

引用格式:

李树萍, 董琼, 李世民, 金友帆. 遮阳对树番茄幼苗叶片性状及化学计量特征的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 183–189.

LI S P, DONG Q, LI S M, JIN Y F. Effects of shading on leaf traits and stoichiometric characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(2): 183–189.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



遮阳对树番茄幼苗叶片性状及化学计量特征的影响

李树萍^{1,2}, 董琼^{1,2*}, 李世民^{1,2}, 金友帆^{1,2}

(1.西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224; 2.西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要:以一年生树番茄(*Cyphomandra betacea* Sendt.)幼苗为研究对象, 设置4种光照(100%、75%、50%、25%自然光照), 测定树番茄幼苗叶片性状以及C、N、P、K含量, 分析各指标之间的差异性。结果表明: 叶宽、叶面积、叶片含水率、比叶面积在50%自然光照下最大; 全光照处理下, 树番茄幼苗叶片C含量大于其他遮阳处理的; 遮阳处理下, 叶片N、P、K的含量大于茎、粗根和细根的; 除粗根外, 树番茄幼苗各器官的K含量随遮阳程度的增加而不断增加; 树番茄幼苗叶片的氮磷比随遮阳程度的增加不断增加; 叶、细根的碳氮比和碳磷比小于茎和粗根的, 而茎的氮磷比、氮钾比小于叶、粗根和细根的; 遮阳处理下, 树番茄生长受N、P限制, 不受K限制; 树番茄幼苗主要通过改变叶片的N、P含量以及茎的N含量、粗根的K含量来适应光照变化。室外栽培、林下种植以及园林应用中可选择50%遮阳环境, 并适量施用N、P肥。

关键词: 树番茄; 光照; 生物量; 化学计量特征

中图分类号: S548.01

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)02-0183-07

Effects of shading on leaf traits and stoichiometric characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings

LI Shuping^{1,2}, DONG Qiong^{1,2*}, LI Shimin^{1,2}, JIN Youfan^{1,2}

(1.College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration for Biodiversity Conservation in Southwest China, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: Annual *Cyphomandra betacea* Sendt. seedlings were used for the study of its leaf traits and stoichiometry under shade. Four different light intensities(100%, 75%, 50% and 25% NR, NR being natural light) were set up to determine leaf traits and C, N, P and K contents of *C. betacea* seedlings and to analyse the variability among the indicators. The results showed that leaf length, leaf area, leaf moisture content and specific leaf area were greatest under 50% NR and the C contents of leaves were greatest under 100% NR. The N, P and K contents of leaves were higher than those of stems, thick and fine roots under shade treatment. Over increasing shade, the K contents of all organs(except for thick roots) and leaf N/P kept increasing. The leaf and fine roots C/N and C/P were smaller than those of stems and thick roots, while the stems N/P and N/K were smaller than those of leaves, thick and fine roots. Under shade treatment, the growth of *C. betacea* was limited by N and P, but not by K. *C. betacea* seedlings adapted to light changes by changing leaves N and P content, stems N contents and thick roots K contents. A 50% shade environment could be chosen for outdoor cultivation, extension planting in the forest and for garden applications with proper N and P fertilizer.

Keywords: *Cyphomandra betacea* Sendt.; shading; biomass; stoichiometric characteristics

收稿日期: 2022-08-22

修回日期: 2023-04-03

基金项目: 云南省“三区”科技人才支持计划(20200402); 西南林业大学基金项目(2020YY013)

作者简介: 李树萍(1996—), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究, lishuping@swfu.edu.cn; *通信作者, 董琼, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与保持研究, dqyeam@swfu.edu.cn

光照是植物生长的重要环境限制因子^[1]。光照强度直接影响植物生长过程和物质形态建成,不同植物对光照强度有着不同的反应^[2]。在一定的光照强度范围内,植物会通过形态结构和生理生态的调整来适应异质光环境^[3]。叶片作为植物对光环境变化最敏感的器官,其形态结构特征能够体现植物对光环境的适应^[4]。为有效利用光源,植物可能会通过增大叶面积和比叶面积或减小比叶质量等来适应光环境的变化^[5]。

