李婉婷,牛香,王兵.新余市不同生境园林植物叶片功能性状特征及其对环境的响应[J].江西农业大学学报,2025,47(3):694-704.
LI W T,NIU X,WANG B.Leaf functional traits of garden plants in different habitats of Xinyu City and their response to environment [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):694-704.

新余市不同生境园林植物叶片功能性状特征及其对环境的响应

李婉婷[1,2],牛　香[2,3,4*],王　兵[2,3,4]

(1.沈阳农业大学 林学院,辽宁 沈阳 110866;2.江西大岗山森林生态系统国家野外科学观测研究站,江西 新余 336606;3.中国林业科学研究院 森林生态环境与自然保护研究所,北京 100091;4.国家林业和草原局森林生态环境重点实验室,北京 100091)

摘要:【目的】功能性状在连接植物、环境与生态系统方面发挥着关键作用,对于揭示生存环境的变化具有重要意义。旨在探究新余市园林植物叶片功能性状对不同生境的响应,为阐明新余市园林植物的资源利用情况与生态适应策略。【方法】以新余市6种典型园林植物为研究对象,基于其生长环境设置3个生境(铁山小区、袁河公园、万年湖公园),选取12个植物功能性状,分别是植物叶片叶面积(LA)、叶厚度(LT)、比叶面积(SLA)、叶片含水量(LWC)、叶密度(LTD)和叶干物质含量(LDMC)6种植物叶片结构型性状,以及叶绿素含量(SPAD)、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO_2浓度(C_i)、水分利用效率(WUE)和羧化效率(CE)6种植物叶片功能型性状,计算各性状的变异系数,探究其功能性状在不同生境间的差异性与响应机制。【结果】不同生境间,常绿乔木与落叶乔木在铁山小区生境中的LTD较高,而落叶乔木在万年湖公园生境的LDMC较低,常绿灌木在各生境间无显著差异。常绿乔木在万年湖公园生境的P_n与CE较高,落叶乔木在袁河公园生境的WUE较高且在万年湖公园生境的T_r较高,而常绿灌木在铁山小区生境的P_n较低、C_i较高,且WUE在袁河公园生境较高。在结构型性状和功能型性状中,铁山小区的园林植物的LA和T_r变异系数最大,分别为88.18%和52.86%,该生境中园林植物的LWC和C_i的变异系数最小,分别为11.72%和4.98%。不同生境间叶功能性状相关性存在一定差异。万年湖公园生境的LA要显著高于铁山小区生境(P<0.05),铁山小区生境的P_n、T_r较袁河公园生境和万年湖公园生境均显著偏低(P<0.05)。在袁河公园生境中,具有较高的SLA和LWC以及较低的LDMC、LT,万年湖公园生境中,植物LDMC、LT、LA及光合能力均强于其他生境植物,且SLA则相对较低。冗余分析表明,前2轴共同解释了不同生境叶片功能型性状的65.25%、70.61%、76.12%,其中对叶片功能型性状影响显著的叶结构型性状因子为LT、LTD。【结论】3种不同生境中6种典型园林植物叶片性状所反映的生长性能表现为:万年湖公园生境优于袁河公园生境和铁山小区生境。6种典型园林植物各性状在不同生境出现了差异化,这是其对不同环境长期适应的结果。该研究结果为新余市城市绿地系统中园林植物对生境的响应提供科学依据,同时对园林树木如何调整其生态适应机制具有深远的研究价值。

关键词:园林植物;叶功能性状;适应策略;性状差异
中图分类号:Q948　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)03-0694-11
CSTR:32399.14.aauj.2025060

收稿日期:2024-11-27　　**修回日期:**2025-01-27
基金项目:国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作专项资助(2024YFE0198600)
Project supported by the Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation Program under National Key Research and Development Plan(2024YFE0198600)
作者简介:李婉婷,硕士生,orcid.org/0009-0006-3039-5594,liwting1999@163.com;*通信作者:牛香,研究员,博士,主要从事森林生态系统长期监测与评估研究,niuxiang@caf.ac.cn。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Leaf functional traits of garden plants in different habitats of Xinyu City and their response to environment

LI Wanting[1,2], NIU Xiang[2,3,4*], WANG Bing[2,3,4]

(1.College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.Dagangshan National Key Field Observation and Research Station for Forest Ecosystem, Xiyu, Jiangxi 336606, China; 3.Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4.Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [**Objective**] Functional traits play a pivotal role in connecting plants, environments, and ecosystems, as well as hold significant importance in revealing changes in living environments. The aim is to investigate how the leaf functional traits of garden plants in Xinyu City respond to various habitats, and to elucidate their strategies for resource utilization and ecological adaptation. [**Method**] Six typical garden plant species in Xinyu City were studied. Based on their growth environments, three habitats (Tieshan Community, Yuanhe Park, and Wannianhu Park) were established. Twelve plant functional traits, including six structural traits like leaf area (LA), leaf thickness (LT), specific leaf area (SLA), leaf water content (LWC), leaf tissue density (LTD), and leaf dry matter content (LDMC), as well as six functional traits like chlorophyll content (SPAD), net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), intercellular CO_2 concentration (C_i), water use efficiency (WUE), and carboxylation efficiency (CE) were selected for investigation. The coefficient of variation of each trait were calculated and the differences and response mechanisms of its functional traits in different habitats were explored. [**Result**] Among the different habitats, evergreen trees and deciduous trees in the Tieshan Community exhibited higher LTD values, whereas deciduous trees in Wannianhu Park Community had lower LDMC. Evergreen shrubs showed no notable differences among various habitats. In Wannianhu Park Community, evergreen trees demonstrated higher P_n and CE, while deciduous trees in Yuanhe Park Community exhibited higher WUE and those in Wannianhu Park Community showed higher T_r. Evergreen shrubs in Tieshan Community had lower P_n and higher C_i, but higher WUE in Yuanhe Park Community. In terms of structural traits and functional traits, Tieshan Community showed the highest coefficient of variation (CV) for LA and T_r traits, with values of 88.18% and 52.86% respectively. Conversely, In this habitat, the coefficients of variation for LWC and CV were the smallest, at only 11.72% and 4.98%, respectively. The correlations among leaf functional traits varied across habitats. LA in Wannianhu Park Community was significantly greater than that in Tieshan Community ($P<0.05$). P_n and T_r in Tieshan Community were markedly lower than those in Yuanhe Park Community and Wannianhu Park Community ($P<0.05$). Yuanhe Park Community featured higher SLA and LWC, as well as lower LDMC and LT. Compared with other habitats, plants in Wannianhu Park Community exhibited stronger LDMC, LT, LA, and photosynthetic capacity, but a relatively lower SLA. The redundancy analysis revealed that the first two axes collectively accounted for 65.25%, 70.61%, and 76.12% of the total variation in leaf functional traits among different habitats. Among the leaf structural traits, LT and LTD were significant factors influencing leaf functional traits. [**Conclusion**] The growth performance reflected by the leaf traits of the six typical garden plants in the three different habitats indicates that the habitat in Wannianhu Park is superior to those in Yuanhe Park and Tieshan Community. The differentiated traits of these six typical garden plants across different habitats are the result of their long-term adaptation to varying environments. The findings of this study provide a scientific basis for understanding the response of garden plants to their habitats within the urban green space system of Xinyu City. Additionally, they hold significant research value in exploring how garden trees adjust their ecological adaptation mechanisms.

