

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201505008

赵广东,李超,史作民,等.壳斗科五树种幼苗叶片结构型性状及其相关关系[J].广西植物,2016,36(5):507-514

ZHAO GD, LI C, SHI ZM, et al. Leaf structure traits and their correlation of five tree seedlings of Fagaceae family [J]. Guihaia, 2016, 36(5):507-514

壳斗科五树种幼苗叶片结构型性状及其相关关系

赵广东¹, 李超¹, 史作民¹, 王兵¹, 邓宗富², 陈和东², 夏晨²

(1. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600)

摘要:通过种子的人工采集、低温沙藏和温室培育后,将幼苗移栽到环境条件相同的同质园中自然生长,研究了中亚热带壳斗科丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)、苦槠(*C. sclerophylla*)、锥栗(*Castanea henryi*)、板栗(*C. mollissima*)和麻栎(*Quercus acutissima*)2年生幼苗生长季节的叶面积、叶厚度、比叶面积、叶干物质含量、叶氮浓度、叶磷浓度和叶氮磷比7种结构型性状的差异及其相关关系。结果表明:(1)在5树种幼苗中,锥栗幼苗的叶面积和比叶面积最大、叶氮浓度最高,其叶干物质含量最低;丝栗栲幼苗的叶面积最小、叶氮浓度和叶磷浓度最低;苦槠幼苗的叶厚度和比叶面积最小,其叶干物质含量最高;板栗幼苗则是叶厚度最小;同时5树种幼苗叶片的氮磷比均无显著差异($P>0.1$)。(2)Pearson 相关和线性回归分析表明,壳斗科5树种幼苗的叶面积与叶氮浓度极显著正相关($P<0.01$),并与比叶面积显著正相关($P<0.05$);叶厚度与比叶面积极显著负相关($P<0.01$),其与叶干物质含量显著正相关($P<0.05$);比叶面积与叶干物质含量极显著负相关($P<0.01$),并与叶氮浓度极显著正相关($P<0.01$),同时与叶磷浓度显著负相关($P<0.05$);叶氮浓度与叶干物质含量、叶磷浓度分别为显著负相关($P<0.05$)和显著正相关($P<0.05$)。该研究结果表明壳斗科5树种幼苗叶片的7种结构型性状表现出了一定的种间差异性,但同一结构型性状的大小顺序和种间差异的显著性不同;同时所有树种幼苗叶片各结构型性状间的相关性及其显著程度不同。

关键词:壳斗科, 树种幼苗, 叶片结构型性状, 相关关系

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)05-0507-08

Leaf structure traits and their correlation of five tree seedlings of Fagaceae family

ZHAO Guang-Dong¹, LI Chao¹, SHI Zuo-Min¹, WANG Bing¹,
DENG Zong-Fu², CHEN He-Dong², XIA Chen²

(1. Key Lab of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, China)

Abstract: After sand reservoir in the condition of low temperature and cultivation in the greenhouse of the collected seeds, 5 tree species (*Castanopsis fargesii*, *C. sclerophylla*, *Castanea henryi*, *C. mollissima* and *Quercus acutissima*) seedlings of Fagaceae family in the mid-subtropical zone of China were transplanted into the common garden. The leaf size, leaf thickness, specific leaf area, leaf dry matter content, leaf nitrogen concentration, leaf phosphorus concentration, ratio of leaf ni-

收稿日期: 2015-07-08 修回日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(31170306, 30870193, 31290223) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170306, 30870193, 31290223)].

作者简介: 赵广东(1974-),男,山东泰安人,博士,副研究员,主要从事植物生理生态学研究,(E-mail) zhaogdc@126.com。

nitrogen and phosphorus concentration and their correlation of two-year old seedlings in the growing season were investigated in this paper. The results were as follows: (1) The leaf size and specific leaf area of *Castanea henryi* were the maximum, its leaf nitrogen concentration was the highest and its leaf dry matter content was the lowest. The leaf size of *Castanopsis fargesii* was the minimum, its leaf nitrogen concentration and leaf phosphorus concentration were the lowest. The leaf thickness and specific leaf area of *C. sclerophylla* was the minimum and its leaf dry matter content was the highest. For *C. mollissima* seedlings, the leaf thickness was the minimum. In the meanwhile, there was no significant difference of the ratio of leaf nitrogen and phosphorus concentration among the 5 tree seedlings. (2) Pearson and linear regression analysis indicated that leaf sizes of the 5 tree seedlings were in a highly significant positive correlation with leaf nitrogen concentration ($P < 0.01$) and significant positive correlation with specific leaf area ($P < 0.05$). The leaf thickness was in a highly significant negative correlation with leaf size ($P < 0.01$) and significant positive correlation with leaf dry matter content ($P < 0.05$). The correlation among specific leaf area and leaf dry matter content, leaf nitrogen concentration was highly significant negative and positive respectively ($P < 0.01$). At the same time, it was significantly and negatively correlated with leaf phosphorus concentration ($P < 0.05$). The correlation among leaf nitrogen concentration and leaf dry matter content, leaf phosphorus concentration was significant negative and positive respectively ($P < 0.01$). The results indicated that the seven leaf structure trait indicators of the 5 tree seedlings of Fagaceae family exhibited a certain interspecific difference, but the order of the same indicator and its difference significance were different; while the correlation of the seven leaf structure trait indicators among all of the five tree seedlings was not the same.