C、N、P和K在植物生长、生理代谢及应对环境变化的调节过程中发挥重要作用^[6],其含量以及化学计量比反映了植物营养利用效率,以及在生存环境中的相对养分限制^[7]。植物在遮阳环境下对C、N、P、K元素的利用可能与自然光照下的不同,其化学计量特征也可能存在差异^[8]。遮阳可影响植物叶片光合作用强度,改变植物对资源的需求,从而影响植物体内C、N、P、K的含量,导致碳氮比、氮磷比、磷钾比等计量比呈现不同的变化规律^[9]。智西民等^[10]研究认为遮阳对青桐幼苗的C、N、P元素含量及计量特征均有显著影响;马志良等^[8]研究指出,适度遮阳提高了紫花苜蓿地上部分C、N、P、K化学计量比;因此,研究遮阳条件下植物体不同器官C、N、P、K含量及化学计量特征对判断植物限制性元素具有重要作用。

树番茄(*Cyphomandra betacea* Sendt.)为茄科、树番茄属,原产于南美洲^[11],中国云南和西藏南部有栽培^[12]。树番茄的经济和食用价值高,果实维生素C含量高于普通番茄^[13],所含花青素、酚类物质等生物活性成分已被证明具有抗氧化^[14]、抗炎和抗癌作用^[15]。树番茄幼苗稚嫩,不耐强光曝晒,强光下叶片容易损伤^[16]。本研究以树番茄幼苗为研究对象,探讨光照对树番茄幼苗C、N、P、K含量及化学计量特征的影响,旨在探索其幼苗生长的适宜光照环境及养分调控机制。

1 试验地基本概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学树木园(25°03'N, 102°45'E),海拔高度1954 m,年平均气温16.5℃,年均降水量700~1100 mm,降雨集中在6—9月,无霜期278 d,属于北亚热带低纬度半湿润高原山地季风性气候。

2 材料与方法

2.1 材料

2020年12月初,选取120株健康树番茄幼苗移入盆中,每盆1株。盆栽土壤pH 5.45,容重1.14 g/cm³,总N、总P、总K、总Ca、Mg、Fe含量分别为0.71、0.57、2.06、0.48、0.12、60.99 g/kg。

遮阳网为市场上常售的2针、3针、6针黑色遮阳网。

2.2 试验设计

2021年4月,选取长势基本一致的幼苗开始遮阳处理。试验采用单因素设计,遮阳网模拟4个光照水平:T1,无遮阳网(100%自然光照);T2,2针遮阳网(75%自然光照);T3,3针遮阳网(50%自然光照);T4,6针遮阳网(25%自然光照)。每个处理10株幼苗,3次重复,共120株幼苗。苗期正常浇水、除草。

2.3 测定指标及方法

2.3.1 叶片性状的测定

2021年9月,每个处理随机选取4株苗木,每株苗木选择正常无病害的功能叶。用手持叶面积仪扫描和测量叶长、叶宽和单叶面积。称取鲜叶质量后置于烘箱,105℃杀青0.5 h,80℃烘干至恒重,测定其干质量。

2.3.2 各器官C、N、P、K含量的测定

2021年9月,每个处理选取4株有代表性的苗木,清水冲洗后分离叶、茎、粗根(直径≥2 mm)和细根(直径<2 mm),105℃杀青0.5 h,80℃烘干至恒重,粉碎、过筛。分别采用重铬酸钾氧化法、奈氏比色法、钼锑抗比色法和原子吸收分光光度法测定C、N、P、K含量^[17]。

2.4 数据分析与处理

采用Excel 2019整理数据;采用SPSS 26.0进行统计分析;采用GraphPad Prism绘图。参照赵宇航等^[18]的方法计算表型可塑性指数。

3 结果与分析

3.1 遮阳对树番茄幼苗叶片性状的影响

由表1可知,遮阳处理对树番茄幼苗的叶长、

叶宽、叶面积、鲜叶质量、叶干质量、比叶面积、比叶质量及叶片含水率等均有影响。T3、T4 处理下树番茄幼苗的叶长、叶宽、鲜叶质量、叶干质量和叶面积均大于 T1、T2 处理的。T2 处理的树番茄幼苗的叶长最小，T4 处理的最大(18.03 cm)。T3 处理的叶宽、叶面积、叶片含水率以及比叶面积均最

