

## 7 种园林绿化灌木叶片功能性状及生态化学计量特征

霍灿灿, 朱栗琼, 龙孟元, 招礼军\*

广西大学林学院/广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004

**摘要:** 研究南宁市大学东路分车绿带 7 种绿化灌木叶片功能性状及生态化学计量特征, 为类似环境下城市道路绿化植物的选择、配置及城市生态工程建设提供理论依据。结果表明: 7 种灌木的叶面积 (LA)、比叶面积 (SLA)、干物质含量 (LDMC)、叶含水量 (LWC) 和叶绿素含量 (Chl) 平均值分别为 15.68 cm<sup>2</sup>、136.33 cm<sup>2</sup>/g、0.24 g/g、76.42% 和 9.36 mg/g; 叶片 N、P、K 含量, N : P、N : K 和 K : P 的平均值分别为 21.23 mg/g、0.39 mg/g、9.37 mg/g、55.48、2.28 和 25.14。不同灌木种叶片功能性状与生态化学计量之间存在显著差异。相关性分析表明: 叶片 N、N : P、N : K 与 SLA、Chl 均呈极显著正相关, 叶片 P 与 LWC 呈显著正相关, 叶片 K 与 LWC 呈显著正相关。冗余分析表明: 第 1、2 排序轴共同解释了叶片生态化学计量特征总变异的 93.51%, 其中对叶片生态化学计量影响显著的叶功能性状因子为 SLA、LWC、Chl。主成分综合分析表明: 金叶假连翘、朱槿和台琼海桐表现出较好的生长状况和资源利用效率, 对研究区的环境有更好适应能力, 因此适合作为城市园林规划所需的重要树种。

**关键词:** 园林绿化灌木; 叶片; 功能性状; 生态化学计量; 相关性分析

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

## Functional Characters and Eco Stoichiometric Characteristics of Leaves of Seven Landscape Shrubs

HUO Cancan, ZHU Liqiong, LONG Mengyuan, ZHAO Lijun\*

Forestry College, Guangxi University / Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract:** The leaf functional properties and eco stoichiometric characteristics of seven greening shrubs in the split green belt of University East Road in Nanning were studied to provide a theoretical basis for the selection and allocation of urban road greening plants and the construction of urban ecological engineering in similar environments. The average value of leaf area (LA), specific leaf area (SLA), dry matter content (LDMC), leaf water content (LWC) and chlorophyll content (Chl) of the seven shrubs was 15.68 cm<sup>2</sup>, 136.33 cm<sup>2</sup>/g, 0.24 g/g, 76.42 % and 9.36 mg/g respectively. The average value of N, P, K, N : P, N : K and K : P in the leaves was 21.23 mg/g, 0.39 mg/g, 9.37 mg/g, 55.48, 2.28 and 25.14 respectively. There were significant differences in leaf functional traits and eco stoichiometry among different shrub species. Correlation analysis showed that N, N : P and N : K in the leaves were significantly positively correlated with SLA and CHL, and P in the leaves was significantly positively correlated with LWC. In addition, K in the leaves was significantly positively correlated with LWC. Through redundancy analysis, it was found that the first and second ranking axes jointly explained 93.51% of the total variation of leaf eco stoichiometric characteristics. Among them, SLA, LWC and Chl were the leaf functional trait factors that have a significant impact on leaf eco stoichiometry. Principal component comprehensive analysis showed that the growth status and resource utilization efficiency of *Forsythia suspensa*, *Hibiscus rosasinensis* L. and *Pittosporum pentandrum* var. *formosanum* were better. In addition, the shrubs have better adaptability to the environment of the study area, so they are suitable to be used as important tree species for urban landscape planning.

收稿日期 2022-05-10; 修回日期 2022-05-26

基金项目 广西林业科技推广示范项目 (桂林科研[2022]第 1 号); 国家自然科学基金项目 (No. 31560061)。

作者简介 霍灿灿 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林生态学。\*通信作者 (Corresponding author): 招礼军 (ZHAO Lijun), E-mail: Zhlj-70@163.com。

**Keywords:** landscaping shrubs; leaf; functional traits; ecological stoichiometry; correlation analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.02.013

叶片是植物进行光合作用最重要的器官,具有较强的可塑性,其功能性状与生态化学计量特征反应植物对环境的适应性、自我调节及由此形成的生长策略,与资源配置、补偿和平衡有着密切联系,成为研究植物与环境之间关系的桥梁<sup>[1-2]</sup>。叶功能性状包括形态和生理指标,如叶面积(LA)、比叶面积(SLA)、叶片干物质含量(LDMC)、叶片含水量(LWC)、叶绿素含量(Chl)等,可较全面地指示植物对环境变化的响应和对资源的利用效率<sup>[3-4]</sup>。生态化学计量学是生态系统营养元素平衡关系的学科,为研究N、P、K等元素在环境中的平衡与耦合关系提供了新方向,N、P、K元素在植物体内积累以及相对应计量比(N:P、N:K、K:P)的平衡是植物生长的重要表征<sup>[5-6]</sup>。

已有研究发现,叶片功能性状可以直观对比相同生境下不同生活型植物适应性之间的差异,琅岐岛4种优势植物的SLA与LDMC均呈极显著负相关;LDMC与LD呈极显著正相关;其中,台湾相思的LDMC最小,柠檬桉最大;高山榕的LA最大<sup>[7]</sup>。灌木自身的内稳态调节较强,其叶片N、P元素与叶片含水量、SLA具有显著相关性<sup>[8]</sup>。N、P是植物生长的主要限制元素,K调节植物体内能量和水分代谢,能增强机体对逆境的抗性,N、P、K计量比作为重要的生理指标不仅反映植物生长速度,且与植物对其利用效率显著相关<sup>[9-10]</sup>。然而,这些研究通常对叶片功能性状或叶生态化学计量进行单一研究,而关于不同灌木种之间的叶功能性状、叶生态化学计量及二者关系的综合性研究甚少。