Key words: Fagaceae family, tree seedlings, leaf structure traits, correlation

植物功能性状 (plant functional trait) 指能够响应生存环境变化, 并 (或) 对生态系统功能产生一定影响的性状 (Díaz et al, 2001), 为植物在长期适应环境过程中而形成的一系列特征 (李修鹏等, 2013), 反映了植物表征生态系统功能方面的生态指示作用 (孟婷婷等, 2007)。植物部分功能性状不仅易于测定, 而且可以代表物种对环境变化的响应或物种对生态系统功能的贡献, 并客观反映植物对外部环境的适应性 (Reich et al, 2003; Ackerly et al, 2000)。植物作为陆地生态系统的重要组成部分之一, 其功能性状对全球变化的指示作用, 为探寻全球变化规律、减缓气候变化提供了科学依据 (龚春梅等, 2011)。

叶片功能性状 (leaf functional trait) 与植株生物量、植物对资源的获取及其利用效率的关系密切, 反映了植物适应环境变化而形成的生存策略, 并可以同时比较大量植物种类叶片功能性状之间的差异 (宝乐等, 2009)。在自然生长条件下, 环境因子和遗传因素共同决定植物功能性状, 环境梯度对性状的影响可能会被不同植物功能群性状的种间差异抵消或强化 (李东胜等, 2013)。叶片性状可分为结构型和功能型两种类型。结构型性状主要从植物叶片的生物化学结构特征方面反映不同物种对生境的适应对策 (张林和罗天祥, 2004)。功能型性状随时间和空间的变异相对较大, 主要体现叶片的生长代谢指标, 因此难以深入解释植物在长期进化过程中对

环境变化的适应机理 (刘金环和曾德慧, 2006)。

目前国内外对植物功能性状的研究主要集中在全球、区域、群落和物种尺度上大量植物多个叶性状的差异分析以及叶性状与环境因子的相关关系 (Wright et al, 2004; Han et al, 2005; Quentin et al, 2014; Reich et al, 2003; 任书杰等, 2008; 董廷发等, 2012; 冯秋红等, 2010; 董莉莉等, 2009), 而对生长在相同环境条件下不同树种多个叶性状的差异及其相关关系的研究相对较少 (李东胜等, 2013)。壳斗科 (Fagaceae) 是我国温带和亚热带最重要的森林树种之一 (刘茂松和洪必恭, 1998)。幼苗作为森林生态系统的一个重要组成部分, 对森林生态系统的物种多样性维持、群落演替和树种更新等过程发挥了重要作用 (冯秋红, 2008)。本文以中亚热带壳斗科丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*)、苦槠 (*C. sclerophylla*)、锥栗 (*Castanea henryi*)、板栗 (*C. mollissima*)、麻栎 (*Quercus acutissima*) 的 2 年生幼苗为研究对象, 通过测定和分析其生长季节的叶面积 (leaf size, LS)、叶厚度 (leaf thickness, LT)、比叶面积 (specific leaf area, SLA)、叶干物质含量 (leaf dry matter content, LDMC)、叶氮浓度 (leaf nitrogen concentration, LNC)、叶磷浓度 (leaf phosphorus concentration, LPC) 和叶氮磷比 (Ratio of leaf nitrogen and phosphorus concentration, N/P) 7 种结构型性状指标, 比较相同环境条件下 5 树种幼苗叶片同一结构型性状指标的

差异性,并探讨其功能性状的相关关系,以期为认识中亚热带主要树种叶片功能性状的特征及其差异性提供相关的科学依据。

1 研究区概况

研究区位于江西大岗山森林生态系统国家定位观测研究站,地理位置为 $114^{\circ} 30' \sim 114^{\circ} 45' E$, $27^{\circ} 30' \sim 27^{\circ} 50' N$,海拔 167.8 m,地处长江中下游低山丘陵区。该地区属亚热带湿润气候,雨量充沛、光照充足,非常适合林木生长。年均气温 $15.8 \sim 17.7^{\circ} C$,年积温 $5355^{\circ} C$,极端最高温 $39.9^{\circ} C$,极端最低温 $-8.3^{\circ} C$,年均日照时数 1 656.9 h,年蒸发量 504 mm,年降水量 1 590.9 mm(其中 4-6 月份降雨量占全年降雨量的 45%),年太阳辐射总量约 $487 kJ \cdot cm^{-2}$,年均相对湿度 80%,无霜期 265 d。地带性植被为天然常绿阔叶混交林,代表树种是青冈栎(*Castanopsis glauca*)、丝栗栲、苦槠、刺栲(*Castanopsis hystrix*)、木荷(*Schima superba*)和甜槠(*Castanopsis eyrei*)等(王致远等,2014)。