Keywords: garden plants; leaf functional trait; adaptive strategy; trait difference

【研究意义】植物功能性状能够客观地表征植物适应不同环境的策略，并揭示它们对气候变化和环境变化的反应机制[1-2]。植物功能性状的变化涵盖形态、生理和物候等多个层面，影响着植物在适应环境、生长发育和繁殖过程中的策略选择和生存竞争力[3-4]。叶片作为植物开展光合作用的主要部位，同时也是植物获取资源比较敏感的功能器官，接触外界环境范围大且可塑性强[5]。因此，叶片的功能性状被视为衡量植物应对环境变化生存策略的关键指标，成为许多学者研究环境对植物影响的切入点[6-7]。研究不同生境下园林植物叶功能性状变化，探讨不同叶功能性状间的差异性和相关性，有助于揭示其对生境适应策略的多样性，为预测全球气候变暖背景下叶片功能性状的权衡策略提供理论依据[8]。【前人研究进展】目前国内外在叶功能性状适应策略上展开的研究颇为丰富[9-11]，多数研究主要为全球、群落和不同海拔等尺度上的叶片功能性状关系[12-14]。有研究[15]发现，高海拔分布的刺叶高山栎通过提高光合效率以及更为积极的资源策略以适应生境变化；还有学者[16]认为叶功能性状在海拔梯度上的差异显著，不同性状随海拔变化呈现规律不一致现象；Niinemets 等[17]探讨了全球范围内不同功能型植物如何通过调整其叶片的特性来适应不同的环境条件，Tian 等[18]研究显示了从热带到温带针叶林，叶片的形态和解剖学特征随纬度梯度变化。

【本研究切入点】园林植物是我国一种重要的植物资源，其类型复杂，生物多样性高，生长适应性强，且具有很高的观赏价值，在人居环境营造方面发挥着重要的作用。新余市作为全国园林城市，区位独特，保存有完好的亚热带典型植物树种，可以开展比较全面的园林植物叶片功能性状研究。目前国内关于对同一区域内环境梯度变化的研究相对较少，这对全面理解植物适应外界环境的响应机制产生了一定的阻碍。【拟解决的关键问题】本研究以新余市不同环境园林植物为对象，旨在探讨：(1)不同生境园林植物的叶片功能性状特征如何；(2)园林植物叶片功能性状对环境的响应机制如何？通过分析以上问题，深入探讨其叶片功能性状的分布特征及相关性，揭示新余市园林树种的叶功能性状特征量化植物资源利用和配置策略的规律，对园林植物配植以及提高城市绿化建设具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省新余市(114°65′~114°92′N，27°78′~27°81′E)，地处长江中下游低山丘陵区。该地区属于亚热带湿润季风气候区，降雨丰富，光照条件优越，气候条件有利于植物生长。全年平均温度 17.2 ℃，年积温 5 355 ℃，极端高温可达 39.9 ℃，年平均日照时数 1 656.9 h，年蒸发量 504 mm，年均降雨量为 1 600 mm 左右。该区年太阳辐射总量约为 487 kJ/cm^2，年均空气相对湿度达 80%，无霜期有 265 d。利用全国大气环境在线监测和管理平台，获取 SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$、PM_{10}、O_3 和 CO 共 6 种大气污染物的小时浓度数据。

表 1 6种常用园林绿化植物生长特性

Tab.1 Growth characteristics of six commonly used landscaping plants

种类 Species	科 Family	属 Category	生长型 Growthform	生活型 Lifeform
樟 *Cinnamomum camphora*	樟科	樟属	乔木	常绿
罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*	罗汉松科	罗汉松属	乔木	常绿
无患子 *Sapindus mukorossi*	无患子科	无患子属	乔木	落叶
鸡爪槭 *Acer palmatum*	槭树科	槭属	乔木	落叶
石楠 *Photinia serrulata*	蔷薇科	石楠属	灌木	常绿
红花檵木 *Loropetalum chinense*	金缕梅科	檵木属	灌木	常绿

根据新余市大气监测情况、空气湿度和光照条件等因素，分别选取渝水区袁河公园、铁山小区、万年湖湿地公园 3 个研究地点。铁山小区是以钢铁冶炼为主的工业区，采样点处于车流量相对较大，土质坚实，人为破坏较严重的区域。袁河公园为城市矿渣场地生态修复工程，有工业污染背景，土质多为废料渣，有人工进行定期养护与修剪；万年湖湿地公园内植物资源丰富且远离工业污染区，土壤肥沃，湿地面

积大,适合植物生长。在新余市常见的园林物种中,选择应用范围较广、观赏价值较高、抗逆性强的6种具有代表性园林树种(樟 *Cinnamomum camphora*、无患子 *Sapindus mukorossi*、鸡爪槭 *Acer palmatum*、石楠 *Photinia serrulata*、罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*、红花檵木 *Loropetalum chinense*)作为研究对象。