道路分车绿带是城市园林绿化的重要部分,可做组建生态路基的通道。由于南宁地处广西中心,交通繁忙且所属低纬度地区,噪音污染和尾气污染相对较严重,冬季气候干燥,降雨少;加上热岛效应的影响,环境温度升高,分车绿带的植物受到的太阳辐射也较多;该区土壤所含有机质及磷和钾矿物质元素较少。因此,该地区代表性植被是耐贫瘠、耐旱且滞尘能力较强的常绿与落叶阔叶林,其中灌木占27.38%<sup>[11-12]</sup>。园林绿化灌木是城市绿地的重要组成部分,在调节城市温湿度,滞尘降噪及绿化建设工程等方面发挥着不

可替代的作用,具有较高的生态价值<sup>[13-14]</sup>。目前,关于绿化灌木的研究主要集中在滞尘能力及抗性方面,而对于叶片功能性状和生态化学计量方面的研究比较缺乏。鉴于此,本研究以相同生境下的7种园林绿化灌木为研究对象,分析其叶片功能性状与生态化学计量特征,探讨其相关关系,揭示综合影响生态化学计量的主要功能性状因子,筛选出研究区内适生性较优良的灌木种,补充灌木叶片功能性状与生态化学计量研究的不足,进而为类似环境下城市园林植物的选择与配置,以及城市生态工程建设提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

研究区位于广西南宁市(107°45'~108°51'E, 22°13'~23°32'N),属于温润的亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温暖干燥,春秋季节气候温和且短暂。年平均温度约21.6℃,1月平均温度12.8℃,极端最高温度40.4℃,极端最低温度-2.4℃。阳光充足,雨量充沛,年平均降雨量达到1304.2 mm,平均相对湿度为79%。土壤类型为第四纪红壤,土层浅薄。土壤较贫瘠,有机质、磷和钾元素含量较低。

供试材料为南宁市大学东路分车绿带分布的生长环境一致、长势良好且无病虫害的7种常用园林绿化灌木:台琼海桐(*Pittosporum pentandrum* var. *formosanum*)、朱槿(*Hibiscus rosa-sinensis*)、软枝黄蝉(*Allamanda cathartica*)、金叶假连翘(*Duranta erecta* 'Golden Leaves')、龙船花(*Ixora chinensis*)、黄金榕(*Ficus microcarpa* 'Golden Leaves')、鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)。2019年1月每种灌木随机选取9株,每株间距3 m;在样株上取叶片完整、长势正常的成熟叶,每株采集6片。将叶片装入样品袋,放入装有冰袋的保温盒中,带回实验室备用。

### 1.2 方法

选取完整、大小相似的叶片,用万分位天平称其鲜重后,用CL-203手持式激光叶面积仪测量叶面积(LA);将所选叶片置于水中,于黑暗下浸泡12 h,待叶片吸水饱和后取出,用吸水纸吸去表

面的水分,称其饱和鲜重;最后将叶放入 105℃烘箱中杀青 15 min,80℃烘干至恒重,称叶片干重。在此基础上,计算比叶面积(SLA=叶片面积/叶片干重)和干物质含量(LDMC=叶干重/叶饱和鲜重)。

选取叶片称鲜重并在 80℃下烘至恒重后,用万分位天平称其干重,以计算叶片含水量[LWC=(叶片鲜重-干重)/叶片鲜重];用研钵将烘干的叶片研磨成粉状,以测定叶片中 N、P、K 含量。采用扩散法测定叶片 N(LNC)、钼锑抗比色法测定叶片 P(LPC)、火焰光度法测定叶片钾(LKC)含量<sup>[15]</sup>。其余叶片采用 95%乙醇提取法<sup>[16]</sup>测定叶片叶绿素含量。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析。采用 Pearson 相关性分析法和冗余分析法(RDA)分析叶片功能性状与生态化学计量之间的相关性。采用主成分分析法(PCA)对 7 种园林绿化灌木的功能性状与生态化学计量参数进行综合分析并排名。在 Excel 2010 软件中完成绘图。叶功能性状和生态化学计量参数在 7 种

园林绿化灌木间的差异大小用(CV)表示,CV=标准偏差/平均值×100%,表中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同园林绿化灌木叶片功能性状特征

由表 1 可见,7 种园林绿化灌木的 LA、SLA、LDMC、LWC 和 Chl 的变幅分别为 7.85~25.26 cm<sup>2</sup>、100.99~210.56 cm<sup>2</sup>/g、0.19~0.31 g/g、63.39~81.92% 和 4.88~16.44 mg/g,平均值分别为 15.68 cm<sup>2</sup>、136.33 cm<sup>2</sup>/g,0.24 g/g,76.42%,9.36 mg/g。LA 和 Chl 均以朱槿最大,SLA 以金叶假连翘最大,LDMC 以台琼海桐最大,LWC 以软枝黄蝉最大;LDMC 和 Chl 均以软枝黄蝉最小,LA 以金叶假连翘最小,SLA 以黄金榕最小,LWC 以龙船花最小。7 种灌木叶片功能性状 CV 介于 7.83%~40.63%之间,以 Chl 的变异程度最大,其次为 LA、SLA 和 LDMC,LWC 变异最小。方差分析表明,7 种灌木 LDMC 之间的差异达显著水平(P<0.05),其余叶片功能性状之间的差异均达到极显著水平(P<0.01)。