大。与 T1 相比，T3 处理的叶宽、叶面积分别增加了 29.23%、51.91%。T4 处理的鲜叶质量、叶干质量、叶形指数和比叶质量最大，与 T1 相比，鲜叶质量、叶干质量和比叶质量分别增加了 94.29%、97.75%、48.18%。遮阳处理对树番茄幼苗的叶形指数无显著影响。

表 1 不同遮阳处理树番茄幼苗的叶片性状

Table 1 Leaf characters of *Cyphomandra betacea* seedlings under different shade treatments

处理	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²	鲜叶质量/g	叶干质量/g
T1	(14.09±0.69)b	(10.06±0.52)b	(92.63±8.31)b	(0.35±0.03)b	(2.67±0.22)b
T2	(13.69±0.50)b	(10.31±0.45)b	(90.46±6.71)b	(0.48±0.06)b	(2.71±0.24)b
T3	(17.51±0.56)a	(13.00±0.54)a	(140.71±9.45)a	(0.51±0.03)ab	(4.13±0.24)a
T4	(18.03±1.31)a	(12.78±1.10)a	(127.02±24.48)ab	(0.68±0.12)a	(5.28±0.86)a

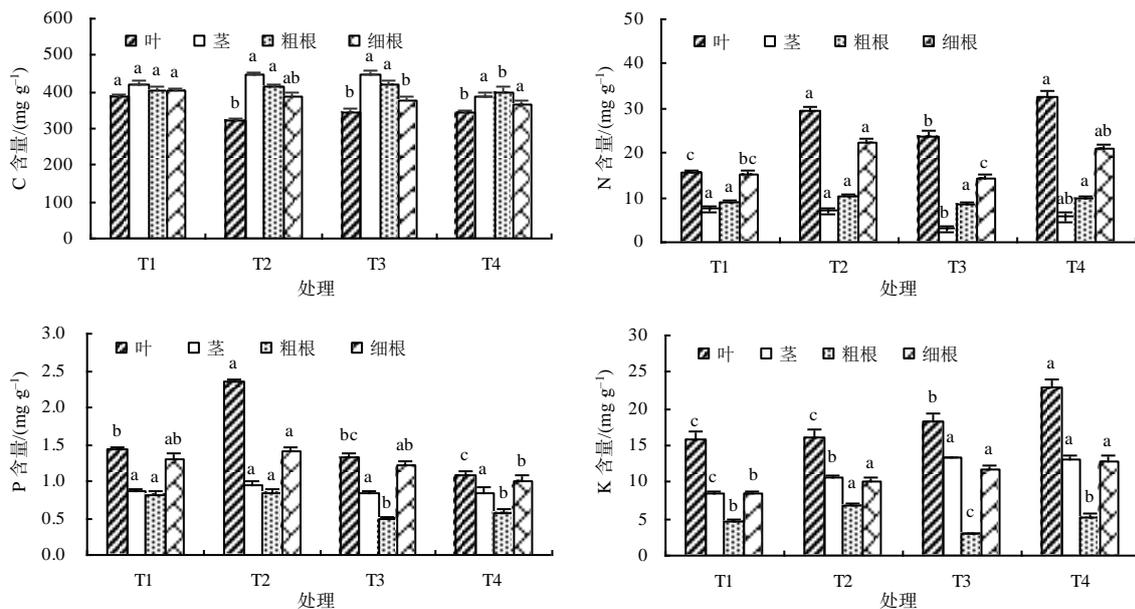
处理	叶片含水率/%	叶形指数	比叶面积/(cm ² g ⁻¹)	比叶质量/(g cm ⁻²)
T1	(0.87±0.01)a	1.43±0.07	(273.16±12.87)a	(38.13±2.11)b
T2	(0.83±0.01)b	1.33±0.02	(203.87±16.72)b	(52.26±3.63)a
T3	(0.88±0.01)a	1.36±0.05	(276.25±6.52)a	(36.42±0.84)b
T4	(0.87±0.01)a	1.46±0.07	(181.18±7.41)b	(56.50±2.98)a

同列数据同一指标不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3.2 遮阳对树番茄幼苗 C、N、P、K 含量的影响

