应程度不同。

3.3 叶功能性状与种源地环境因子的关系

植物的生长、生存不仅取决于自身的生理特性,且与种源地地理环境因子有显著的相关性。RDA 分析表明,翅荚木叶功能性状与种源地七月均温、年均温和相对湿度等环境因子具有相关性,可以认为翅荚木叶功能性状主要受温度和水分的影

的叶片干物质含量与降水联系更密切的结论矛盾,可能是由于本研究区 5 个种源地均属于亚热带季风性湿润气候,降水较为充足,导致翅荚木对水分的响应不显著,故本研究影响叶片干物质含量的主导环境因素是温度。相对湿度与叶组织密度呈正相关,与比叶面积呈负相关,这与龚时慧等^[34]的研究一致,在水分充足的 5 个种源地,翅荚木叶组织密度较大,比叶面积较小。并且,本研究翅荚木叶组织密度和比叶面积与七月均温密切相关,表明通过温度影响相对湿度,进而决定叶组织密度和比叶面积的变化。

植物叶片养分中 C 相对稳定, N、P 受环境影响较大,且 N/P 反映两者养分在植物体内的供给状况。本研究中,七月均温与 C/P 呈正相关,与 N 含量呈负相关,年均温与 C/N 正相关,表明随着温度的降低,植物体内酶的活动减弱,生长代谢缓慢, N、P 在植物体内累积,导致叶片 N、P 含量增加,与郭超等^[35]在中国不同海岛和 Reich 等^[36]在全球范围内的研究结果一致,也进一步说明 N、P 在翅荚木体内变化的一致性。年均温与 N/P 呈负相关,这与 Reich 等^[36]、Kerkhoff 等^[37]基于全球尺度叶片 N/P 随着纬度的增加即温度的降低而降低的结论不一致,原因可能是翅荚木在其生长过程中主要受 P 的限制,表现出对低磷环境的适应特征, P 的消耗比 N 少。相对湿度与叶片 P 含量呈正相关,与 C/P 呈负相关,表明翅荚木叶片养分不仅受温度的影响,同时还受水分的作用。

在本研究中,来自 5 种源地的翅荚木,在引种期同质园中,经过 6 年的生长,其不同种源间叶片 C、N 含量及 C/N 差异显著,其他叶性状差异不显著。各叶功能性状指标间存在一定的相关性,但大部分指标间相关性不显著。种源地 7 月均温、年均温及相对湿度等环境因子对其叶功能性状具有显著影响(除叶片 C 含量和 LRWC 因子外)。不同种源翅荚木对引种区环境响应与适应程度不同,本引种区较适合引种 GYD 种源。由于引种时未收集种源地土壤养分等环境因子数据,本文未对这些环境数据进行分析,可能会对研究的结果产生偏差,另外,本文仅对引种 6 年的种源进行分析,可能随着其持续的生长,各种源对引种区环境的响应与适应特征会发生变化,因此,今后还需在这方面作进一步的跟踪研究。

参考文献(References):

- [1] Vendramini F, Díaz S, Gurvich D E, Wilson P J, Thompson K, Hodgson J G. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 147-157.
- [2] Roa-Fuentes L L, Templer P H, Campo J. Effects of precipitation regime and soil nitrogen on leaf traits in seasonally dry tropical forests of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Oecologia*, 2015, 179(2): 585-597.
- [3] Maire V, Wright I J, Prentice I C, Batjes N H, Bhaskar R, van Bodegom P M, Cornwell W K, Ellsworth D, Niinemets Ü, Ordóñez A, Reich P B, Santiago L S. Global effects of soil and climate on leaf photosynthetic traits and rates. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(6): 706-717.
- [4] 徐朝斌, 钟全林, 程栋梁, 胡松竹, 胡波, 伍伯妍, 孙晓媚, 张佩生. 基于地理种源的刨花楠苗木比叶面积与叶片化学计量学关系. *生态学报*, 2015, 35(19): 6507-6515.
- [5] Milla R, Rith P B. The scaling of leaf area and mass: the cost of light interception increases with leaf size. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 274(1622): 2109-2115.
- [6] 郑颖, 温仲明, 宋光, 丁曼. 延河流域森林草原区不同植物功能型适应策略及功能型物种数量随退耕年限的变化. *生态学报*, 2015, 35(17): 5834-5845.
- [7] 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. *生态学报*, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [8] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 365-372.
- [9] 熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 卢正立, 陈光水, 杨玉盛. 亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征. *生态学报*, 2012, 32(6): 1888-1897.
- [10] 季杨, 张新全, 彭燕, 梁小玉, 黄琳凯, 陈灵鹭, 李州, 马迎梅. 干旱胁迫对鸭茅幼苗根系生长及光合特性的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2763-2769.
- [11] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 谢军红. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响. *生态学报*, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [12] Wang C Y, Liu J, Zhou J W, Xiao H G. Differences in leaf functional traits between exotic and native Compositae plant species. *Journal of Central South University*, 2017, 24(10): 2468-2474.
- [13] Pieter D F, Bente J G, Francisco R S, Annette K, Olivier C, et al. Latitudinal gradients as natural laboratories to infer species responses to temperature. *Journal of Ecology*, 2013, 101: 784-795.