表 1 7 种园林绿化灌木叶片功能性状特征  
Tab. 1 Leaf functional traits of 7 shrubs in landscaping

种类 Specie	叶面积 LA/cm <sup>2</sup>	比叶面积 SLA/(cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	叶干物质含量 LDMC/(g·g <sup>-1</sup> )	叶含水量 LWC/%	叶绿素含量 Chl/(mg·g <sup>-1</sup> )
台琼海桐 <i>Pittosporum pentandrum</i> var. <i>formosanum</i>	14.55±1.33	104.48±6.28	0.31±0.01	74.78±1.96	12.21±0.10
朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	25.26±0.12	197.33±29.79	0.22±0.05	79.81±0.84	16.44±0.13
软枝黄蝉 <i>Allamanda cathartica</i>	19.73±1.82	123.18±4.25	0.19±0.003	81.92±1.54	4.88±0.26
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> 'Golden Leaves'	7.85±1.04	210.56±5.74	0.25±0.06	76.66±0.60	8.94±0.16
龙船花 <i>Ixora chinensis</i>	16.43±0.13	101.10±8.46	0.25±0.01	63.39±1.88	7.40±0.13
黄金榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'	10.42±0.24	100.99±3.23	0.23±0.04	79.75±0.95	5.68±0.35
鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i>	15.55±0.41	116.66±2.04	0.22±0.001	78.63±0.89	10.00±0.18
平均值	15.68	136.33	0.24	76.42	9.36
最小值	7.85	100.99	0.19	63.39	4.88
最大值	25.26	210.56	0.31	81.92	16.44
CV/%	35.21	33.62	18.72	7.83	40.63
F	108.10**	43.72**	3.25*	64.68**	1150.51**

注: \*表示品种间差异显著(P<0.05), \*\*表示品种间差异极显著(P<0.01)。

Note: \* indicate significant difference among species (P<0.05), \*\* indicate extremely significant difference among species (P<0.01).

### 2.2 不同园林绿化灌木生态化学计量特征

由表 2 可见,7 种园林绿化灌木叶片 N、P、K、N:P、N:K 和 K:P 的变幅分别为 14.00~30.93 mg/g、0.25~0.50 mg/g、6.54~11.65 mg/g、43.03~67.23、1.70~3.26 和 20.08~34.86,平均值

分别为 21.23 mg/g、0.39 mg/g、9.37 mg/g、55.48、2.28 和 25.14。其中,K 和 K:P 均以台琼海桐最大,N、P 和 N:K 均以朱槿最大,N:P 以金叶假连翘最大;N、P 和 K 均以龙船花最小,N:P 和 N:K 均以软枝黄蝉最小,K:P 以朱槿最小。叶片 P 含

量的变异程度最高 (CV 为 32.05%), 叶片 K 含量的变异程度最低 (CV 为 18.52%)。方差分析表明, 7 种灌木生态化学计量参数表现出差异, 其中, N、

K 和 N : K 在 7 种灌木之间的差异达极显著 ( $P < 0.01$ ), N : P 和 K : P 在 7 种灌木之间差异达显著 ( $P < 0.05$ ), 而 P 在 7 种灌木之间差异不显著。

表 2 7 种园林绿化灌木叶片生态化学计量特征  
Tab. 2 Ecological stoichiometric characteristics of 7 shrubs in landscaping

种类 Specie	N/(mg·g <sup>-1</sup> )	P/(mg·g <sup>-1</sup> )	K/(mg·g <sup>-1</sup> )	N : P	N : K	K : P
台琼海桐 <i>Pittosporum pentandrum</i> var. <i>formosanum</i>	20.49±0.34	0.33±0.003	11.65±0.96	61.32±0.83	1.77±0.12	34.86±2.91
朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	30.93±0.35	0.50±0.14	9.52±0.56	64.89±16.29	3.26±0.18	20.08±5.79
软枝黄蝉 <i>Allamanda cathartica</i>	17.16±0.60	0.40±0.02	10.11±0.71	43.03±0.84	1.70±0.17	25.44±3.00
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> 'Golden Leaves'	29.29±1.01	0.44±0.02	10.34±0.55	67.23±4.94	2.84±0.18	23.72±1.51
龙船花 <i>Ixora chinensis</i>	14.00±0.24	0.25±0.01	6.54±0.61	56.61±1.09	2.15±0.19	26.45±2.84
黄金榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'	19.19±0.50	0.50±0.25	8.81±0.86	43.96±17.94	2.19±0.15	20.27±8.46
鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i>	17.57±0.52	0.34±0.01	8.64±1.90	51.36±1.40	2.09±0.38	25.18±5.03
平均值	21.23	0.39	9.37	55.48	2.28	25.14
最小值	14.00	0.25	6.54	43.03	1.70	20.08
最大值	30.93	0.50	11.65	67.23	3.26	34.86
CV/%	28.69	32.05	18.52	21.83	24.72	24.50
F	321.68**	2.28	8.06**	3.22*	21.70**	3.27*

注: \*表示品种间差异显著 ( $P < 0.05$ ), \*\*表示品种间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* indicate significant difference among species ( $P < 0.05$ ), \*\* indicate extremely significant difference among species ( $P < 0.01$ ).

### 2.3 叶功能性状与生态化学计量的 Pearson 相关性分析

从表 3 可见, Chl 与 LA、SLA 均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 其他各叶片功能性状之间无显著相关性。

从表 4 可见, N 与 P、N : P 均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 N : K 则呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); P 与 N : P 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与 K : P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); K 与 K : P 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); N : P 与 N : K、K : P 均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); N : K 与 K : P 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 其他各参数之间无显著相关性。

叶片功能性状体现植物对资源的利用策略, 其变化反应叶片 N、P、K 及生态化学计量比的变化。从 Pearson 相关性 (图 1) 可见, 叶片 N 与 SLA、Chl 均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 且受 SLA 的影响较大 ( $R^2=0.807 > 0.426$ ); N : P 与 SLA、Chl 均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 且主要受 SLA 的影响 ( $R^2=0.331 > 0.329$ ); N : K 与 SLA、Chl 均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 且主要受 SLA 的影响 ( $R^2=0.635 > 0.326$ ); 叶片 P 与 LWC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 叶片 K 与 LWC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。其他叶片功能性状与生态化学计量参数之间无显著相关性。

表 3 叶功能性状之间的 Pearson 相关性  
Tab.3 Pearson correlation between leaf function traits

指标 Index	叶面积 LA	比叶面积 SLA	叶干物质含量 LDMC	叶含水量 LWC	叶绿素含量 Chl
叶面积	1	0.084	-0.304	0.107	0.479*
比叶面积		1	-0.182	0.274	0.479*
叶干物质含量			1	-0.311	0.246
叶含水量				1	0.061
叶绿素含量					1