1.2　样品采集

于2024年8月上旬选择晴朗无风天气,对新余市6种园林植物进行叶片采集和光合指标测定。为确保样品具有代表性,本研究在每个研究区内设置3个采样点,共设置9个采样点,各采样点环境条件基本一致。参照《植物功能性状标准化测定手册》,对植物叶片功能性状进行测定和计算。每种园林植物选取3株标准木,采集植株树冠外层的不同方位完整枝条,摘取枝条上成熟、无病虫害的完整叶片,乔木保证每株取20~30片叶片;灌木叶片的采集方法与乔木相同,每株取不少于40片叶片。将叶片装入已编号的保鲜袋内,放入便携式冷藏箱待用。使用Li-6400(Li-CorInc.,USA)便携式光合仪在09:00—11:00进行光合指标测定,在植株南向冠层选取成熟、向阳且健康的叶片来进行测量,每个树种选3株作为重复。

1.3　指标测定

将叶片表面的水分及灰尘擦除,利用精度为0.001 g电子天平称量叶片鲜重(LFW)。沿主叶脉选择上、中、下3个点,采用精度为0.01 mm的电子数显游标卡尺测量,取平均值作为植物的叶片厚度(LT)。使用叶绿素测定仪(SPAD-502Plus,日本)测得的SPAD值来反映叶绿素含量。将采集的叶片剪除叶柄后完全展开放置在CanoScan扫描仪(Lide110)上获取植物叶片扫描图,使用图像处理软件Image J测量叶片面积(LA)。将叶片放入蒸馏水中遮阴浸泡24 h,取出后擦干叶片表面的水分,用电子天平称得叶片饱和鲜重(LSW),随后将叶片置于105 ℃的烘箱中杀青15~20 min再调至80 ℃烘干至恒重,采用电子天平称量每片叶片的干重(LDW)。测定的植物光合指标包括净光合速率(P_n)、胞间CO_2浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。利用上述指标可以计算出叶片含水率(LWC)、叶干物质含量(LDMC)、比叶面积(SLA)、叶组织密度(LTD)、水分利用效率(WUE)、羧化速率(CE):

$$LWC=(LFW-LDW)/(SFW-LDW)\times100\% \quad (1)$$

$$LDMC(mg/mg)=LDW/SFW \quad (2)$$

$$SLA(mm^2/mg)=LA/LDW \quad (3)$$

$$LTD(mg/mm^3)=LDW/(LA\times LT) \quad (4)$$

$$WUE(\mu mol/mmol)=P_n/T_r \quad (5)$$

$$CE(\mu mol/m^2\cdot s)=P_n/C_i \quad (6)$$

$$CV(\text{变异系数})=\text{标准差}/\text{平均值}\times100\% \quad (7)$$

1.4　数据处理

在Excel 2010软件中对收集到的数据进行初步整理与编排,在SPSS 27软件中对数据进行正态性检验。对于满足正态分布且方差具有显著性的数据集,进行事后比较分析,利用Origin 2021软件绘制分析图。运用Pearson相关性分析方法检验叶片功能性状之间的相关性关系,在Canoco 5进行数据分析,采用冗余分析(RDA)分析出叶片各功能性状之间的关系,同时采用变异系数计算各个功能性状的变异程度。

2　结果与分析

2.1　不同生境下植物叶片结构性状特征

由图1可知,植物叶片的结构型性状反映了植物对不同生境的适应性调整。在铁山小区生境(TS)和袁河公园生境(YH)中,LT、LDMC和LWC由高到低依次为常绿乔木(ET)、常绿灌木(ES)、落叶乔木(DT),而SLA大小则与其相反,这些差异在统计学上均具有显著性($P<0.05$)。在TS生境中,LA和LTD在不同生活型植物间差异显著($P<0.05$),而在YH生境中则无显著性差异($P>0.05$)。在万年湖公园生境(WNH)中,LT和LWC呈现出常绿乔木高于常绿灌木高于落叶乔木的趋势,LA和SLA反之。可见,同种生活型的植物尽管拥有相似的生活策略,但在不同生境条件下,其叶片的结构型性状却展现出了差异

性。常绿乔木和落叶乔木在TS小生境中的LTD显著高于YH和WNH(P<0.05),而常绿乔木中LWC则相反(P<0.05);落叶乔木在WNH生境中的LDMC显著低于TS与YH生境(P<0.05)。相比之下,常绿灌木在3个生境间均无显著性差异(P>0.05)。

在不同生境条件下,各叶片性状均出现不同程度的变异情况,其中TS生境中的LA变异系数最大,达到了88.18%,而该生境中LWC的变异系数最小,仅为11.72%。在TS生境中,各叶片性状间变异范围为11.72%~88.17%;YH生境中各性状变异范围为13.61%~48.24%;WNH生境叶片性状变异范围为13.63%~61.74%。此外,不同生境间植物叶片的LA、SLA及LTD的变异由大到小均呈现出TS、WNH和YH的趋势,而LDMC和LT的变异由大到小依次为YH、WNH和TS,LWC的变异由大到小依次为WNH、YH和TS。