从图 1 可以看出，树番茄幼苗各器官的 C、N、P、K 含量对遮阳程度的响应不一致。T4 处理树番茄幼苗茎、粗根、细根的 C 含量最小；T1 处理的叶片的 C 含量最大，显著大于 T2、T3、T4 处理的；不同遮阳处理下，树番茄幼苗叶片的 C 含量小于茎、粗根和细根的。4 种遮阳处理下树番茄幼苗叶、细根的 N 含量大于茎和粗根的，叶、细根、粗根、茎中的 N 含量依次降低； T3 处理下，茎、粗根和细

根中的 N 含量最小；T1 处理下，叶片的 N 含量最小。T2 处理下，树番茄幼苗叶片的 P 含量显著高于其他处理的；T3 处理下，茎和粗根的 P 含量最小；叶片和细根的 P 含量在 T4 处理下最小；不同遮阳处理下，树番茄幼苗叶、细根、茎、粗根中的 P 含量依次降低。4 种处理下，树番茄幼苗各器官的 K 含量差异较大；随着遮阳程度的加大，除粗根外，树番茄幼苗其他 3 种器官的 K 含量不断增加；叶、茎、细根、粗根的 K 含量依次降低。



不同小写字母表示同一器官不同处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

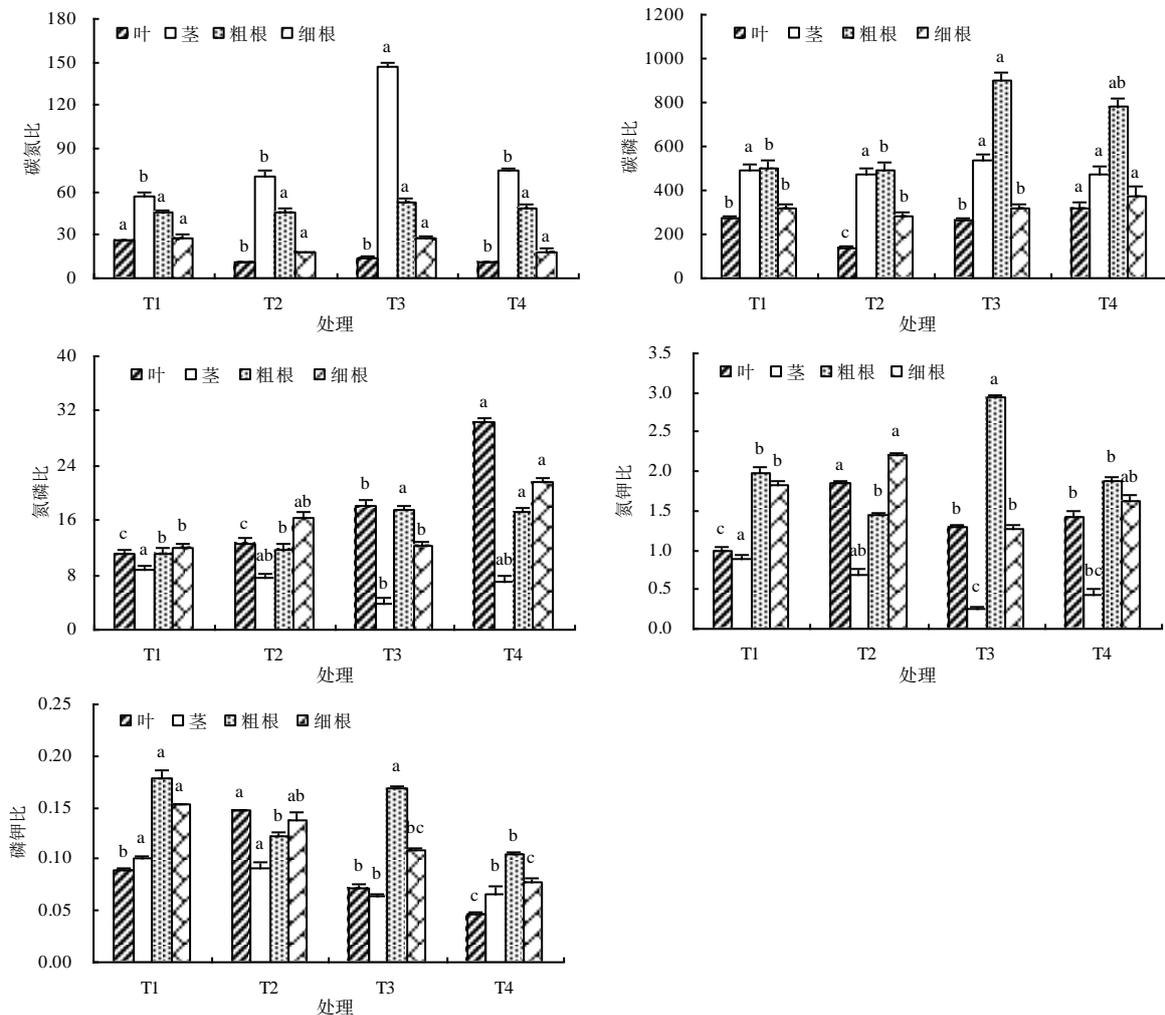
图 1 遮阳处理树番茄幼苗各器官的 C、N、P、K 含量

Fig.1 C, N, P and K contents of various organs of *Cyphomandra betacea* seedlings under different shade treatments

3.3 遮阳对树番茄幼苗 C、N、P、K 化学计量比的影响