注: \*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

表 4 叶生态化学计量之间的 Pearson 相关性  
Tab. 4 Pearson correlation between leaf ecological stoichiometric

指标 Index	N	P	K	N : P	N : K	K : P
N	1	0.462*	0.423	0.548*	0.803**	-0.261
P		1	0.160	-0.454*	0.401	-0.739**
K			1	0.224	-0.195	0.477*
N : P				1	0.439*	0.436*
N : K					1	-0.592**
K : P						1

注: \*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

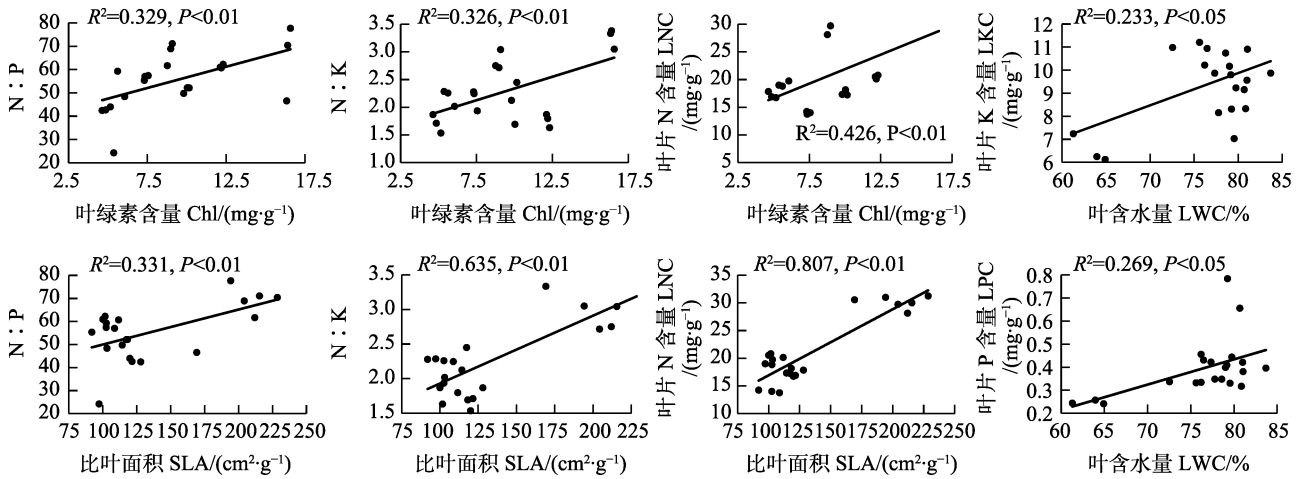


图 1 叶功能性状与生态化学计量之间的 Pearson 相关性  
Fig. 1 Pearson correlation between leaf function traits and ecological stoichiometric

2.4 叶功能性状与生态化学计量的冗余分析

采用 RDA 分析法分析叶片功能性状与生态化学计量参数之间的关系(图 2)。结果表明, RDA 在第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.354 和 0.122, 累积解释率为 47.64%, 总体解释率为 50.95%(表 5)。通过蒙特卡罗检验发现, 第 1 排序轴和所有排序轴均达到显著水平 ( $P < 0.01$ ), 说明结果具有显著统计学意义。进一步分析发现, 第 1、2 排序轴分别解释了生态化学计量参数总变异的 69.48% 和 24.03%, 累积解释量为 93.51%, 说明前 2 个排序轴可以较好地体现叶片功能性状与生态化学计量参数之间的相关性, 且其相关性主要由第 1 排序轴决定。

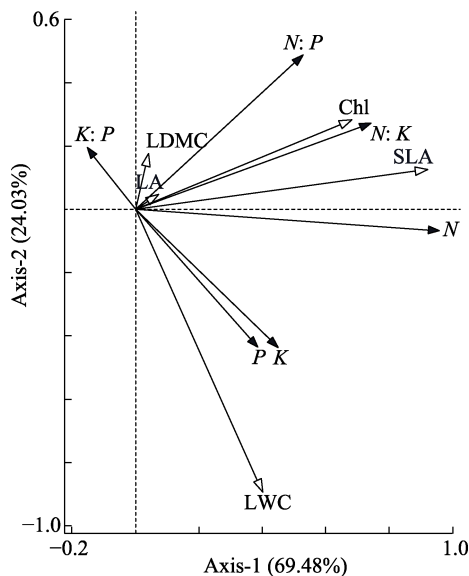


图 2 叶功能性状与生态化学计量的冗余分析  
Fig. 2 Redundancy analysis of relationship between leaf functional traits and ecological stoichiometric

表 5 叶片功能性状与生态化学计量的 RDA 排序结果  
Tab. 5 Redundancy analysis ordination results of leaf functional traits and ecological stoichiometric

项目 Item	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4	总方差 Total variance
特征值	0.354	0.122	0.033	0.000	1
累积百分数/%	35.40	47.64	50.94	50.95	
生态化学计量特征-叶功能性状相关系数	0.960	0.679	0.309	0.640	
生态化学计量特征-叶功能性状累积贡献率/%	69.48	93.51	99.99	100.00	
特征总和					1
第 1 轴显著性检验 (F 检验)	F=8.2, P=0.004				
所有轴显著性检验 (F 检验)	F=3.1, P=0.006				

在叶片功能性状因子中对生态化学计量产生显著影响的为 SLA ( $F=8.4, P < 0.01$ )、Chl ( $F=4.1, P < 0.05$ ) 和 LWC ( $F=3.5, P < 0.05$ ), 且相关性大小为  $SLA > Chl > LWC$ , 其解释量分别为 30.7%、17.8% 和 15.5% (表 6)。具体表现为 SLA、Chl 与叶片 K:P 均呈负相关, 与其他生态化学计量参数均呈正相关; LWC 与 N:P、K:P 均呈负相关, 与其他生态化学计量参数均呈正相关。