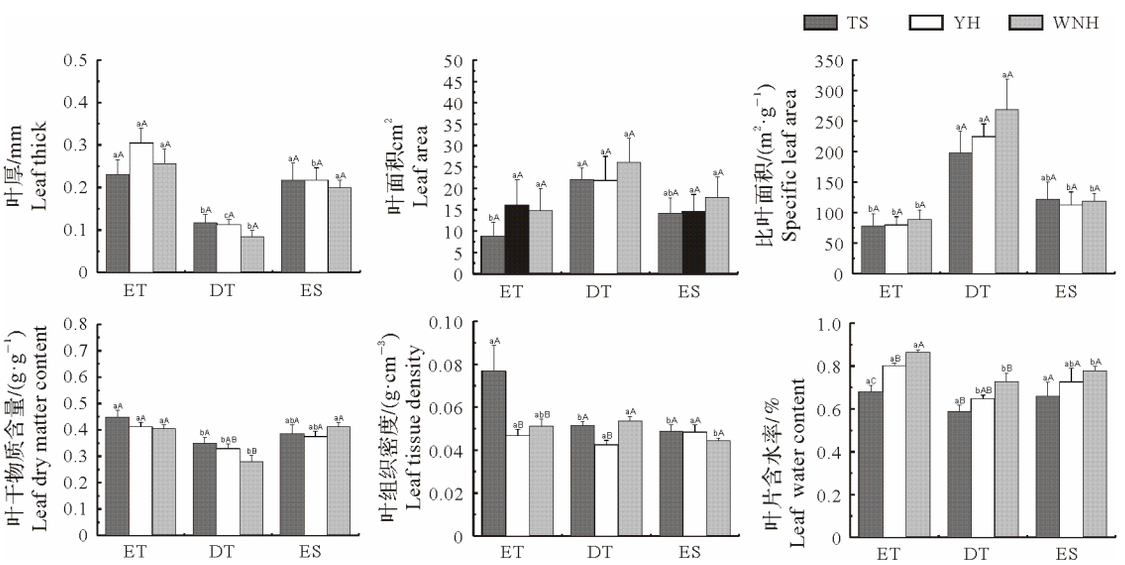


图1 不同生境下植物叶片的结构型性状

Fig.1 Structural traits of plant leaves in different habitats

2.2 不同生境下植物叶片功能型性状特征

由图2可知,不同生活型的园林植物,其功能型性状在各生境中呈现出一定的差异性。在TS与YH生境中,落叶乔木的P_n和CE高于常绿灌木与常绿乔木,SPAD、C_i、T_r及WUE在不同生活型间存在显著差异(P<0.05)。WNH生境中落叶乔木的P_n、T_r及CE表现最优,常绿乔木次之,常绿灌木则相对较弱;而

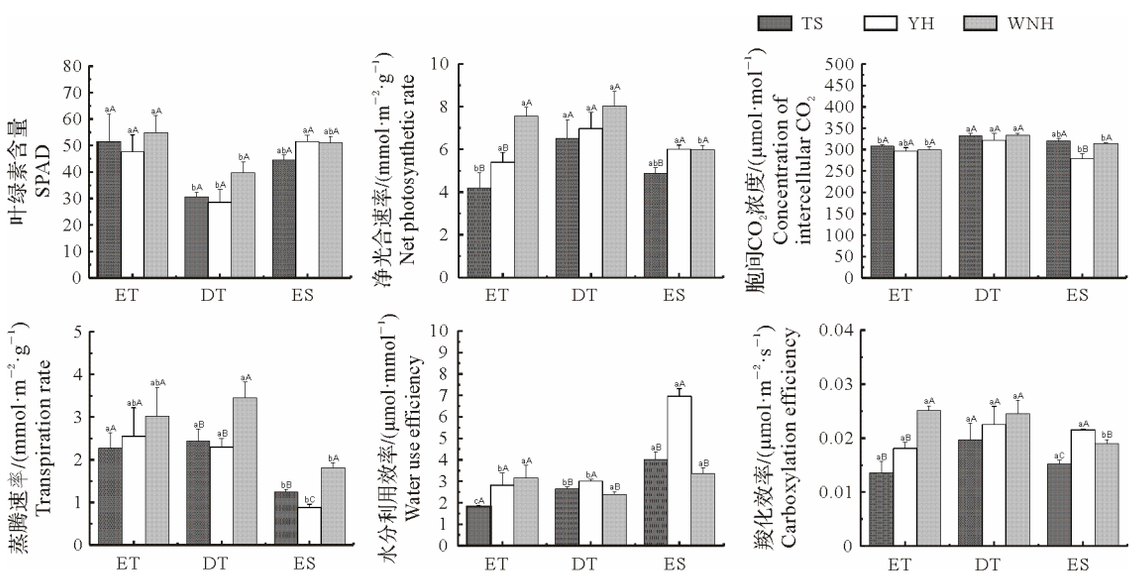


图2 不同生境下植物叶片的功能型性状

Fig.2 Functional traits of plant leaves in different habitats

WUE反之。此外,落叶乔木的C_i显著高于常绿乔木与常绿灌木(P<0.05),而常绿乔木的SPAD值高于常绿灌木与落叶乔木,且这一差异在统计上具有显著性(P<0.05)。对于同种生活型植物而言,其在不同生境中的表现亦有所不同。常绿乔木在WNH生境中的P_n与CE显著高于TS与YH生境(P<0.05);落叶乔木在YH生境中的WUE显著高于TS与WNH生境(P<0.05),而在WNH生境中的T_r显著高于TS与YH生境(P<0.05)。常绿灌木在TS生境中的P_n显著低于YH与WNH(P<0.05),但C_i在TS生境中却显著高于其他生境(P<0.05),而WUE则表现为YH生境显著高于TS和WNH(P<0.05),Tr表现与落叶乔木一致。

不同生境条件下,各生活型植物叶片的功能型性状都发生了不同程度的变异。其中,TS生境中的T_r变异最大,变异系数达到52.86%,该生境下C_i的变异最小,仅为4.98%。在TS生境中,各功能型性状间的变异范围为4.98%-52.86%;YH生境中则为7.37%~32.25%;在WNH生境中,变异范围是8.56%~37.29%。就生境间变异而言,T_r与WUE的变异大小呈现TS、WNH和YH的变化趋势,P_n与SPAD的变异大小为TS、YH和WNH,C_i的变异大小排序为WNH、YH和TS,而CE的变异大小则为YH、TS和WNH。

2.3　不同生境植物叶片功能性状的相关分析

从表2结果可知,植物叶片的LDMC与SLA,LT与SLA均呈极显著负相关(P<0.01)。在TS生境中,LDMC与LT、LTD,LT与LTD、LWC均呈极显著正相关(P<0.01);SLA与LTD呈极显著负相关(P<0.01)。YH生境中,LDMC与LWC,LT与LTD、LWC均呈现极显著正相关(P<0.01),SLA与LWC则呈现极显著负相关(P<0.01)。WNH生境下的LDMC与LT也呈现出极显著的正相关关系(P<0.01)。

表2　不同生境下各叶片结构性状间的相关性

Tab.2　The correlation between leaf structural traits in different habitats

变量	TS					YH					WNH				
Variable	LA	LDMC	LT	SLA	LTD	LA	LDMC	LT	SLA	LTD	LA	LDMC	LT	SLA	LTD
LDMC	−0.092					0.546*					−0.157				
LT	−0.161	0.928**				−0.199	0.554*				−0.321	0.843**			
SLA	0.078	−0.932**	−0.911**			−0.001	−0.732**	−0.928**			−0.034	−0.892**	−0.864**		
LTD	−0.481*	0.712**	0.622**	−0.606**		−0.336	0.11	0.611**	−0.553*		−0.079	−0.216	0.131	0.035	
LWC	−0.102	−0.585*	0.710**	−0.457	0.421	0.132	−0.671**	0.673**	−0.662**	0.522*	−0.37	−0.186*	0.373	−0.078	−0.154

*表示显著相关(P<0.05),**表示极显著相关(P<0.01);TS:铁山小区;YH:袁河公园;WNH:万年湖湿地公园;LA:叶面积;LDMC:leaf dry matter content;LT:Leaf thickness;SLA:Specific leaf area;LTD:Leaf tissue density;LWC:Leaf water content。

*Means significant correlations at the P<0.05 level, indicates moderate statistical significance; **Means significant correlations at the P<0.01 level, indicates strong statistical significance; TS: Tieshan Community; YH: Yuanhe Park; WNH: Wannianhu Wetland Park; LA: Leaf area; LDMC: leaf dry matter content; LT: Leaf thickness; SLA: Specific leaf area; LTD: Leaf tissue density; LWC: Leaf water content.