2 材料与方 法

2.1 试验设计

2012 年 10 月,人工采集壳斗科(Fagaceae)的丝栗栲、苦槠、锥栗、板栗、麻栎和大叶青冈(*Cyclobal-*

anopsis jensenniana)、樟科(Lauraceae)的刨花楠(*Machilus pauhoi*)、闽楠(*Phoebe bournei*)和香樟(*Cinnamomum camphora*)、木兰科(Magnoliaceae)的观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、乐昌含笑(*Michelia chapensis*)和深山含笑(*M. maudiae*)、山茶科(Theaceae)的银木荷(*Schima argentea*)的果实饱满、无病虫害且生长于林冠向阳面和中上部的种子。种子经过低温沙藏后于 2013 年春季在温室播种,待种子萌发并在温室中生长一段时间后,将其幼苗转至土沙质量比为 3:1 的塑料钵中培养。4 月初选择株高及生长状况基本一致的幼苗移栽到位于江西大岗山森林生态系统国家定位观测研究站附近且周围无高大乔木或灌木遮挡的同质园(common garden)的 12 个栽培小区内。每个栽培小区内从东到西依次栽植大叶青冈、闽楠、深山含笑、乐昌含笑、观光木、银木荷、丝栗栲、香樟、刨花楠、板栗、麻栎、锥栗和苦槠幼苗各两行,株行距均为 $0.3 m \times 0.4 m$ 。每个栽培小区四周埋设深度为 50 cm、并高出土壤表面 10 cm 的 PVC 隔水板。两个栽培小区之间设置约 50 cm 的缓冲区。树种幼苗生长期间人工定期进行除草和防治病虫害等田间管理(李东胜等,2013)。同质园中土壤的理化性质见表 1。

2.2 叶片样品采集

2014 年 7 月,在同质园中选取生长状况基本一致的丝栗栲、苦槠、锥栗、板栗和麻栎幼苗各 3 株。在每株幼苗的中上部分别选取 20 片无病虫害、生长

表 1 同质园中土壤的理化性质
Table 1 Soil properties in the common garden

土层 Soil layer (cm)	土壤全氮 Soil total nitrogen ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤全磷 Soil total phosphorus ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤全钾 Soil total potassium ($g \cdot kg^{-1}$)	土壤含水量 Soil water content (%)	土壤容重 Soil bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)
0~10	0.61±0.05a	0.26±0.03ab	0.77±0.16a	21.77±0.61a	1.37±0.04a
10~30	0.46±0.03b	0.28±0.03a	0.92±0.22a	20.03±0.42b	1.38±0.02a
30~50	0.33±0.01c	0.22±0.02b	0.82±0.05a	18.65±0.58c	1.39±0.03a

注:数值为平均值 ± 标准偏差;同一列指标数值后的不同小写字母表示同一测定指标在 0.05 水平上差异显著。

Note: Data in the table are mean ± SE; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level of the same indicator.

良好的成熟叶片装入塑料自封袋并贴好标签。

2.3 叶片结构型性状测定

将叶片样品带回实验室,先用 LI-3000C 便携式叶面积仪(LI-COR Inc., Lincoln, USA)测量每个叶片的叶面积,接着沿叶片主脉方向均匀选取 3 个点,利用精度为 0.01 mm 的电子游标卡尺测量叶片主脉一

侧约 0.25 cm 处的厚度,其平均值即为该叶片的厚度。然后将叶片样品浸泡在水里,每隔 5 h 测量 1 次叶重,直至叶重不再增加为止,取出叶片用吸水纸迅速吸走其表面的水分,用精度为 0.01 g 的电子天平称取其饱和鲜重,再将叶片样品放置在 $65^{\circ} C$ 的烘箱里烘干至恒重,测量其干重。叶片干物质含量(LDMC)=