表 6 叶功能性状因子对生态化学计量特征的贡献率  
Tab. 6 Contribution of leaf traits factors to ecological stoichiometric characteristics

项目 Item	解释率 Interpretation/%	F	P
比叶面积	30.7	8.4	0.002
叶绿素	17.8	4.1	0.012
叶片含水量	15.5	3.5	0.020
叶干物质含量	3.2	0.6	0.672
叶面积	0.6	0.1	0.948

## 2.5 不同园林绿化灌木的主成分分析

通过主成分分析发现,前 3 个主成分的累积方差贡献率为 82.78%,基本可以体现供试种全部特征参数的综合信息。对特征参数在各主成分上的因子载荷分析发现,N 对第 1 主成分的贡献最大,N:K 对第 2 主成分能的贡献最大,

K 对第 3 主成分的贡献最高。因此 N 和 N:K 可作为体现供试种生态化学计量特征的主要指标,其次为叶片 K。通过 7 个供试种各项特征的综合得分及排名,发现金叶假连翘、朱槿和台琼海桐表现出较好的生长状况和资源利用效率(表 7)。

表 7 主成分因子得分及综合排序  
Tab. 7 Principal component factor score and comprehensive ranking

种类 Specie	F1	F2	F3	综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive ranking
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> 'Golden Leaves'	2.417	0.049	0.700	1.070	1
朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	3.138	-0.629	-0.472	0.995	2
台琼海桐 <i>Pittosporum pentandrum</i> var. <i>formosanum</i>	-0.278	2.607	1.193	0.818	3
鹅掌柴 <i>Schefflera octophylla</i>	-0.874	-0.061	-0.329	-0.410	4
软枝黄蝉 <i>Allamanda cathartica</i>	-1.652	-0.654	0.847	-0.729	5
黄金榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'	-0.990	-1.552	0.522	-0.774	6
龙船花 <i>Ixora chinensis</i>	-1.762	0.240	-1.693	-0.863	7

## 3 讨论

植物对水分因子的响应比其他环境因子更明显,南宁冬季干燥、降雨量少,且温度及降雨量等变化情况相对平稳,环境较稳定,可比性强,故本研究选取冬季所测指标进行对比分析。研究发现,7 种园林绿化灌木叶功能性状与生态化学计量之间存在显著差异,说明在相同生境下,不同灌木对环境的响应策略差别较大,这种差异性反映了不同植物叶形态构建与资源利用的内在区别<sup>[17]</sup>。刘晓娟等<sup>[18]</sup>研究发现,相同生境的不同树种叶功能性状差异显著,这反映出不同植物本身的遗传特性及适应环境的策略存在差别。本研究中,7 种灌木叶片的不同功能性状中,Chl 含量、LA 和 SLA 为高变异性状,表明不同植物对这些性状具有较大的选择空间,其中 Chl 含量变化幅度最大,可能与植物本身对研究区高光照的适应性不同有关;另一方面可能会导致植物体积活性氧,加快叶绿素分解<sup>[19-20]</sup>;LWC 是植物适应环境的关键表现特征,通常不会受到叶片结构、化学组成和衰老的影响<sup>[21]</sup>,LWC 在种间的变化幅度最低,说明植物在长期适应生境的过程中形成了较稳定的水分利用效率。7 种灌木的叶片 P 含量之间的差异最大(CV=32.05%),叶片 K 含量之间的差异最小(CV=18.52%),说明对 P 元素的吸收、利用效率及分配方式存在较大程度的差异,而对 K 元素的利用则相对较一致。研究表明,叶

片 N:P>16 时,植物生长发育主要受 P 元素的限制<sup>[22]</sup>。本研究区 7 种灌木叶片 N:P(43.03~67.23)均高于 16,且均高于全球植物叶片 N:P(22.97),说明这 7 种灌木的生长主要受 P 的影响,而研究区土壤磷含量较低,因此需施用适量的磷肥且加强对其植被的养护。台琼海桐、朱槿和金叶假连翘的叶片 N 含量均高于中国植物叶片 N 含量(20.20 g/kg)<sup>[23]</sup>,可能因为其利用大量含 N 蛋白酶以促进生长发育,也可能是植物在受到冬季干旱环境的影响而积累非蛋白氮,进而增加叶片 N 含量<sup>[10]</sup>。金叶假连翘具有较小的 SLA、较大的 LDMC 与较高的叶片 N、P 组合,说明该树种对资源的利用效率较高,较小的叶面积可以减少植物的蒸腾作用,以维持体内水分平衡,而较大的叶干物质含量有利于植物储存养分,增强对贫瘠环境的适应能力。这与庞世龙等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。

在植物生长的过程中,尽管叶片的形态和大小存在多样性,但各个叶片功能性状之间是相互影响的,彼此存在一定的关联性,通过调整和平衡一系列性状的组合来适应特定生境的变化,反映了植物对环境变化的趋同适应性<sup>[25-26]</sup>。LA、SLA 与 Chl 是体现植物适应环境的关键叶片功能性状,LA 与植物对光的吸收以及光的获取分配系数密切相关,在叶片能量收支和平衡植株个体水分等方面起重要作用<sup>[27]</sup>;Chl 是植物光合作用的主要色素,其含量反映叶片光合能力的重要指标,

与积累营养物质、抵抗不良生境息息相关<sup>[28]</sup>。有研究表明, LA 与 Chl 之间呈显著正相关<sup>[29]</sup>, 也有研究表明, 二者之间呈显著负相关<sup>[28]</sup>。本研究中, LA 与 Chl 呈显著正相关, 表明叶片获得了较大程度的能量产出, 与王超等<sup>[29]</sup>在研究急尖长苞冷杉叶功能性状相关性的结果一致; SLA 与 Chl 呈显著正相关, 说明叶片构建资源的投入多用于形态上, 对资源的利用率偏低。