由表3可知,不同生境下园林植物叶片功能型性状间的相关性具有一定的差异。所有生境中,P_n与CE都呈极显著正相关(P<0.01)。在TS生境中T_r与P_n、CE极显著正相关(P<0.01),SPAD与P_n则呈极显著负相关(P<0.01);YH生境中,SPAD与C_i,WUE与C_i、T_r均呈极显著负相关(P<0.01);SPAD与WUE,T_r与P_n、CE在WNH生境中呈极显著正相关(P<0.01),而SPAD与C_i,WUE与T_r呈极显著负相关(P<0.01)。这表明园林植物通过调整叶片性状来采取不同的生存策略来适应其所处生境。

基于上述相关性分析结果,将园林植物6种叶功能型性状指标SPAD、P_n、C_i、T_r、WUE、CE作为响应变量,6种叶结构型性状指标LA、SLA、LT、LDMC、LTD、LWC作为解释变量,进一步展开植物叶片结构型性状和功能型性状的冗余分析。由图3可知,不同生境下结构型性状与功能型性状之间的关系存在不同表现。TS生境中,结构型性状因子分别解释了功能型性状的50.07%和15.18%,累计解释量达65.25%。可以看出前2轴可以很好的反映出结构型性状和功能型性状之间的关系,且轴1起决定作用。结构型性状因子中LT达到了显著水平(P<0.05),LA达到了极显著水平(P<0.01),具体表现为LT与SPAD、WUE呈正相关关系,与其他功能型性状呈负相关关系,LA与SPAD呈负相关关系,和其他功能型性状均呈正相关关系;YH生境中,前2个排序轴的解释率为38.27%和32.34%,累计解释量为76.12%,说明可以较好表达

结构型性状和功能型性状之间的相关性。结构型性状因子SLA、LA和LWC均达到极显著水平($P<0.01$),具体表现为LA与SPAD、WUE呈负相关关系,与其他性状呈正相关关系,SLA与C_i、T_r呈正相关关系,与其他性状呈负相关关系,而LWC与SPAD、WUE、CE呈正相关关系,与P_n、C_i、T_r呈负相关关系;WNH生境中,轴1解释率为51.60%,轴2解释率为24.52%,合计累积量达到了76.12%,且结构型性状和功能型性状的相关性主要由轴1决定。结构型性状因子SLA达到了显著水平($P<0.05$),LA和LT达到极显著水平($P<0.01$),LA和SLA具体表现与YH生境一致,LT则与LA相反。

表3 不同生境下各叶片生理性状间的相关性

Tab.3 The correlation between physiological traits of leaves in different habitats

变量	TS					YH					WNH				
Variable	SPAD	P_n	C_i	T_r	WUE	SPAD	P_n	C_i	T_r	WUE	SPAD	P_n	C_i	T_r	WUE
P_n	−0.626**					−0.153					−0.111				
C_i	−0.571*	0.178				−0.684**	−0.061				−0.888**	0.077			
T_r	−0.541*	0.689**	−0.084			−0.501*	0.470*	0.359			−0.494*	0.856**	0.317		
WUE	−0.082	0.222	0.312	−0.512*		0.526*	−0.177	−0.621**	−0.827**		0.785**	−0.530*	−0.589*	−0.863**	
CE	−0.581*	0.994**	0.068	0.709**	0.189	0.078	0.923**	−0.429	0.277	0.092	0.126	0.964**	−0.183	0.757**	−0.361

*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$);TS:铁山小区;YH:袁河公园;WNH:万年湖湿地公园;SPAD:叶绿素含量;P_n:净光合速率;C_i:胞间CO_2浓度;T_r:蒸腾速率;WUE:water use efficiency;CE:carboxylation efficiency。

*Means significant correlations at the $P<0.05$ level, indicates moderate statistical significance; **Means significant correlations at the $P<0.01$ level, indicates strong statistical significance; TS: Tieshan Community; YH: Yuanhe Park; WNH: Wannianhu Wetland Park; SPAD: chlorophyll content; P_n: net photosynthetic rate; C_i: concentration of Intercellular CO_2; T_r: transpiration rate; WUE: water use efficiency; CE: carboxylation efficiency.

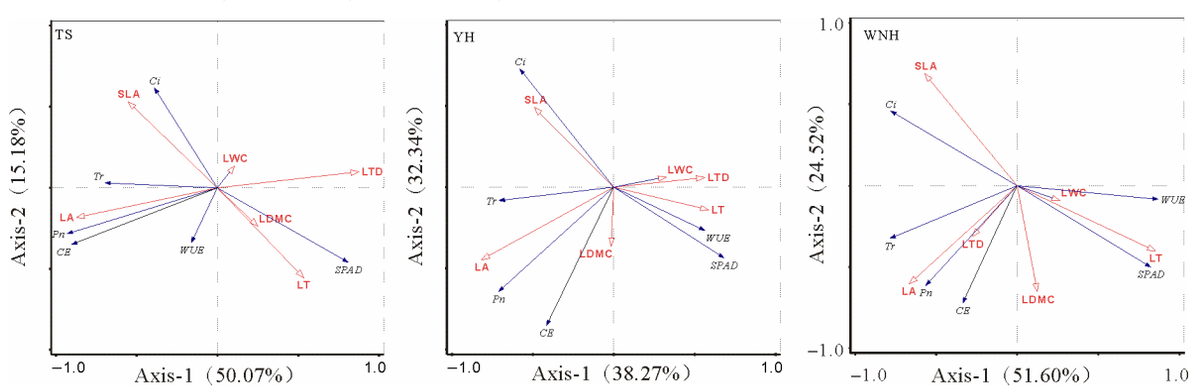


图3 不同生境叶片结构型性状和功能型性状冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis of structural and functional traits of leaves in different habitats