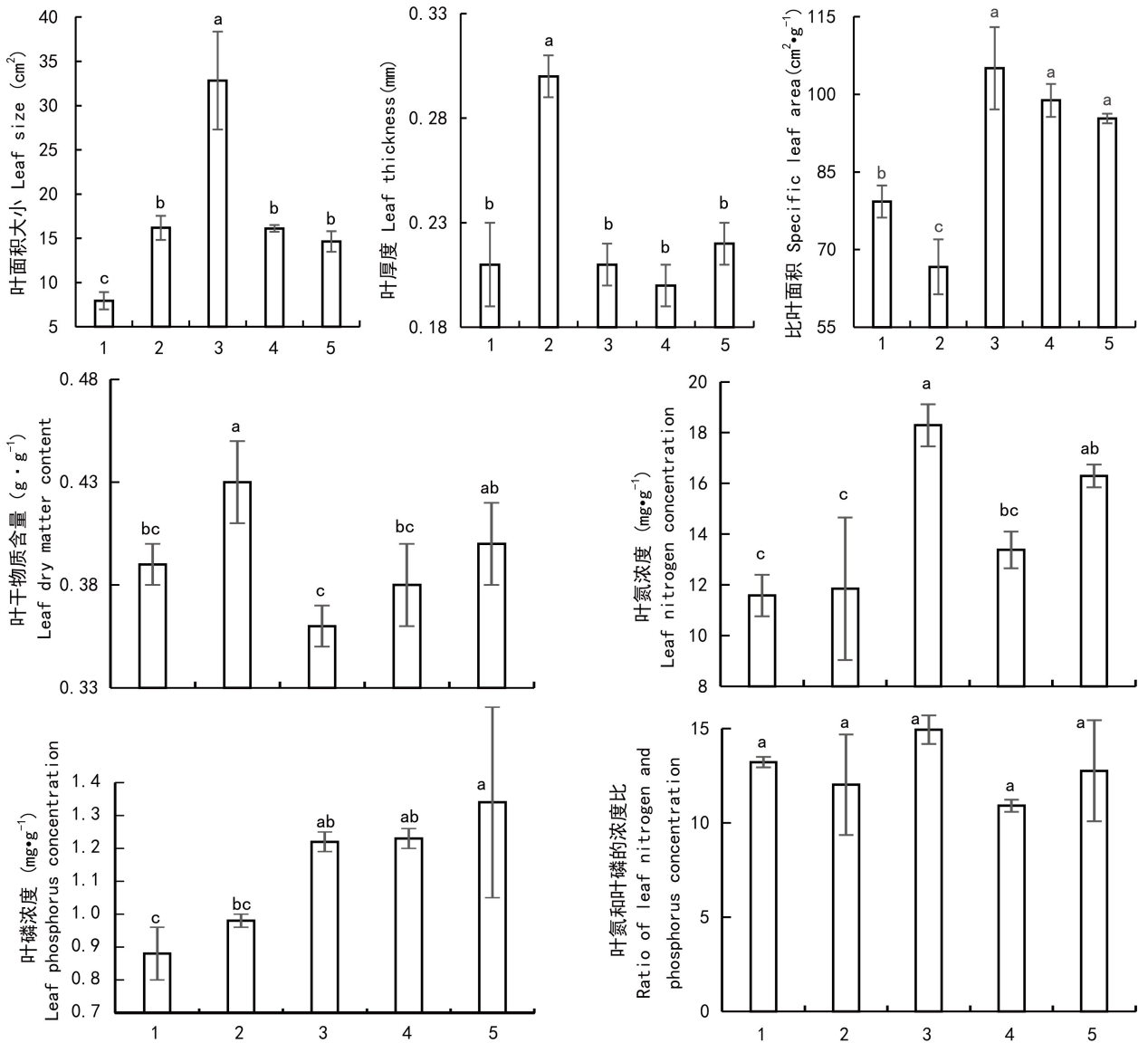


图1 壳斗科5树种幼苗叶片结构性状的种间差异性 数值为平均值±标准偏差;不同小写字母表示5树种幼苗同一测定指标差异显著($P<0.05$)。横轴1、2、3、4和5分别代表丝栗栲、苦槠、锥栗、板栗和麻栎。

Fig. 1 Difference among leaf structure traits of the 5 tree seedlings of Fagaceae family Data in the figure are mean \pm SE; Different lowercase letters indicate significant differences of the 5 tree seedlings of the same indicator ($P<0.05$). The 1, 2, 3, 4 and 5 in horizontal axis represent *Castanopsis fargesii*, *C. sclerophylla*, *Castanea henryi*, *C. mollissima* and *Quercus acutissima*, respectively.

叶片干重(g)/叶片饱和鲜重(g)。比叶面积(SLA) = 叶片面积(cm²)/叶片干重(g)。最后将叶片样品研磨过1 mm筛后,在国家林业局森林生态环境重点实验室采用KDY 9830全自动凯氏定氮仪测定叶氮浓度(mg·g⁻¹)、IRIS Intrepid II XSP等离子发射光谱仪(Thermo Electron, Waltham, USA)测定叶磷浓度(mg·g⁻¹)。

2.4 数据处理与分析

采用Excel 2013软件对数据进行整理、计算和

图表制作处理,运用SPSS 22.0(SPSS Inc., Chicago, USA)Duncan法检验不同树种叶片结构性状间的差异显著性、Pearson相关分析检验叶片各结构性状之间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 叶片结构性状的差异性分析

壳斗科5树种幼苗中,锥栗叶面积最大,丝栗栲

最小;而且苦槠、板栗、麻栎的叶面积差异不显著($P > 0.1$)。苦槠幼苗的叶厚度显著高于丝栗栲、锥栗、板栗和麻栎($P < 0.05$),但丝栗栲、锥栗、板栗和麻栎的叶厚度则差异不显著($P > 0.1$)。5 树种幼苗的比叶面积大小为锥栗>板栗>麻栎>丝栗栲>苦槠,锥栗、麻栎和板栗比叶面积差异不显著($P > 0.1$),但三者的比叶面积均显著大于丝栗栲和苦槠($P < 0.05$),同时丝栗栲的比叶面积显著大于苦槠($P < 0.05$)。5 树种幼苗的叶干物质含量表现为苦槠>麻栎>丝栗栲>板栗>锥栗,苦槠的叶干物质含量显著高于丝栗栲、板栗和锥栗($P < 0.05$),并与麻栎幼苗无显著差异($P > 0.1$);麻栎、丝栗栲、板栗两两之间以及丝栗栲和锥栗、板栗和锥栗的叶干物质含量差异不显著($P > 0.1$),锥栗的干物质含量显著低于麻栎($P < 0.05$)。锥栗的叶氮浓度最高,并显著高于板栗、苦槠和丝栗栲($P < 0.05$);丝栗栲的叶氮浓度最低,并显著低于锥栗和麻栎($P < 0.05$),而且板栗、苦槠和丝栗栲的叶氮浓度差异不显著($P > 0.1$)。麻栎的叶磷浓度最高,但仅显著高于苦槠和丝栗栲($P < 0.05$);丝栗栲的叶磷浓度最低,并显著低于锥栗、麻栎和板栗($P < 0.05$),而且丝栗栲和苦槠的叶磷浓度差异不显著($P > 0.1$)。壳斗科 5 树种幼苗的叶氮磷比差异均不显著($P > 0.1$)。