- [14] 道日娜, 宋彦涛, 乌云娜, 霍光伟, 王晓朦, 徐志超. 克氏针茅草原植物叶片性状对放牧强度的响应. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2231-2238.
- [15] 黄端, 王冬梅, 任远, 贾云斌, 吴林川. 漓江水陆交错带植物叶性状对水淹胁迫的响应及经济谱分析. 生态学报, 2017, 37(3): 750-759.
- [16] Fajardo A, Siefert A. Phenological variation of leaf functional traits within species. *Oecologia*, 2016, 180(4): 951-959.
- [17] 郭卫红, 王华, 虞木奎, 吴统贵, 韩有志. 沿海地区水杉叶片性状的纬度变化机制. 应用生态学报, 2017, 28(3): 772-778.
- [18] 詹永亮. 翅荚木轻基质秋季育苗技术研究. 林业勘察设计, 2013, (2): 128-131.
- [19] 童方平, 龚树立, 邓德明, 李贵, 刘振华, 童琪. 翅荚木优质苗木培育技术. 湖南林业科技, 2012, 39(1): 89-90, 98-98.
- [20] 成诗敦. 优良速生用材、薪炭树种——翅荚木引种试验初报. 林业科技通讯, 1986, (7): 19-20.
- [21] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响. 环境科学, 2014, 35(8): 3142-3148.
- [22] 何小勇, 柳新红, 袁德义, 谭晓风, 赵思东, 张琳, 魏来. 不同种源翅荚木的抗寒性. 林业科学, 2007, 43(4): 24-30.
- [23] 龙应忠, 童方平, 宋庆安, 易霁琴, 李贵. 影响翅荚木种源苗期净光合速率的生理生态因子研究. 中国农学通报, 2007, 23(12): 158-163.
- [24] 柳新红, 何小勇, 袁德义. 中国翅荚木. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [25] 余华, 钟全林, 黄云波, 程栋梁, 裴盼, 张中瑞, 徐朝斌, 郑文婷. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系. 应用生态学报, 2018, 29(2): 449-458.
- [26] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原不同退耕年限坡地植物比叶面积与养分含量的关系. 生态学报, 2008, 28(6): 2526-2535.
- [27] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [28] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [29] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 黄婷, 杨改河, 郝文芳. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系. 应用生态学报, 2017, 28(1): 28-36.
- [30] 戚德辉, 温仲明, 杨士梭, 王红霞, 郭茹. 基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1921-1927.
- [31] 郑颖, 温仲明, 宋光, 丁曼. 环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响. 生态学报, 2014, 34(10): 2682-2692.
- [32] 郭茹, 温仲明, 王红霞, 戚德辉. 延河流域植物叶性状间关系及其在不同植被带的表达. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3627-3633.
- [33] 任昱, 卢琦, 吴波, 刘明虎. 不同模拟增雨下白刺比叶面积和叶干物质含量的比较. 生态学报, 2015, 35(14): 4707-4715.
- [34] 龚时慧, 温仲明, 施宇. 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应. 生态学报, 2011, 31(20): 6088-6097.
- [35] 郭超, 妥彬, 苏田, 郑丽婷, 刘翔宇, 尹芳, 何东, 阎恩荣. 中国东黄海海岛 5 种常见草本的碳氮磷化学计量特征. 应用生态学报, 2018, 29(2): 380-388.
- [36] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [37] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(6): 585-598.