3 讨 论

3.1 园林植物结构型性状对不同生境的响应

随着工业化的加速发展与能源消耗量激增,大气污染问题日趋恶化,这对园林植物的健康生长造成了严重的负面影响[19]。尽管园林植物本身具备新陈代谢功能,且对大气污染具有一定的解毒能力和适应性[20]。若园林植物长期暴露于受污染的大气环境中,其生理机能仍会受到不同程度的损害。在不同生境下,同种植物根据各生境污染程度不同来进行有效资源配置,以适应大气胁迫。在不同生境中植物受到多种环境因素的共同作用,因此展现出显著差异性[21]。本研究发现,叶面积、比叶面积、叶组织密度的变异程度均在铁山小区生境中最为显著,而在袁河公园生境相对较低,这表明园林植物在水热条件及大气状况异质化的环境下,通过叶片形态的显著变化来对不同生境做出响应。此外,叶面积作为衡量植物固碳能力的重要指标,在所有生境中变异程度均为最高,这一结果与过往结论基本一致[22],进一步说明植物生长在面临外界干扰时,其叶面积能准确反映出不同生境差异的观点。园林植物面对大气污染胁迫可能会增加对保护组织构建的投入,进而提升自身的生命活力和抗逆性,这一适生策略往往导致其

比叶面积呈现缩减的趋势,反映了植物在不利环境下优化资源配置、增强自我保护能力的智慧。叶干物质含量是衡量植物养分保持能力的一个重要参数[23]。一般而言,大气污染越严重的区域植物的叶干物质含量往往较高,本研究结果同样支持这一结论,分析其原因可能是园林植物通过增加叶干物质含量作为一种适应性机制,以抵御或减轻大气污染带来的负面影响[24]。诸多研究[25-26]指出比叶面积的大小是植物在复杂环境下的权衡表现。本研究中园林植物的比叶面积为万年湖公园最大,袁河公园次之,铁山小区最小。而植物的叶干物质含量大小恰巧与之相反,这一现象可能与铁山小区相对贫瘠的植物生长环境密切相关,且钢厂排放的大气污染物会破坏叶片细胞结构,使得植物比叶面积减小,而为了应对这种生存压力,植物可能将增加叶干物质含量作为一种响应机制。进一步分析发现,万年湖公园生境植物叶片含水率大于其他生境,这可能是由于大气污染物通过气孔进入叶片并溶解,影响叶片对水分的摄取和蒸腾,从而降低叶片含水率[27]。本研究发现,铁山小区生境中植物叶厚度、叶组织密度均大于其他生境,这可能与大气污染对植物叶片造成毒害导致叶片组织结构的破坏和叶片密度的改变有关,进而影响园林植物叶片的厚度和组织密度[28]。

3.2　园林植物功能型性状对不同生境的响应

在所有生境中,落叶乔木相较于其他生活型植物表现出更低的SPAD值,这可能与园林植物的遗传特性有关[29]。光合作用不仅是植物生长与生物量积累的根本基础,同时还承担生态系统物质循环的重要任务。大气胁迫条件下,园林植物叶片气孔导度减小,CO_2进入叶片受阻进而造成光合作用下降[30]。胞间CO_2浓度对光合作用至关重要,其水平由大气中的CO_2含量、植物生长环境等多种要素综合决定。本研究显示,袁河公园生境植物叶片呈现出比其他生境更低的胞间CO_2浓度,推测这与不同生境间光照强度的差异程度有关;由于公园构筑物遮挡可能使光照强度减弱,导致植物气孔的开合状态受到阻碍,进而对植物的净光合速率产生了影响[22]。万年湖公园生境内的水热条件存在着显著且频繁的变化,这种多变的环境因素直接导致了植物体内蒸腾速率的增加。为了应对高强度的水分散失,园林植物展现出调整生理机制的响应策略,然而这一适应过程使生境内整体水分利用效率下降[31]。在植物漫长的环境适应进程中,其生理特性、遗传背景及外界环境等多重因素共同作用于植物性状的塑造与发展,这些性状之间相互作用,最终促使植物形成了适应胁迫环境的能力[32]。

3.3　园林植物叶性状间的相关关系

园林植物的叶片各功能性状间存在一定的相关性,这些功能性状不同的调配策略使园林植物能够适应不同生境。本研究结果显示,叶片含水率与叶干物质含量之间存在着极显著负相关关系(P<0.01),同时在部分生境中也表现出显著的负相关关系(P<0.05)。这一结果有力地证实了当植物叶干物质含量增加时,叶片含水率相应减少的普遍规律。此外,研究深入揭示了叶干物质含量与叶片厚度之间存在着极显著正相关关系(P<0.01),这进一步证实了铁山生境下的植物通过增加叶片厚度来提高叶干物质含量,以此作为维持体内水分平衡的一种有效适应策略[33]。万年湖公园生境凭借其优越的水热条件和较低的大气污染水平,为植物提供了一个相对适宜的生存环境。该生境下植物叶片展现出较大的叶面积、较小的比叶面积以及较低的叶密度特征。这些特征使得植物能够更好地利用环境条件,特别是通过提升叶片胞间CO_2浓度来有效增强净光合速率。这一系列优化行为使得植物能够加速生长、更高效地积累生物量,为自身的生存和繁衍奠定了坚实的基础[34]。冗余分析发现植物叶片结构型性状对功能型性状的整体解释率都较高,有效地揭示了结构型性状和功能型性状的相关性。研究中,叶厚对叶片功能型性状的贡献率最大,这是因为叶片厚度越厚越有助于植物对水分和养分的保持,同时也有利于光合作用的进行。叶面积对叶片功能型性状的贡献率相对较小,可能是因为叶片在生长过程中对内部资源分配受到限制[35]。叶片功能性状之间的相互关系体现了不同环境下植物的适应策略和生长表现,这表明园林植物的叶片形态具有显著的适应性与可塑性。

4　结　论

(1)在不同生境条件下,常绿乔木树种和落叶乔木树种的LTD均呈现出铁山小区生境高于其他生境的趋势,常绿灌的LTD木则无显著差异。变异系数最大为铁山小区生境LA,最小为LWC。