3.2 叶片结构型性状的 Pearson 相关分析

通过 Pearson 相关分析(表 3)表明,壳斗科 5 树种幼苗叶片的叶面积与叶氮浓度极显著正相关($P < 0.01$),与比叶面积显著正相关($P < 0.05$);叶厚度与比叶面积极显著负相关($P < 0.01$),而与叶干物质含量显著正相关($P < 0.05$);比叶面积与叶干物质含量极显著负相关($P < 0.01$),叶氮浓度则极显著正相关($P < 0.01$),而其与叶磷浓度则显著负相关($P < 0.05$);叶干物质含量与叶氮浓度显著负相关($P < 0.05$),而叶氮浓度与叶磷浓度则显著正相关($P < 0.05$)。

3.3 叶片结构型性状的线性相关分析

5 树种幼苗的叶面积和叶厚度之间的相关性表现为极微弱的负相关($R^2 = 0.0045$; $P = -0.067$)。5 树种幼苗的比叶面积和叶干物质含量呈极显著的负相关($R^2 = 0.5613$; $P < 0.01$)。5 树种幼苗的叶面积与比叶面积呈显著正相关($R^2 = 0.2677$; $P < 0.05$),但叶面积与叶干物质含量的负相关关系不显著($R^2 = 0.1575$; $P = -0.397$)。5 树种幼苗的叶厚度与比叶面积呈极显著负相关关系($R^2 = 0.5751$; $P < 0.01$),并与

表 3 壳斗科 5 树种幼苗叶片结构型性状之间 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients among leaf structure traits of the 5 tree seedlings of Fagaceae family

	叶面积 LS	叶厚度 LT	比叶面积 SLA	叶干物质 含量 LDMC	叶氮 浓度 LNC	叶磷 浓度 LPC
叶面积 LS	1					
叶厚度 LT	-0.067	1				
比叶面积 SLA	0.517 *	-0.758 **	1			
叶干物质 含量 LDMC	-0.397	0.608 *	-0.758 **	1		
叶氮浓度 LNC	0.694 **	-0.337	0.731 **	-0.579 *	1	
叶磷浓度 LPC	0.352	-0.304	0.594 *	-0.405	0.545 *	1

注: * 显著水平 ($P < 0.05$); ** 极显著水平 ($P < 0.01$)。

Note: * Correlation is significant ($P < 0.05$); ** Correlation is highly significant ($P < 0.01$).

叶干物质含量呈显著正相关关系($R^2 = 0.3699$; $P < 0.05$)(图 1)。

5 树种幼苗的叶面积与叶氮浓度呈极显著的正相关,其与叶磷浓度的正相关关系则不显著。5 树种幼苗的叶厚度与叶氮浓度、叶磷浓度的负相关关系均不显著。5 树种幼苗的比叶面积与叶氮浓度呈显著的正相关,而与叶磷浓度则呈极显著的正相关。5 树种幼苗的叶干物质含量与叶氮浓度呈显著的负相关,其与叶磷浓度的负相关关系则未达到显著水平(表 4)。

4 讨论

叶片是植物与周围环境进行物质能量转换的主要器官。叶性状是植物的重要特性之一,是植物二级功能性状(Cornelissen et al, 2003)。中国南北样带 9 种主要栲属树种的叶厚度为 0.10~0.65 mm(董莉莉等, 2009), 8 种栎属树种比叶面积、叶干物质含量分别为 114.02~232.72 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、0.32~0.45 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (冯秋红等, 2008)。而在本研究中,壳斗科 5 树种幼苗的叶厚度、比叶面积、叶干物质含量则分别为 0.20~0.30 mm、66.66~105.05 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.36~0.43 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。我国 753 种植物叶片的叶氮浓度(Han et al, 2005)、中国南北样带 9 种主要栲属树种(董莉莉等, 2009)和 8 种栎属树种(冯秋红等, 2008)的叶磷