叶片 N、P 和 K 是协同元素, 相互之间通常是正相关关系, 其含量和计量比可反映植物对不同养分的需求规律, 是适应生境的重要体现<sup>[30]</sup>。本研究表明, 叶片 N 与 P、N:P 呈显著正相关, 叶片 P 与 N:P 呈显著负相关, 叶片 K 与 N、P 均无显著相关性, 这体现了叶片养分利用策略, 说明叶片 N 与 P 表现出很强的耦合关系, 可能因为植物体内基本的生理代谢是由 N 和 P 共同发挥作用的, 在环境影响下通常表现出一致性<sup>[31]</sup>; 同时灌木植物自身的差异性也导致了叶片营养元素分配不同。张珂等<sup>[32]</sup>和罗艳等<sup>[33]</sup>的研究结果也说明了这一规律。7 种灌木的叶片 N:P 与 N:K、K:P 均呈显著正相关关系, N:K 与 K:P 呈极显著负相关关系, 说明植物是按照一定的比例关系吸收和利用养分的, 体现了叶片属性之间的经济策略; 叶片 K:P 与叶片 P、K 分别呈极显著负相关、显著正相关, 说明这 7 种灌木对 P 和 K 的吸收和利用是相互拮抗的<sup>[34]</sup>。

N 是植物细胞蛋白质的主要组成成分, 叶面积随着植物生长不断增加的过程需要大量的 N 元素<sup>[35]</sup>。王子奇等<sup>[36]</sup>在研究油蒿光合参数与叶氮含量和比叶面积的关系时得出, 植物叶片 N 含量和 SLA 增加均会显著提高对光能的利用速率。本研究发现, 7 种灌木的叶片 N 含量、N:P、N:K 与 SLA 呈极显著正相关, 说明植物对 N 元素的吸收多于 P 元素和 K 元素, SLA 大的植物往往生长快、光合能力强, 因而吸收更多的养分以满足其需求; 另外, SLA 大的叶片, 其厚度或密度往往相对较小, 有利于叶绿体对光强的吸收, CO<sub>2</sub> 在叶肉组织中的传导阻力被降低, 可能提高叶片 N 向光合器官的分配比例<sup>[37-38]</sup>。植物合成叶绿素所需的重要元素是氮素, 它能促进叶绿体基粒面积增大, 提高 Rubisco 酶活性, 增加胞间 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[39]</sup>。本研究表明, 7 种灌木的叶片 N 含量、N:P、N:K 与叶片 Chl 含量呈极显著正相关, 说明植物 Chl 含量增加会显著提高对 N 元素的吸收。有研究发

现, 植物叶片 LWC 越高, SLA 越大, 光合作用过程中 ATP 的合成与物质转化需要消耗更多的叶片含 P 蛋白质, 因而叶片会增加对 P 的吸收<sup>[40]</sup>。与上述结果一致, 7 种灌木的叶片 P 与 LWC 呈显著正相关。植物叶片 K 在光合产物的运输和叶片细胞水势的调节方面起着重要作用<sup>[41]</sup>。本研究表明, 7 种灌木叶片 K 与 LWC 呈显著正相关, 说明植物叶片 LWC 越高会吸收大量的 K 元素以平衡细胞水势, 加快光合作用的进行, 以促进植物生长。RDA 分析表明, 7 种灌木叶片 N、P、K 及其计量比主要受 SLA、Chl 和 LWC 的影响。然而, 植物叶片养分及其计量比通常受叶片本身的功能性状和环境因子的综合影响, 本研究仅开展叶片功能性状方面的研究, 未将土壤养分和城市空气的粉尘含量等环境因素考虑其中。因此, 今后还需要在该方面进行深入探究, 以全面分析植物的适生性。

本研究从 7 种园林绿化灌木叶片功能性状与生态化学计量方面综合分析, 发现金叶假连翘、朱槿和台琼海桐表现出较好的生长状况和资源利用效率, 对研究区的环境有更好适应能力, 因此适合作为城市园林规划所需的重要树种。

## 参考文献

- [1] 闫晓俊, 钟波元, 陈廷廷, 张礼宏, 宋涛涛, 陈光水. 大气和土壤增温对杉木幼苗叶片功能性状的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5653-5661.  
YAN X J, ZHONG B Y, CHEN T T, ZHANG L H, SONG T T, CHEN G S. Effects of atmospheric and soil warming on functional properties of Chinese fir seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5653-5661. (in Chinese)
- [2] 裴晓娜, 张秦徽, 张世凯, 王德, 孔令远, 曹森林, 孟刚, 赵曦阳. 核桃楸无性系叶片性状变异分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(6): 2030-2036.  
PEI X N, ZHANG Q H, ZHANG S K, WANG D, KONG L Y, CAO S L, MENG G, ZHAO X Y. Variation analysis of leaf characters of *Juglans mandshurica* clones[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(6): 2030-2036. (in Chinese)
- [3] 熊玲, 龙翠玲, 廖全兰, 薛飞. 茂兰喀斯特森林木本植物叶的功能性状及其相互关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 152-159.  
XIONG L, LONG C L, LIAO Q L, XUE F. Functional characters of leaves of woody plants in Maolan Karst forest and their relationship[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(1): 152-159. (in Chinese)