(2)在不同生境条件下,对于植物功能型性状,常绿乔木在万年湖公园生境中的P_n与CE高于其他生

境，落叶乔木在袁河公园生境的WUE高于其他生境，而常绿灌木在铁山小区生境的P_n较低、C_i较高。变异系数最大为铁山小区生境T_r，最小为C_i。

（3）万年湖公园生境的LA显著高于铁山小区生境（$P<0.05$），铁山小区生境的P_n、T_r较袁河公园生境和万年湖公园生境均显著偏低（$P<0.05$）。

（4）冗余分析结果表明，前2轴共同解释了不同生境叶片功能型性状的65.25%、70.61%、76.12%，其中LT、LTD为主导因子。

综上所述，6种典型园林植物在不同生境下各性状出现了差异化，其中万年湖公园植物具有较好的生长趋势，这是其对不同环境长期适应的结果。通过深入理解不同大气污染环境下植物功能性状的差异及其适应机制，结合生产实践进行科学规划与管理，可以更好地发挥园林植物的生态价值，同时还可以促进城市生态系统的可持续发展。

参考文献 References：

[1] DÍAZ S, HODGSON J G, THOMPSON K, et al.The plant traits that drive ecosystems: evidence from three continents[J]. Journal of vegetation science, 2004, 15(3): 295-304.

[2] 代玲，张梦玉，邱东，等.不同微生境毛尖紫萼藓形态结构性状差异性与协变特征[J].江西农业大学学报，2024，46(3)：726-735.
DAI L, ZHANG M Y, QIU D, et al.Differences in morphological traits and covariation characteristics of Grimmia pilifera in different microhabitats[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(3): 726-735.

[3] PÉREZ-HARGUINDEGUY N, DÃAZ S, GARNIER E, et al.New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide[J].Australian journal of botany, 2013, 61(3): 167-234.

[4] 赵广帅，刘珉，石培礼，等，羌塘高原降水梯度植物叶片、根系性状变异和生态适应对策[J].生态学报，2020，40(1)：295-309.
ZHAO G S, LIU M, SHI P L, et al.Variation of leaf and root traits and ecological adaptive strategies along a precipitation gradient on Changtang Plateau[J].Acta ecologica Sinica, 2020, 40(1): 295-309.

[5] YING L, WENZEL K, HELGE B, et al.Crown and leaf traits as predictors of subtropical tree sapling growth rates[J].Journal of plant ecology, 2017, 10(1): 136-145.

[6] LE L, LUKE M M, CHENGEN M, et al.Leaf economics and hydraulic traits are decoupled in five species-rich tropical-subtropical forests[J].Ecology letters, 2015, 18(9): 899-906.

[7] SANDRA D, JENS K, C H J C, et al.The global spectrum of plant form and function.[J].Nature, 2016, 529(7585): 167-171.

[8] 黄庆阳，谢立红，曹宏杰，等.五大连池火山山杨叶功能性状的变异特征[J].北京林业大学学报，2021，43(2)：81-89.
HUANG Q Y, XIE L H, CAO H J, et al.Variation characteristics of leaf functional traits of *Populus davidiana* in Wudalianchi Volcano, northeastern China[J].Journal of Beijing forestry university, 2021, 43(2): 81-89.

[9] WRIGHT J I, REICH B P, WESTOBY M, et al.The worldwide leaf economics spectrum[J].Nature, 2004, 428(6985): 821-827.

[10] 刘远瞻，徐晓，刘浩，等.中国滨海盐沼互花米草和芦苇叶片功能性状的纬度梯度变异[J].复旦学报(自然科学版)，2020，59(4)：381-389.
LIU Y Z, XU X, LIU H, et al.Latitude gradient variations of leaf functional traits of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* along the coastal saltmarshes of China[J].Journal of Fudan university(natural science), 2020, 59(4): 381-389.

[11] 何雅琴，史晓洁，陈国杰，等.滨柃叶功能性状对环境因子的响应[J].生态学报，2022，42(6)：2418-2429.
HE Y Q, SHI X J, CHEN G J, et al.Response and adaptation of leaf functional traits of *Eurya emarginata* to environmental factors[J].Acta ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2418-2429.

[12] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al.Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J].The new phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[13] READ Q D, MOORHEAD L C, SWENSON N G, et al.Convergent effects of elevation on functional leaf traits within and among species[J].Functional ecology, 2014, 28(1): 37-45.

[14] 刘旻霞，于瑞新，穆若兰，等.兰州北山不同海拔3种典型绿化树种光合特性研究[J].生态环境学报，2021，30(10)：1943-1951.

LIU M X, YU R X, MU R L, et al.Photosynthetic characteristics of three typical tree species at different altitudes in Beishan, Lanzhou[J].Ecology and environmental sciences, 2021, 30(10): 1943-1951.

[15] 王钰雯,何梅香,江国东,等.乌蒙乡不同海拔梯度刺叶高山栎叶功能性状特征及其对环境因子的响应[J].生态学报,2024,44(16):7238-7248.
WANG Y W, HE M X, JIANG G D, et al.Characteristics of leaf functional traits of *Quercus spinosa* and their responses to environmental factors at different altitude gradients in Wumeng township[J].Acta ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7238-7248.

[16] 欧芷阳,郑威,庞世龙,等.广西猫儿山优势木本植物叶功能性状关联性沿海拔梯度的变化规律[J].生态科学,2024,43(2):95-101.
OU Z Y, ZHENG W, PANG S L, et al.Altitude variation in covariation of the leaf functional traits of dominant woody plants in Mao'er Mountain of Guangxi[J].Ecological science, 2024, 43(2): 95-101.

[17] NIINEMETS, KEENAN T F, HALLIK L.A worldwide analysis of within-canopy variations in leaf structural, chemical and physiological traits across plant functional types.[J].The new phytologist, 2015, 205(3): 973-993.

[18] TIAN M, YU G R, HE N P, et al.Leaf morphological and anatomical traits from tropical to temperate coniferous forests: mechanisms and influencing factors[J].Scientific reports, 2016, 6(1): 19703.

[19] 王会京,谢宇光,王月惠.河北省大气污染对不同绿化植物生理生态特性的影响[J].水土保持研究,2017,24(3):170-176.
WANG H J, XIE Y G, WANG Y H, et al.Impacts of air pollution on physiological and ecological characteristics of urban green plants in Hebei Province[J].Research of soil and water conservation, 2017, 24(3): 170-176.