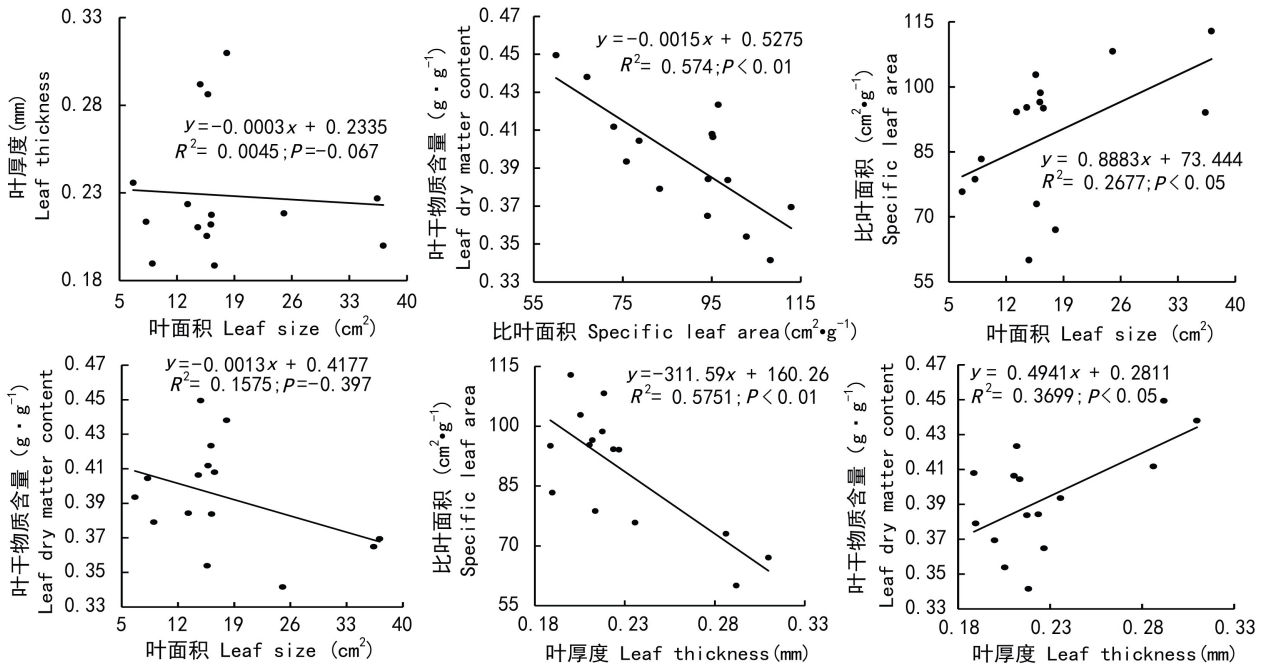


图 2 壳斗科 5 树种幼苗叶面积、叶厚度、比叶面积、叶干物质含量之间的线性相关关系

Fig. 2 Linear correlation among LS, LT and SLA, LDMC of the 5 tree seedlings of Fagaceae family

表 4 5 树种幼苗叶面积、叶厚度、比叶面积、叶干物质含量与叶氮浓度、叶磷浓度的线性相关关系 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
Table 4 Linear correlation between LS, LT, SLA, LDMC and LNC, LPC of the 5 tree seedlings of Fagaceae family

项目 Item	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance
叶面积与叶氮浓度 LS and LNC	$y = 0.2386x + 10.091$	0.4823	$P < 0.01$
叶面积与叶磷浓度 LS and LPC	$y = 0.0108x + 0.9064$	0.3903	$P = 0.352$
叶厚度与叶氮浓度 LT and LNC	$y = -27.733x + 20.617$	0.1137	$P = -0.337$
叶厚度与叶磷浓度 LT and LPC	$y = -1.7162x + 1.4883$	0.1719	$P = -0.304$
比叶面积与叶氮浓度 SLA and LNC	$y = 0.1005x + 5.6255$	0.3744	$P < 0.01$
比叶面积与叶磷浓度 SLA and LPC	$y = 0.0079x + 0.3934$	0.6262	$P < 0.05$
叶干物质含量与叶氮浓度 LDMC and LNC	$y = -35.907x + 28.746$	0.1839	$P < 0.05$
叶干物质含量与叶磷浓度 LDMC and LPC	$y = -2.6564x + 2.1417$	0.2753	$P = -0.405$

浓度、我国 753 种植物叶片的叶氮磷比 (Han et al, 2005) 均高于本文的相关结果, 这表明植物叶片结构型性状的种间差异性较大。

叶厚度可能与植物对资源的获取、水分保存和同化有关, 因此通常被作为叶片一个非常有价值的特性 (刘金环和曾德慧, 2006)。25 种南亚热带植物盆栽幼苗 (曾小平等, 2006)、东灵山地区 15 种不同森林群落 (宝乐等, 2009) 的叶面积与叶厚度呈极显著的正相关, 但本研究中壳斗科 5 树种幼苗的叶面积与叶厚度呈极微弱的负相关关系。相关研究结果表明, 在养分贫瘠的环境中, 植物叶片通常较厚 (Reich et al, 1998); 而本研究中, 叶厚度与养分元素间的相关关系则并不显著。

壳斗科 5 树种幼苗的比叶面积与叶干物质含量呈显著的负相关, 这与 Bill & Thi-Tam (2002) 的研究结果相一致。25 种南亚热带植物盆栽幼苗的叶面积与比叶面积呈显著正相关 (曾小平等, 2006), 比叶片面积较低的植物常形成厚度较大而面积较小的叶片 (Reich et al, 1998), 以上结论均与本实验研究结果相同。科尔沁沙地 23 种植物的叶厚度与干物质含量呈负相关 (刘金环和曾德慧, 2006), 则与本研究结果正好相反。

氮、磷作为陆地生态系统中植物生长的主要限制元素, 植物叶氮浓度与叶磷浓度的正相关关系具有全球尺度的普遍性 (Wright et al, 2004; 任书杰等, 2008; Reich & Jacek, 2004)。本研究中壳斗科 5 树

种幼苗的叶氮浓度和叶磷浓度亦呈显著的正相关关系 ($R^2=0.4957, P<0.05$), 这进一步印证了该结论。植物叶片氮磷比是描述群落水平上植被结构、功能和养分限制的重要指标 (Güsewell, 2004)。研究表明, 当叶氮磷比大约为 15 时植物营养状况被认为是处于临界状态; 当叶氮磷比小于 14 时, 植物生长主要受氮限制; 而当叶氮磷比大于 16 时, 植物生长主要受磷限制 (Koerselman, 1996)。本研究中壳斗科 5 树种幼苗的叶氮磷比在 10~15 之间, 说明其生长更容易受到叶片氮浓度的限制。

壳斗科 5 树种幼苗的叶氮浓度与比叶面积呈显著的正相关关系, 与青海省沙珠玉治沙站地区 17 种主要植物功能性状的相关研究结论一致 (李永华等, 2009)。中国南北样带 8 种栎属树种的叶氮浓度、叶磷浓度均与叶干物质含量的相关关系不显著 (冯秋红等, 2008), 而本研究中则只有叶磷浓度与叶干物质含量的相关关系不显著。

植物功能性状作为连接植物与环境关系的桥梁和纽带, 近年来已成为生态学和全球变化研究领域的热点之一 (宝乐等, 2009)。我国已成为全球继欧洲和北美之后的第三大氮沉降区 (Richter et al, 2005)。多年来, 相关人员在我国亚热带地区通过设置氮沉降增加的不同梯度开展了研究工作 (王致远等, 2014; 李德军等, 2004, 2005; 胡正华等, 2010; 袁颖红等, 2013; 郑丽丽等, 2015)。据 IPCC (2007) 预测到 21 世纪末, 气候变暖引起陆地生态系统的干旱频繁, 导致高纬度地区降雨增加、亚热带地区降雨将减少 (IPCC, 2007)。今后本研究将通过人工设置对照 (CK)、氮沉降增加 (+N)、降雨减少 (-W)、施氮减水 (+N-W) 4 种处理, 以同质园 (Common garden) 中的所有树种幼苗为研究对象, 系统深入地探讨未来氮沉降增加、降雨减少、氮沉降增加和降雨减少交互作用对 13 种幼苗生长状况、水分状况、叶片和细根功能性状特征及其相互关系的影响, 以揭示中亚热带常见树种的生理生态学特征对全球气候变化响应与适应规律的差异性。

参考文献:

ACKERLY DD, DUDLEY SA, SULTAN SE, et al, 2000. The evolution of plant ecophysiological traits: recent advances and future directions new research addresses natural selection, genetic constraints, and the adaptive evolution of plant ecophysiological traits [J]. *Bioscience*, 50(11):979-995.

BAO L, LIU YH, 2009. Comparison of leaf functional traits in different forest communities in Mt. Dongling of Beijing [J]. *Acta*

Ecol Sin, 27(7):3 692-3 703. [宝乐, 刘艳红, 2009. 东灵山地区不同森林群落叶功能性状比较 [J]. *生态学报*, 29(7): 3 692-3 703.]

CORNELISSEN JHC, LAVOREL S, GARNIER E, et al, 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Aust J Bot*, 51(4): 335-380.

DIAZ S, CABIDO M, 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes [J]. *Trends Ecol Evol*, 16(11):646-655.

DONG LL, LIU SR, SHI ZM, et al, 2009. Relationships between leaf traits of *Castanopsis* species and the environmental factors in the North-South transect of eastern China [J]. *For Res*, 22(4): 463-469. [董莉莉, 刘世荣, 史作民, 等, 2009. 中国南北样带上栲属树种叶功能性状与环境因子的关系 [J]. *林业科学研究*, 22(4):463-469.]

DONG TF, FENG YL, LEI YB, et al, 2012. Comparison on leaf functional traits of main dominant woody species in wet and dry habitats [J]. *Chin J Ecol*, 31(5):1 043-1 049. [董廷发, 冯玉龙, 类延宝, 等, 2012. 干旱和湿润生境中主要优势树种叶片功能性状的比较 [J]. *生态学杂志*, 31(5):1 043-1 049.]

FENG QH, SHI ZM, DONG LL, et al, 2010. Relationships among functional traits of *Quercus* species and their response to meteorological factors in the temperate zone of the North-South Transect of Eastern China [J]. *Acta Phytocool Sin*, 34(6): 619-627. [冯秋红, 史作民, 董莉莉, 等, 2010. 南北样带温带区栎属树种功能性状间的关系及其对气象因子的响应 [J]. *植物生态学报*, 34(6):619-627.]

FENG QH, 2008. Study on the functional traits of *Quercus* species and their relationships with environmental factors in temperate zone of NSTEC [D]. Beijing: Chinese Academy Forestry. [冯秋红, 2008. 南北样带温带区栎属树种功能性状及其与环境因子的关系 [D]. 北京: 中国林业科学研究院.]

GONG CM, BAI J, LIANG ZS, 2011. Advance on indicating functions of plant functional traits to global climate changes [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(11): 2 355-2 363. [龚春梅, 白娟, 梁宗锁, 2011. 植物功能性状对全球气候变化的指示作用研究进展 [J]. *西北植物学报*, 31(11):2 355-2 363.]

GÜSEWELL S, 2004. N : P ratios in terrestrial plant: variation and functional significance [J]. *New phytol*, 164(2):243-266.

HAN WX, FANG JY, GUO DL, et al, 2005. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 168(2):377-385

HU ZH, LI HM, YANG YP, et al, 2010. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in northern subtropical deciduous broad-leaved forest [J]. *Chin J Environ Sci*, 31(8): 1 726-1 732. [胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等, 2010. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响 [J]. *环境科学*, 31(8):1 726-1 732.]

IPCC, 2007. Climate change: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press

KOERSELMAN W, MEULEMAN AFM, 1996. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J Appl Ecol*, 33(6):1 441-1 450.

LI DJ, MO JM, FANG YT, et al, 2004. Effects of simulated

- nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 24(5):876-882. [李德军, 莫江明, 方运霆, 等, 2004. 模拟氮沉降对三种南亚热带树苗生长和光合作用的影响 [J]. *生态学报*, 24(5):876-882.]
- LI DJ, MO JM, FANG YT, et al, 2005. Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 29(4):543-549. [李德军, 莫江明, 方运霆, 等, 2005. 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响 [J]. *植物生态学报*, 29(4):543-549.]
- LI DS, SHI ZM, LIU SR, et al, 2013. Variation of functional traits of *Quercus* seedlings from different provenances of temperate zone of NSTEC [J]. *For Res*, 26(2):156-162. [李东胜, 史作民, 刘世荣, 等, 2013. 南北样带温带区栎属树种幼苗功能性状的变异研究 [J]. *林业科学研究*, 26(2):156-162.]
- LI XP, YANG XD, YU SQ, et al, 2013. Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(20):6 604-6 613. [李修鹏, 杨晓东, 余树全, 等, 2013. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价 [J]. *生态学报*, 33(20):6 604-6 613.]
- LI YH, LUO TX, LU Q, et al, 2005. Comparisons of leaf traits among 17 major plant species in Shazhuyu Sand Control Experimental Station of Qinghai Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 25(5):994-999. [李永华, 罗天祥, 卢琦, 等, 2005. 青海省沙珠玉治沙站 17 种主要植物叶性因子的比较 [J]. *生态学报*, 25(5):994-999.]
- LIU JH, ZENG DH, LEE DK, 2006. Leaf traits and their interrelationships of main plant species in southeast Horqin sandy land [J]. *Chin J Ecol*, 25(8):921-925. [刘金环, 曾德慧, Don Koo Lee, 2006. 科尔沁沙地东南部地区主要植物叶片性状及其相互关系 [J]. *生态学杂志*, 25(8):921-925.]
- LIU MS, HONG BG, 1998. The distribution of Fagaceae in China and its relationship with climatic and geographic characters [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 22(1):41-45. [刘茂松, 洪必恭, 1998. 中国壳斗科的地理分布及其与气候条件的关系 [J]. *植物生态学报*, 22(1):41-50.]
- MENG TT, NI J, WANG GH, 2007. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 31(1):150-165. [孟婷婷, 倪健, 王国宏, 2007. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能 [J]. *植物生态学报*, 31(1):150-165.]
- READ QD, MOORHEAD LC, SWENSON NG, et al, 2014. Convergent effects of elevation on functional leaf traits within and among species [J]. *Funct Ecol*, 28(1):37-45.
- REICH PB, BUSCHENA C, TJOELKER MG, et al, 2003. Variation in growth rate and ecophysiology among 34 grassland and savanna species under contrasting N supply: a test of functional group differences [J]. *New Phytol*, 157(3):617-631.
- REICH PB, WALTERS MB, ELLSWORH DS, et al, 1998. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span; a test across biomes and functional groups [J]. *Oecologia*, 114(4):471-482.
- REICH PB, WRIGHT IJ, CAVENDER-BARES, et al, 2003. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies [J]. *Int J Plant Sci*, 164(S3):S143-S164.
- REICH PB, OLEKSYN J, 2004. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *P Natl Acad Sci USA*, 101(30):11 001-11 006.
- REN SJ, YU GR, TAO B, 2008. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. *Chin J Environ Sci*, 28(12):2 665-2 673. [任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等, 2007. 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*, 28(12):2 665-2 673.]
- RICHTER A, BURROWS JP, NÜß H, et al, 2005. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 437(7055):129-132.
- SHIPLEY B, VU TT, 2002. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts [J]. *New Phytol*, 153(2):359-364.
- WANG ZY, ZHAO GD, WANG B, et al, 2014. Responses of leaf-functional traits of *Castanopsis fargesii*, *Castanopsis sclerophylla* and *Cyclobalanopsis glauca* seedlings to warming and nitrogen addition under artificial control conditions [J]. *J Soil Water Conserv*, 28(4):293-298. [王致远, 赵广东, 王兵, 等, 2014. 丝栗栲、苦槠和青冈幼苗叶片光合生理指标对人工增温和施氮的响应 [J]. *水土保持学报*, 28(4):293-298.]
- WRIGHT IJ, REICH PB, WESTOBY M, et al, 2004. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 428(6985):821-827.
- YUAN YH, FAN HB, LIU WF, et al, 2013. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities and microbial community functional diversities in a Chinese Fir plantation [J]. *Soils*, 45(1):120-128. [袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 等, 2013. 模拟氮沉降对杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata*)土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响 [J]. *土壤*, 45(1):120-128.]
- ZENG XP, ZHAO P, CAI XA, 2006. Shade-tolerance of 25 low subtropical plants [J]. *J Beijing For Univ*, 28(4):88-95. [曾小平, 赵平, 蔡锡安, 等, 2006. 25 种南亚热带植物耐阴性的初步研究 [J]. *北京林业大学学报*, 28(4):88-95.]
- ZHANG L, LUO TX, 2004. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 28(6):844-852. [张林, 罗天祥, 2004. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展 [J]. *植物生态学报*, 28(6):844-852.]
- ZHENG LL, GUO PP, YI ZG, 2015. Responses of soil BTEX fluxes to simulated nitrogen deposition in two dominated forests of Dinghushan, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 24(3):396-401. [郑丽丽, 郭萍萍, 易志刚, 2015. 鼎湖山典型森林土壤苯系物通量对模拟氮沉降的响应 [J]. *生态环境学报*, 24(3):396-401.]