从图 2 可以看出,不同遮阳处理下,树番茄幼苗茎、粗根、细根、叶的碳氮比依次减小;T3 处理下树番茄幼苗茎的碳氮比最大,与 T1 处理相比,茎的碳氮比增加了 61.24%。T3 处理下,树番茄幼苗粗根的碳磷比显著高于 T1、T2 的;叶和细根的碳磷比在 T4 处理下最大,茎和粗根的碳磷比在 T3 处理下达最大值。叶的氮磷比随遮阳程度的加大不断增大,在 T4 处理下最大。T1、T2 处理下,树番

茄幼苗叶片的氮磷比小于 14, T3、T4 处理下叶片的氮磷比大于 16。T3 处理下,树番茄幼苗粗根的氮钾比最大,茎的氮钾比最小,叶片和细根的氮钾比在 T2 处理下最大;各处理下,叶片的氮钾比均小于 2。细根的磷钾比随遮阳程度的加大逐渐降低,在 T1 处理下最大;叶片的磷钾比在 T2 处理下最大,茎、粗根、细根的磷钾比在 T1 处理下最大。不同遮阳处理下,树番茄幼苗叶、细根的碳氮比和碳磷比均小于茎和粗根的,而茎的氮磷比、氮钾比均小于叶、粗根和细根的。



不同小写字母表示同一器官不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

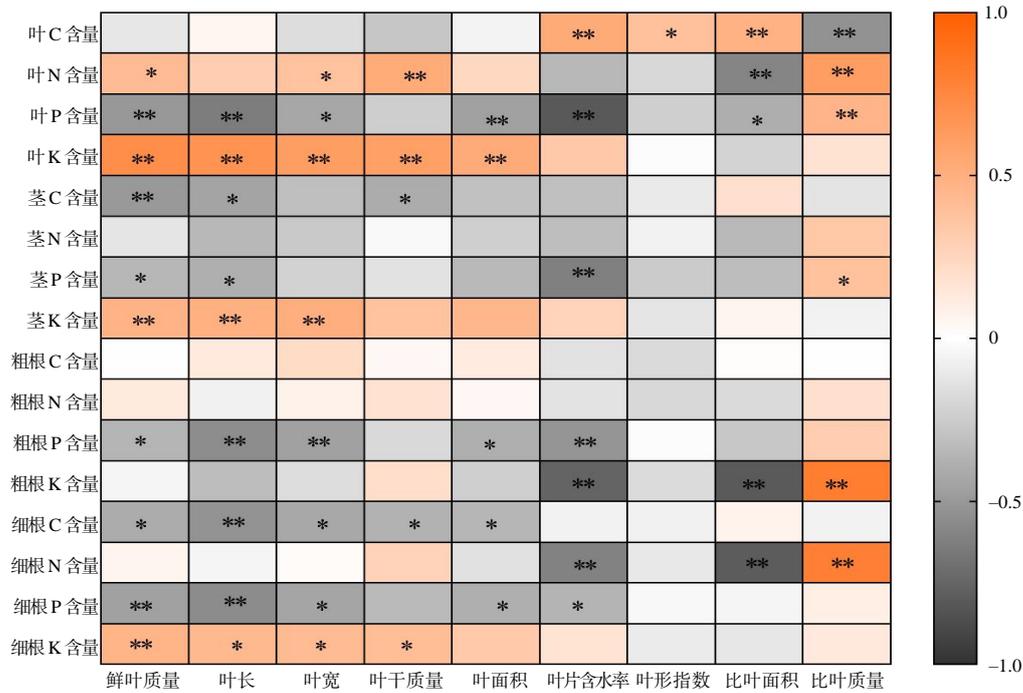
图 2 不同遮阳处理树番茄幼苗各器官的 C、N、P、K 化学计量比

Fig. 2 Chemometric ratios of C, N, P and K in various organs of *Cyphomandra betacea* seedlings under different shade treatments