[20] 段德超,于明革,施积炎.植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J].应用生态学报,2014,25(1):287-296.
DUAN D C, YU M G, SHI J Y, et al.Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants[J].Chinese journal of applied ecology, 2014, 25(1): 287-296.

[21] 李娟霞,何靖,孙一梅,等.10种园林植物功能性状对大气污染的生理生态响应[J].生态环境学报,2020,29(6):1205-1214.
LI J X, HE J, SUN Y M, et al.Physiological and ecological responses of ten garden plant functional traits to air pollution[J].Ecology and environmental sciences, 2020, 29(6): 1205-1214.

[22] 周汀,崔迎春,叶雨艳,等.不同小生境下典型喀斯特森林植物叶片功能性状特征[J].中南林业科技大学学报,2022,42(10):129-140.
ZHOU T, CUI Y C, YE Y Y, et al.Leaf functional traits of typical karst forest plants under different niches[J].Journal of central south university of forestry & technology, 2022, 42(10): 129-140.

[23] 白岩松,张雨鉴,秦倩倩,等.大兴安岭典型灌木叶片功能性状对环境因子的响应[J].生态学杂志,2024,43(1):131-139.
BAI Y S, ZHANG Y J, QIN Q Q, et al.Responses of leaf functional traits in typical shrubs to environmental factors in the Daxing'an Mountains, Northeast China[J].Chinese journal of ecology, 2024, 43(1): 131-139.

[24] 朱济友,徐程扬,覃国铭,等.3种典型绿化植物叶功能性状对大气污染的响应及其叶经济谱分析:以北京市为例[J].中南林业科技大学学报,2019,39(3):91-98.
ZHU J Y, XU C Y, QIN G M, et al.Responses of leaf functional characters of three typical greening plants to air pollution and leaf economic spectrum analysis: a Beijing city as the study case[J].Journal of central south university of forestry & technology, 2019, 39(3): 91-98.

[25] 杨芷毓,张兴,张洪运,等.苏州市城市公园常见植物叶功能性状对热环境的响应机制研究[J].东北农业大学学报,2023,54(7):14-24.
YANG Z Y, ZHANG X, ZHANG H Y, et al.Study on response of leaf functional traits of common street trees to urban thermal environment in Suzhou City[J].Journal of northeast agricultural university, 2023, 54(7): 14-24.

[26] 刘贵峰,刘玉平,达福白乙拉,等.大青沟自然保护区主要森林群落优势种的叶性状[J].生态学报,2017,37(14):4646-4655.
LIU G F, LIU Y P, BAIYILA D F, et al.Leaf traits of dominant plants of main forest communities in Daqinggou Nature Reserve[J].Acta ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4646-4655.

[27] 贾明云,李密密,周冬琴,等.南京5种园林植物对大气污染物的综合净化能力[J].江苏农业科学,2019,47(23):158-163.

JIA M Y, LI M M, ZHOU D Q, et al.Comprehensive purification ability of five garden plants to atmospheric pollutants in Nanjing City[J].Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(23): 158-163.

[28] 肖以华, 付志高, 许涵, 等.城市化对珠江三角洲不同功能群植物叶片功能性状的影响[J].生态环境学报, 2022, 31(9): 1783-1793.
XIAO Y H, FU Z G, XU H, et al.Effects of urbanization on leaf functional traits of different functional groups in Pearl River Delta[J].Ecology and environmental sciences, 2022, 31(9): 1783-1793.

[29] 夏霁晖, 冶佩霞, 杨海, 等.大别山北缘不同生活型木本植物叶功能性状及其耦合关系[J].浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 970-977.
XIA J H, YE P X, YANG H, et al.Leaf functional traits and their coupling relationships of woody plants with different life forms in the northern Dabie Mountains[J].Journal of Zhejiang A&F university, 2024, 41(5): 970-977.

[30] 王秋艳, 王利芬, 肖湘东, 等.苏州市夏季园林植物光合特性及固碳释氧、降温增湿效益研究[J].福建农业学报, 2023, 38(11): 1302-1311.
WANG Q Y, WANG L F, XIAO X D, et al.Summertime photosynthesis, carbon-fixation, oxygen-release, atmosphere-cooling, and humidifying effect of landscape plants in Suzhou[J].Fujian journal of agricultural sciences, 2023, 38(11): 1302-1311.

[31] 刘海涛, 李亚亮, 王曦, 等.淮南市9种园林灌木树种夏季光合特性研究[J].生态科学, 2019, 38(1): 168-175.
LIU H T, LI Y L, WANG X, et al.Photosynthetic characteristics of nine gardening shrub species in the summer of Huainan City[J].Ecological science, 2019, 38(1): 168-175.

[32] 余林兰, 罗奕杏, 薛跃规, 等.神木天坑不同小生境木本植物叶功能性状的差异与关联[J].广西植物, 2023, 43(3): 494-503.
YU L L, LUO Y X, XUE Y G, et al.Differences and correlations in leaf functional traits of woody plants in different microhabitats of Shenmu Tiankeng[J].Guihaia, 2023, 43(3): 494-503.

[33] 金楠, 段志宇, 冯磊鋆, 等.云南哀牢山南洋木荷叶片功能性状沿树冠高度的垂直变异[J].西部林业科学, 2024, 53(6): 39-45.
JIN N, DUAN Z Y, FENG L Y, et al.Variation in leaf functional traits of schima noronhae tree along different canopy gradients in Ailao Mountains, Yunnan[J].Journal of west China forestry science, 2024, 53(6): 39-45.

[34] 罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等.38个榛种质资源叶功能性状与光合特征变异及其相关性[J].生态学杂志, 2021, 40(1): 11-22.
LUO D, SHI Y J, SONG F H, et al.Variation and correlation of leaf functional traits and photosynthetic characteristics of 38 hazelnut germplasm resources[J].Chinese journal of ecology, 2021, 40(1): 11-22.

[35] 周友秀, 杨桂梅, 秦子博, 等.海岸草本植物细根、叶片功能性状及其与土壤因子的关系[J].广西植物, 2023, 43(11): 1975-1985.
ZHOU Y X, YANG G M, QIN Z B, et al.Fine root and leaf functional traits of coastal herbs and their relationship with soil factors[J].Guihaia, 2023, 43(11): 1975-1985.