- [4] 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[J]. *Mexico Oecologia*, 2015, 179(2): 585-597.
- [5] 张峰, 苏兰茜, 白亭玉, 吴刚, 谭乐和, 李雯, 郭芮, 赵正杰. ‘马来西亚 1 号’菠萝蜜叶片氮磷钾动态的研究[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12): 3508-3513.  
ZHANG F, SU L X, BAI T Y, WU G, TAN L H, LI W, GUO R, ZHAO Z J. Dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium in leaves of ‘Malaysia 1’ jackfruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(12): 3508-3513. (in Chinese)
- [6] 覃国铭, 尹光天, 杨锦昌, 李荣生, 邹文涛, 肖以华. 米老排(*Mytilaria laosensis*)叶 C、N、P 化学计量比的季节动态与异速生长关系[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(2): 594-601.  
QIN G M, YIN G T, YANG J C, LI R S, ZOU W T, XIAO Y H. Seasonal dynamics of stoichiometric ratio of C, N and P in leaves of *Mytilaria laosensis* and its relationship with allometric growth[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(2): 594-601. (in Chinese)
- [7] 张秀芳, 穆振北, 林美娇, 江森华, 巩嘉欣, 游巍斌. 琅岐岛 4 种优势植物叶功能性状及其影响因子[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 667-673.  
ZHANG X F, MU Z B, LIN M J, JIANG M H, GONG J X, YOU W B. Leaf functional traits and influencing factors of four dominant plants in Langqi Island[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(3): 667-673. (in Chinese)
- [8] 王怀宾, 胥晓, 杨万勤, 曹瑞, 王芝慧, 郑冰倩, 吕浩池, 刘婷婷. 城市园林不同生活型植物叶片碳、氮、磷生态化学计量特征及其对台风的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 8931-8938.  
WANG H B, L X, YANG W Q, CAO R, WANG Z H, ZHENG B Q, LYU H C, LIU T T. Eco stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of different life forms of urban gardens and their response to typhoon[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 8931-8938. (in Chinese)
- [9] 田岳梨, 杨航, 王芳玲, 康海斌, 薛悦, 王得祥. 秦岭中段山脊油松叶功能性状差异及其对海拔梯度的响应[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(2): 300-309.  
TIAN Y L, YANG H, WANG F L, KANG H B, XUE Y, WANG D X. Differences in leaf functional traits of *Pinus tabulaeformis* and its response to altitude gradient in the middle part of Qinling Mountains[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(2): 300-309. (in Chinese)
- [10] 张慧文, 马剑英, 孙伟, 陈发虎. 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.  
ZHANG H W, MA J Y, SUN W, CHEN F H. Functional properties of spruce leaves at different altitudes and their relationship with soil factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5747-5758. (in Chinese)
- [11] 黄宇. 南宁市道路绿地特色化植物景观研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.  
HUANG Y. Study on characteristic plant landscape of road green space in Nanning[D]. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 梁爽. 山西中部城市道路绿地植物配置模式优化研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2015.  
LIANG S. Study on optimization of plant allocation mode of urban road green space in Central Shanxi[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [13] 闫倩, 徐立帅, 段永红, 潘李超, 刘立文, 杨玉莹. 20 种常用绿化树种叶面滞尘能力及滞尘粒度特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3259-3267.  
YAN Q, XU L S, DUAN Y H, PAN L C, LIU L W, YANG Y Y. Dust retention capacity and particle size characteristics of leaves of 20 common greening tree species[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3259-3267. (in Chinese)
- [14] 朱栗琼, 招礼军, 林大庆, 李仕裕, 陶世红. 5 种绿化灌木茎叶解剖结构及耐寒性比较[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(20): 267-270.  
ZHU L Q, ZHAO L J, LIN D Q, LI S Y, TAO S H. Comparison of anatomical structure and cold tolerance of stems and leaves of five greening shrubs[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(20): 267-270. (in Chinese)
- [15] 邓小红, 姬拉拉, 王健健. 施氮对镉胁迫下山杨幼苗叶片氮磷钾吸收及镉积累量的影响[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(11): 1932-1939.  
DENG X H, JI L L, WANG J J. Effects of nitrogen application on nitrogen, phosphorus, potassium absorption and cadmium accumulation in leaves of *Populus tomentosa* seedlings under cadmium stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(11): 1932-1939. (in Chinese)
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Version 2. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 李娟霞. 城市微气候环境下 9 种园林植物叶功能性状的比较研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.  
LI J X. Comparative study on leaf functional characters of 9 garden plants under urban microclimate environment[D].

- Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [18] 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.
- LIU X J, MA K P. Research progress of plant functional traits[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2015, 45(4): 325-339. (in Chinese)
- [19] 朱鹏锦, 庞新华, 谭秦亮, 梁春, 严霖, 周全光, 程琴, 吕平, 欧克纬, 卢业飞, 宁蕾. 低温胁迫对不同甘蔗品种叶片光合色素和光合生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 875-881.
- ZHU P J, PANG X H, TAN Q L, LIANG C, YAN L, ZHOU Q G, CHENG Q, LYU P, OU K W, LU Y F, NING L. Effects of low temperature stress on photosynthetic pigments and photosynthetic physiological characteristics of leaves of different sugarcane varieties[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(5): 875-881. (in Chinese)
- [20] 黄小, 姚兰, 王进, 朱强, 吴漫玲, 刘易. 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.
- HUANG X, YAO L, WANG J, ZHU Q, WU M L, LIU Y. Effects of soil nutrients on leaf functional traits of different life forms[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(12): 2293-2302. (in Chinese)
- [21] QUESTED H, ERIKSSON O, FORTUNEL C, GARNIER E. Plant traits relate to whole-community litter quality and decomposition following land use change[J]. *Functional Ecology*, 2007, 21(6): 1016-1026.
- [22] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [23] HAN W X, FANG J Y, GUO D L. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 377-385.
- [24] 庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 何峰, 陆国导. 桂西南喀斯特地区优势木本经济植物叶功能性状变异及其适应策[J]. 广西植物, 2021, 41(5): 707-714.
- PANG S L, OU Z Y, SHEN W H, HE F, LU G D. Variation of leaf functional traits and adaptive strategies of dominant woody economic plants in karst area of Southwest Guangxi[J]. *Guihaia*, 2021, 41(5): 707-714. (in Chinese)
- [25] FRESCHET G T, CORNELISSEN J H C, VAN LOGTESTIJN R S P, AERTS R. Evidence of the 'plant economics spectrum' in a subarctic flora[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98: 362-373.
- [26] 董廷发, 冯玉龙, 类延宝, 张丽坤. 干旱和湿润生境中主要优势树种叶片功能性状的比较[J]. 生态学报, 2012, 31(5): 1043-1049.
- DONG T F, FENG Y L, LEI Y B, ZHANG L K. Comparison of leaf functional traits of main dominant tree species in arid and humid habitats[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1043-1049. (in Chinese)
- [27] 王雪艳, 曹建军, 张小芳, 孔莹莹, 田泓, 李梦天, 许雪赟, 龚毅帆. 地形因子对黄土高原山杏叶片功能性状的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2591-2599.
- WANG X Y, CAO J J, ZHANG X F, KONF Y Y, TIAN H, LI M T, XU X Y, GONG Y F. Effects of topographic factors on leaf functional traits of *Prunus armeniaca* on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2591-2599. (in Chinese)
- [28] 雷蕾, 赵成章, 李雪萍, 任悦, 张晶. 密度制约下尕斯库勒湿地黄帚橐吾叶绿素与叶面积、叶厚度间的关系[J]. 生态学报, 2018, 37(12): 3647-3653.
- LEI L, ZHAO C Z, LI X P, REN Y, ZHANG J. Relationship between chlorophyll, leaf area and leaf thickness of *Ligularia virgaurea* in Gahai wetland under density constraints[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12): 3647-3653. (in Chinese)
- [29] 王超, 卢杰, 姚慧芳, 于德水, 段斐, 周晨霓. 急尖长苞冷杉叶功能性状特征及其环境响应[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 123-130.
- WANG C, LU J, YAO H F, YU D S, DUAN F, ZHOU C N. Environmental response characteristics of fir leaf tip[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42 (2): 123-130. (in Chinese)
- [30] WRIGHT I J, REICH P B, CORNELISSEN J H C, FALSTER D S, GARNIER E, HIKOSAKA K, LAMONT B B, LEE W, OLEKSYN J, OSADA N, POORTER H, VILLAR R, WARTON D I, WESTOBY M. Assessing the generality of global leaf trait relationship[J]. *New Phytologist*, 2005, 166: 485-496.
- [31] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 侯贻菊, 朱军, 丁访军, 杨文斌. 茂兰喀斯特区 68 种典型植物叶片化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5063-5080.
- WU P, CUI Y C, ZHAO W J, HOU Y J, ZHU J, DING F J, YANG W B. Stoichiometric characteristics of leaves of 68 typical plants in Maolan Karst Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 5063-5080. (in Chinese)
- [32] 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[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- ZHANG K, HE M Z, LI X R, TAN H J, GAO Y H, LI G, HAN G J, WU Y Y. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of typical plants in Alxa Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6538-6547. (in Chinese)

- [33] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 安申群. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8326-8335.  
LUO Y, GONG L, ZHU M L, AN S Q. Eco stoichiometric characteristics of leaves and soil of four shrub plants in the desert area of the upper reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8326-8335. (in Chinese)
- [34] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, ACKERLY D D, BARUCH Z, BONGERS F, CAVENDER-BARES J, CHAPIN T, CORNELISSEN J H C, DIEMER M, FLEXAS J, GARNIER E, GROOM P K, GULIAS J, HIKOSAKA K, LAMONT B B, LEE T, LEE W, LUSK C, MIDGLEY J J, NAVAS M L, NIINEMETS Ü, OLEKSYN J, OSADA N, POORTER H, POOT P, PRIOR L, PYANKOV V I, ROUMET C, THOMAS S C, TJOELKER M G, VENEKLAAS E J, VILLAR R. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.
- [35] 王栋, 周媛媛, 郭路航, 张苗, 吉庆凯, 韩彦茹, 孙志梅, 马文奇. 冀中地区桃树优质高产的叶片氮磷钾临界值范围及化肥投入量[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 269-278.  
WANG D, ZHOU Y Y, GUO L H, ZHANG M, JI Q K, HAN Y R, SUN Z M, MA W Q. Critical value range of nitrogen, phosphorus and potassium in leaves of peach trees with high quality and high yield in central Hebei and amount of chemical fertilizer input[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2022, 28(2): 269-278. (in Chinese)
- [36] 王子奇, 查天山, 贾昕, 吴雅娟, 张明艳, 穆家伟. 油蒿光合参数季节动态及其与叶氮含量和比叶面积的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 916-924.  
WANG Z Q, CHA T S, JIA X, WU Y J, ZHANG M Y, MU J W. Seasonal dynamics of photosynthetic parameters of *Artemisia annua* and its relationship with leaf nitrogen content and specific leaf area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(4): 916-924. (in Chinese)
- [37] 刘金环, 曾德慧, Don Koo Lee. 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, 2006(8): 921-925.  
LIU J H, ZENG D H, LEE D K. Leaf characters and their relationship of main plants in the southeast of Horqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006(8): 921-925. (in Chinese)
- [38] FENG Y L, LEI Y B, WANG R F, CALLAWAY R M, VALIENTE-BANUET A, INDERJIT, LI Y P, ZHENG Y L. Evolutionary tradeoffs for nitrogen allocation to photosynthesis versus cell walls in an invasive plant[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(6): 1853-1856.
- [39] 张永超, 梁国玲, 秦燕, 刘文辉, 贾志锋, 刘勇, 马祥. 老芒麦衰老过程中叶片叶绿素和光合作用变化特征及对养分的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 229-237.  
ZHANG Y C, LIANG G L, QIN Y, LIU W H, JIA Z F, LIU Y, MA X. Variation characteristics of chlorophyll and photosynthesis and response to nutrients in the leaves of *Elymus sibiricus* during senescence[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31 (1): 229-237. (in Chinese)
- [40] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6507-6515.  
XU C B, ZHONG Q L, CHENG D L, HU S Z, HU B, WU B Y, SUN X M, ZHANG P S. Variation in relationships between SLA and leaf C, N, P stoichiometry in *Machilus pauhoi* among locations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6507-6515. (in Chinese)
- [41] 李涵. 沙田柚土壤、叶片氮、磷、钾含量季节性变化与果实品质的关系[D]. 重庆: 西南大学, 2016.  
LI H. Relationship between seasonal changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil and leaves and fruit quality of Shatian pomelo[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. (in Chinese)