3.4 树番茄幼苗的叶片性状与 C、N、P、K 含量的相关性分析

相关分析结果(图 3)表明,鲜叶质量、叶长、叶宽与叶、茎的 K 含量呈显著正相关;叶长与叶、粗根的 P 含量及细根的 C、P 含量呈显著负相关;比叶

面积与叶的 C 含量呈显著正相关,与叶、细根的 N 含量以及粗根的 K 含量呈显著负相关;叶片含水率与叶、茎、粗根的 P 含量以及粗根的 K 含量、细根的 N 含量呈显著负相关;比叶质量与叶的 N、P 含量和粗根的 K 含量以及细根的 N 含量呈显著正相关,与叶的 C 含量呈显著负相关。



**/*/*/*/*分别示 0.05、0.01 水平显著相关。

图 3 树番茄幼苗各器官的 C、N、P、K 含量与叶片性状的相关性

Fig.3 Correlation between C, N, P and K contents of various organs and leaf traits in *Cyphomandra betacea* seedlings

3.5 遮阳对树番茄幼苗叶片性状和各器官 C、N、P、K 含量表型可塑性指数的影响

由图 4 可知，树番茄幼苗的叶长、叶宽、叶面积、叶形指数、比叶面积、比叶质量、叶干质量以及叶片含水率的表型可塑性指数均没有超过 0.5，可塑性较小；叶的 N、P 含量以及茎的 N 含量和粗

根的 K 含量的表型可塑性指数均大于 0.5，粗根的 K 含量的表型可塑性指数最大，为 0.538。推测树番茄幼苗可通过改变叶片的 N、P 含量以及茎的 N 含量、粗根的 K 含量来适应光照变化。

4 结论与讨论

植物对光环境条件的改变非常敏感，能根据自身的特质调整其叶片形态，以利于最大限度地提高光能利用能力，适应光环境的变化^[3]。本研究发现，树番茄幼苗的叶片性状对光照变化的响应不同，叶长、叶宽、叶面积、比叶面积和叶片含水率部分处理间存在显著差异，而叶形指数对光照的响应没有显著规律。T3、T4 处理下树番茄幼苗的叶长、叶宽、鲜叶质量、叶干质量和叶面积均大于 T1、T2 处理的，可能是由于树番茄幼苗光能的利用和保护机制尚未完善，过强的光辐射超出了其光能利用范围^[19]。T3 处理下，树番茄幼苗的叶面积最大；T4 处理的比叶面积显著减小。表明适度遮阳下植物幼苗能通过扩大光合作用面积来获得更多的光资源，提高光合效率，制造更多有机物来满足生长发育的需要，而弱光则不利于树番茄幼苗叶片的生长。

为适应环境条件的变化，植物可通过调整营养元素以保持动态平衡。本研究中，树番茄幼苗各器

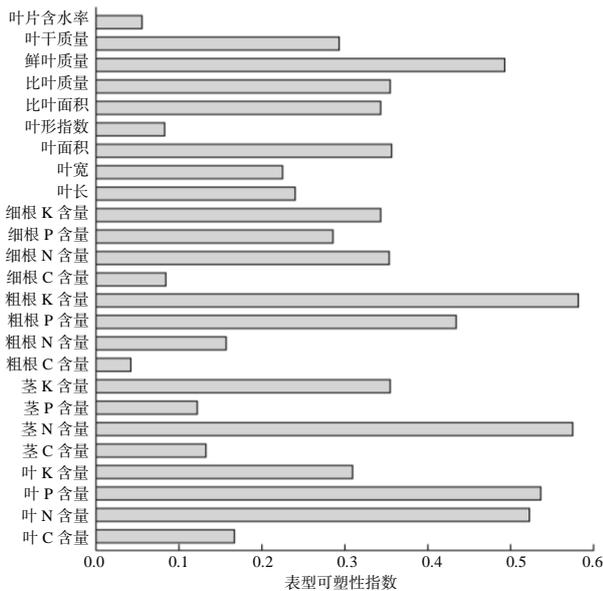


图 4 树番茄幼苗的叶片性状及各器官 C、N、P 含量表型可塑性指数

Fig.4 Phenotypic plasticity indices for leaf traits and C, N and P content of various organs in *Cyphomandra betacea* seedlings

官的 C、N、P、K 元素含量对遮阳处理响应程度不一致。全光照下树番茄幼苗叶片的 C 含量大于遮阳处理的, 强光下光合作用旺盛, 有利于 C 的积累; 弱光环境限制了 C 固定, 降低了 C 消耗。在不同遮阳程度下, 树番茄幼苗叶片的 N、P 含量最大, 茎和粗根的含量较小。叶片是植物同化和代谢的主要器官, 生理活动旺盛, 对养分的需求较多^[20]。弱光环境下, 为增大光合产物的同化过程, 叶片所需 N 含量不断增加, 以此来满足叶片的生理活动以及代谢需求^[21]。在不同遮阳处理下, 树番茄幼苗叶片中 K 含量最大, 且随着遮阳程度的加大不断增加。植物叶片的 K 含量与其抗旱性相关, 叶片的 K 含量越高, 其吸水能力越强^[22]。在遮阳处理下, 树番茄幼苗通过增加叶片的 K 含量来适应环境的变化。刘贤赵等^[23]研究表明, 适度遮阳可使番茄 N、P、K 元素含量增加。王辉等^[24]研究发现, 在低光照环境下叶片的 N、P 含量高于强光照环境的。树番茄幼苗在光照较弱的情况下, 叶片对 N、K 的吸收加强, 有利于树番茄幼苗提高光合利用和资源利用的能力。

C、N、P、K 是植物生长所需的基本元素, 其生态化学计量特征能够反映植物对各器官元素的分配, 可用于判断限制性元素以及养分循环、养分利用效率等^[20]。本研究中, 树番茄幼苗茎和粗根的碳氮比、碳磷比大于叶和细根的, 说明不同遮阳处理下 N、P 在运输器官中的利用效率较高, 可将更多的 N、P 用于生长, 使茎和粗根更快地生长^[25]。叶片的氮磷比是判断植物生长养分限制的指标之一。KOERSELMAN 等^[26]研究表明, 当植物氮磷比小于 14 时, 为 N 限制; 氮磷比大于 16 时, 为 P 限制; 而处于 14~16, 则为 N、P 共同限制。本研究中, 在 T1、T2 处理下, 树番茄叶片的氮磷比小于 14, 受 N 限制, 在 T3、T4 处理下, 树番茄幼苗叶片的氮磷比大于 16, 生长受 P 限制。在实际生产过程中, 应适当增施 P 肥, 并辅助施加 N 肥, 以提高产量。K 元素能提高植物抵御外界环境的能力^[27]。OLDE VENTERINK 等^[28]研究发现, 当植物叶片氮钾比大于 2.1, 磷钾比大于 0.29 时, 植物生长受 K 元素限制。本研究中, 树番茄幼苗叶片氮钾比小于 2.1, 磷钾比小于 0.29, 说明树番茄幼苗生长不受 K 元素限制。

植物依赖于自身的表型可塑性来调整对自然

界中各种资源的获取和消耗, 以维持自身正常的生长和代谢^[29]。本研究中, 树番茄幼苗的叶长、叶宽与叶、茎的 K 含量呈显著正相关; 比叶面积与叶、细根的 N 含量以及粗根的 K 含量呈显著负相关。表明遮阳环境下树番茄幼苗的叶片结构性状与各器官的 N、K 含量相互制约、相互影响。可塑性分析结果表明, 树番茄幼苗可能通过改变叶片的 N、P 含量以及茎的 N 含量、粗根的 K 含量来适应光照变化。

综上, 遮阳处理对树番茄幼苗的 C、N、P、K 含量及化学计量比有显著影响。树番茄幼苗通过调节相关指标来适应光照的变化, 50%遮阳可使树番茄幼苗的叶宽、叶面积、比叶面积有所增加, 过度遮阳则在一定程度起抑制作用。树番茄幼苗生长受 N、P 限制, 不受 K 元素限制, 在遮阳处理下, 加强对 N、P、K 的吸收, 以适应不利的外界环境。在栽植树番茄时, 为保证其更好地生长发育, 可以选择 50%的遮阳程度, 并施以适量的 N 肥和 P 肥。

参考文献:

- [1] 魏巍, 侯玉平, 彭少麟, 等. 不同光照强度对入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha*)和飞机草(*Chromolaena odorata*)生长及生物量分配的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6021-6028.
- [2] 史吟欣, 胡利珍, 张志飞, 等. 不同生境对野生金荞麦植物表型和营养成分的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 299-304.
- [3] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3098-3107.
- [4] 秦舒浩, 李玲玲. 遮光处理对西葫芦幼苗形态特征及光合生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4653-4656.
- [5] DAI Y J, SHEN Z G, LIU Y, et al. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(2/3): 177-182.
- [6] SARDANSJ, RIVAS-UBACHA, PEÑUELASJ. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1): 1-39.
- [7] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [8] 马志良, 杨万勤, 吴福忠, 等. 遮荫对紫花苜蓿地上

- 生物量和化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3139–3144.
- [9] ALI A A, XU C G, ROGERS A, et al. Global-scale environmental control of plant photosynthetic capacity[J]. Ecological Applications, 2015, 25(8): 2349–2365.
- [10] 智西民, 王梦颖, 牛畔青, 等. 遮荫对青桐幼苗生长性状与化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 664–671.
- [11] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 第七卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [12] 董琼, 李世民, 高尚杰, 等. 不同种源树番茄果实品质比较及综合分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 266–273.
- [13] 张庆良, 张凤霞, 丰宗新, 等. 树番茄引种栽培试验初报[J]. 山东林业科技, 2005, 35(3): 25–26.
- [14] KOU M C, YEN J H, HONG J T, et al. *Cyphomandra betacea* Sendt phenolics protect LDL from oxidation and PC12 cells from oxidative stress[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 458–463.
- [15] MUTALIB M A, RAHMAT A, ALI F, et al. Nutritional compositions and antiproliferative activities of different solvent fractions from ethanol extract of *Cyphomandra betacea*(tamarillo) fruit[J]. The Malaysian Journal of Medical Sciences, 2017, 24(5): 19–32.
- [16] 郭碧瑜, 周伟华, 叶青莲, 等. 树番茄的生物学特性及栽培技术[J]. 广东农业科学, 2007, 34(12): 102–103.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 赵宇航, 龚雪伟, 宁秋蕊, 等. 沿降水梯度白榆的枝叶性状可塑性及协同变异[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 324–332.
- [19] KITAO M, LEIT T, KOIKE T, et al. Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes[J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(1): 81–89.
- [20] REICH P B, TJOELKER M G, PREGITZER K S, et al. Scaling of respiration to nitrogen in leaves, stems and roots of higher land plants[J]. Ecology Letters, 2008, 11(8): 793–801.
- [21] 孙雪娇, 常顺利, 宋成程, 等. 雪岭云杉不同器官 N、P、K 化学计量特征随生长阶段的变化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1291–1298.
- [22] 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 白刺灌丛沙堆演化过程中叶片 C、N、P、K 含量及其生态化学计量的变化特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 102–110.
- [23] 刘贤赵, 康绍忠. 不同生长阶段遮荫对番茄光合作用、干物质分配与叶 N、P、K 的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2264–2271.
- [24] 王辉, 蔡志全, 蔡传涛, 等. 不同光照和营养条件下两种不同寿命热带先锋种的对比研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 134–141.
- [25] 王凯, 张大鹏, 宋立宁, 等. 氮沉降和降水增加对榆树幼苗不同器官碳氮磷分配格局的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(3): 172–183.
- [26] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441–1450.
- [27] 阎凯, 付登高, 何峰, 等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 353–361.
- [28] OLDE VENTERINK H, WASSEN M J, VERKROOST A W M, et al. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands[J]. Ecology, 2003, 84(8): 2191–2199.
- [29] 汪越, 刘楠, 任海, 等. 紫背天葵(*Begonia fimbriatipula* Hance)叶片形态和生理生态特征对不同光强的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 957–964.

责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳正