

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24100

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24100

卢玉鹏, 高柱, 朱玉麟, 毛积鹏, 姚东良, 王小玲. 基于生长生理适应性的多花黄精复合种植模式构建与评价[J]. 植物科学学报, 2025, 43 (2): 253-264

Lu YP, Gao Z, Zhu YL, Mao JP, Yao DL, Wang XL. Construction and evaluation of *Polygonatum cyrtonema* Hua intercropping based on the growth and physiological adaptability[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (2): 253-264

基于生长生理适应性的多花黄精复合种植模式构建与评价

卢玉鹏¹, 高柱¹, 朱玉麟¹, 毛积鹏¹, 姚东良¹, 王小玲^{1,2*}

(1. 江西省科学院生物资源研究所/特色果树茶叶种植与高值利用江西省重点实验室, 南昌 330096;

2. 江西省猕猴桃工程研究中心, 南昌 330096)

摘要: 多花黄精 (*Polygonatum cyrtonema* Hua) 多采用林下仿野生种植, 猕猴桃 (*Actinidia chinensis* Planch.) 果园林下环境与森林接近, 具备复合种植的潜在可行性。本研究通过设置不同猕猴桃品种 (‘红阳’、‘金艳’)、郁闭度 (60%、30%、全光照) 和种植密度 (株行距 25 cm×25 cm、25 cm×40 cm、35 cm×40 cm), 分析对多花黄精生长的影响, 以筛选适宜的种植模式。结果显示: ‘金艳’果园中, 多花黄精植株高度较高, 基径较粗; 60% 郁闭度果园中, 多花黄精叶片叶绿素含量较高, 丙二醛 (MDA) 含量和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性较低; 30% 郁闭度果园中, 植株高度较高; 而全光照条件下, 叶片相对含水量较低, 可溶性蛋白、脯氨酸、MDA、总酚、类黄酮含量较高, 过氧化氢酶 (CAT) 和 APX 活性较高; 低等密度模式中叶片 MDA 和总酚含量较低, 而高等密度中叶片 MDA 含量较高。综合而言, 猕猴桃果园复合种植多花黄精是可行的, 且适宜的种植模式为郁闭度 30%~60%、种植株行距 (25~35) cm×40 cm。

关键词: 多花黄精; 生理适应性; 复合种植; 光环境; 种植密度; 猕猴桃果园

中图分类号: S663.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 02-0253-12

Construction and evaluation of *Polygonatum cyrtonema* Hua intercropping based on the growth and physiological adaptability

Lu Yupeng¹, Gao Zhu¹, Zhu Yulin¹, Mao Jipeng¹, Yao Dongliang¹, Wang Xiaoling^{1,2*}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Plantation and High Valued Utilization of Specialty Fruit Tree and Tea, Institute of Biological Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Kiwifruit Engineering Research Center, Nanchang 330096, China)

Abstract: *Polygonatum cyrtonema* Hua is typically cultivated under forest conditions that mimic its natural habitat. The understory environment of *Actinidia chinensis* Planch. orchards shares similar ecological characteristics with forests, suggesting the potential feasibility of intercropping *P. cyrtonema* within *A. chinensis* orchards. However, optimizing an appropriate planting model and creating a suitable growth environment for *P. cyrtonema* requires experimental validation. This study assessed the growth and physiological adaptability of *P. cyrtonema* under different intercropping conditions by varying *A. chinensis* cultivars (‘Hongyang’ and ‘Jinyan’), canopy densities (60%, 30%, and full sunlight), and planting densities (row spacing of 25 cm×25 cm, 25 cm×40 cm, and 35 cm×40 cm). Results demonstrated that *P. cyrtonema* exhibited greater plant height and basal diameter in orchards planted with *A. chinensis* cv. Jinyan. Under 60% canopy density, chlorophyll content was elevated, while malondialdehyde (MDA) content and ascorbate peroxidase (APX) ac-

收稿日期: 2024-04-17, 接受日期: 2024-06-22。

基金项目: 江西省科学院科技专项 (2022YRCG001, 2022YJC2003, 2021YSBG21020)。

作者简介: 卢玉鹏 (1992-), 男, 助理研究员, 研究方向为果园生态栽培和管理 (E-mail: luy1992@163.com)。

* 通信作者 (Author for correspondence. E-mail: wangxiaoling1979@126.com)。

tivity were lower. A 30% canopy density promoted greater plant height. In full sunlight, leaves had reduced relative water content but exhibited increased soluble protein, proline, MDA, total phenol, and flavonoid concentrations, along with higher catalase (CAT) and APX activity. Lower planting densities resulted in reduced MDA and total phenol concentrations in leaves, whereas higher planting densities were associated with increased MDA content. These findings indicate that intercropping *P. cyrtoneuma* within *A. chinensis* orchards is feasible. Optimal planting conditions were a canopy density of 30%–60% and a row spacing of (25–35) cm×40 cm.

Key words: *Polygonatum cyrtoneuma*; Physiological adaptability; Complex planting; Light environment; Planting density; *Actinidia chinensis* orchard

多花黄精 (*Polygonatum cyrtoneuma* Hua) 为百合科黄精属 (*Polygonatum*) 多年生草本植物, 其根茎可以入药, 是我国传统的中药材之一, 具有补气养阴、健脾润肺、增强免疫、调节血糖、抗肿瘤等功效^[1, 2]。目前, 国内对黄精的市场需求较大, 而其野生资源较少, 因而人工栽培黄精产业蓬勃发展, 成为了乡村振兴重要的发展产业之一。多花黄精属于喜阴植物, 因而多采用林下仿野生种植。林下复合种植不仅提供了天然遮阴环境, 还可以改善土壤性质, 减少水土流失, 是一种高效生态的栽培模式^[3, 4]。目前, 多花黄精在毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 以及山核桃 (*Carya cathayensis* Sarg.)、锥栗 (*Castanea henryi* (Skan) Rehder & E. H. Wilson)、油茶 (*Camellia oleifera* Abel) 等林下均有种植^[2, 5, 6], 即主要集中在林业系统。而对于果园系统, 一些园林水果, 如猕猴桃 (*Actinidia chinensis* Planch.) 等, 其林下环境与森林环境较为接近, 同样具备栽培多花黄精的可行性, 而目前仍缺乏足够的关注。

果园林下套种草本植物, 可以提高土壤养分含量, 增加土壤团聚体稳定性, 改善土壤酶活性和微生物数量, 提高果实产量和品质^[7-9]。秦秦等^[10]在上海金山猕猴桃示范区进行了行间种植白三叶草 (*Trifolium repens* L.)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 试验, 发现黑麦草对土壤有机质和大量元素有很好的调控效果, 而白三叶草对土壤微量元素有很好的调控效果。Michel 等^[11]在智利的蓝莓 (*Vaccinium uliginosum* L.) 果园进行了生草栽培试验, 发现生草处理可以提高蓝莓产量, 降

低皮肉比, 增加花青素等物质的含量。而对于药用草本植物, 赵俊侠等^[12]在陕西省杨凌示范区猕猴桃果园进行了套种板蓝根 (*Isatis tinctoria* L.) 试验, 发现在建园前期 (1~3 年), 果园郁闭度相对较低, 板蓝根生长较好, 而后林下光照不足, 不再适宜板蓝根生长。张彩霞^[13]在甘肃天水地区樱桃 (*Prunus pseudocerasus* Lindl.) 园进行了板蓝根、旱半夏 (*Pinellia ternata* (Thunb.) Ten. ex Breitenb.) 和款冬花 (*Tussilago farfara* L.) 套种, 取得了良好的经济生态效益。因此, 在猕猴桃果园复合种植多花黄精是具有可行性和效益前景的, 但要构建科学的种植模式, 必须营造植物生长最适宜的环境。

作为一种喜阴植物, 光环境是影响多花黄精生长的重要因素。研究表明, 多花黄精适宜生长的林冠透光率在 30%~70%^[14], 但在此范围内, 不同的光环境对多花黄精的生长影响也存在差异。在重庆川黄檗 (*Phellodendron chinense* C. K. Schneid.) 林下, 透光率低 (45% 左右), 植株地上部分生物量更大, 且总多糖含量最高; 而高透光率 (68% 左右), 地下部分生物量更大^[15]。在江西铜鼓县毛竹林下, 透光率 50%~70% 的植株根茎长度、厚度和鲜重均大于透光率 30% 的植株^[16]。种植密度是影响植物获取光照、水分、肥力等资源的关键因素, 但不同的研究对种植密度的报道存在差异, 株行距 10 cm×25 cm、25 cm×40 cm、30 cm×35 cm 等均有报道^[15]。此外, 果树的叶形、树冠、根系等也会通过影响光照和土壤等条件, 进而影响林下植物的生长。为此, 本研究设置不同的猕猴桃品种、郁闭度和种植密度条件, 分析对多花黄精生长的影响, 以期筛选出最适宜的猕猴桃果园多花黄精复合种植模式。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地点为江西省奉新县江西省科学院猕猴桃产业基地（28°40'36"N，115°19'02"E）。基地属亚热带季风气候，土壤为红壤性土^[17]。多花黄精种植采用带有完整顶芽的种茎（根茎）进行，根茎采购于江西省安福县绿野药材专业合作社。猕猴桃果园复合种植多花黄精效果如图1所示。

1.2 试验设计

根据多花黄精生长环境需求，设置了8种复合种植模式（表1）。模式中包括2种猕猴桃品种，分别是早熟的红肉猕猴桃品种‘红阳’（‘Hongyang’），晚熟的黄肉猕猴桃品种‘金艳’（‘Jinyan’）。3种郁闭度，分别是4~5年树势较强的盛果期果园，郁闭度约60%；2~3年树势

较弱的幼龄果园，郁闭度约30%；全光照对照组为新建园，郁闭度0%。于2021年6~8月，每月选择3个天气晴朗的日期，中午12:00测定‘红阳’和‘金艳’果园林下光照强度，并计算郁闭度。3种植密度，株行距分别为25 cm×25 cm、25 cm×40 cm、35 cm×40 cm。每种模式种植3行，每行为4 m×10 m田畦，共120 m²，不同处理之间留有保护行。

于2021年10月下旬，将果园土地翻耕施肥，每公顷施复合肥1 125 kg，施肥后翻耕起垄，两垄间距1 m。种植时施有机肥，每公顷2 250 kg，并按照对应种植密度在垄顶挖穴。每穴种植1株种茎，每株根茎至少带有2个顶芽，种植时顶芽朝上，覆盖土壤3~4 cm以盖住种茎。种植完毕进行1次灌溉，并在表面覆盖3~4 cm厚度的锯末以保湿防草。8种模式采用相同的水肥管理措施。



图1 猕猴桃果园复合种植多花黄精

Fig. 1 *Polygonatum cyrtoneura* intercropping in an *Actinidia chinensis* orchard

表1 猕猴桃-多花黄精复合种植模式设置

Table 1 Setup of *Actinidia chinensis* and *Polygonatum cyrtoneura* intercropping system

编号 Number	果树品种 Variety	郁闭度 Canopy density / %	光照强度 Light Intensity / lux	光量子通量密度 Photon flux density / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	株行距 Row spacing / cm
H1	‘红阳’	60	30 875±3 450	702±307	25×40（中密度）
H2	‘红阳’	30			25×40（中密度）
H3	‘红阳’	30	60 788±3 319	1 133±305	35×40（低密度）
H4	‘红阳’	30			25×25（高密度）
J1	‘金艳’	30			25×25（高密度）
J2	‘金艳’	30	59 246±2 136	1 111±288	25×40（中密度）
J3	‘金艳’	30			35×40（低密度）
CK	-	0	84 206±5 032	1 470±330	25×40（中密度）

注：‘金艳’盛果期果园树势较强，郁闭度一般在70%以上，林下光照条件不适宜多花黄精生长，因而只选择了幼龄果园作为研究对象。

Notes: During the peak fruit-bearing period, trees in the ‘Jinyan’ orchard exhibited strong growth, with a canopy density generally exceeding 70%. Understory light conditions were unsuitable for *P. cyrtoneura* growth; therefore, only young orchards were selected for this study.

根据多花黄精生长特性,于 2022 年 3-6 月,每种模式随机选取 10 株作为标准株,连续监测植株高度和基径变化,分析多花黄精的生长适应性。其中高度为植株地上茎部到顶芽的长度,采用米尺测量;基径为距地面 1 cm 处茎粗,采用游标卡尺测量^[15]。根据多花黄精生理需求和试验地气候特点,选择强辐射、高气温、少降水的 7 月中旬,每株标准株采集 3 片成熟叶片,每种模式共采集 30 片叶片,带回实验室,分析各项生理指标。

1.3 研究方法

叶片相对含水量测定参照 Gao 等^[18]的方法。取 5 片不同标准株的叶子,擦去表面泥土等杂物后,称量鲜质量 (FW)。然后将叶子置于蒸馏水中浸泡 8 h,用滤纸吸干表面水分后称量总质量 (TW)。将叶子装入信封,烘箱 105 ℃ 杀青 0.5 h,80 ℃ 烘干至恒重,称量干质量 (DW)。叶片相对含水率 (RLWC) 计算公式为: $RLWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100\%$ 。

叶绿素测定方法参照张维等^[19]的方法。取 0.2 g 新鲜叶片组织,放入研钵中,加入少量石英砂和碳酸钙,再加入 95% 乙醇,研磨组织成匀浆并颜色变白,静置 5 min。将提取液过滤至棕色容量瓶中,并用乙醇定容。采用紫外分光光度计,在波长 665 nm (A_{665}) 和 649 nm (A_{649}) 处测定吸光度。叶绿素 a 浓度 (Chla) 计算公式为: $Chla = 13.95A_{665} - 6.8A_{649}$ 。叶绿素 b 浓度 (Chlb) 计算公式为: $Chlb = 24.96A_{649} - 7.32A_{665}$ 。

渗透调节物质:可溶性糖含量参照赵海云等^[20]采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量参照韩富亮等^[21]采用二喹啉甲酸 (BCA) 法测定;脯氨酸含量参照 Gao 等^[18]采用磺基水杨酸提取,酸性茚三酮比色法测定;丙二醛 (MDA) 含量参照王小玲等^[22]采用硫代巴比妥酸法测定;过氧化氢 (H_2O_2) 含量参照郑飞雪等^[23]采用硫酸钛法测定。

次生代谢物:参照郝岩等^[24]的方法,总酚采用福林酚法测定,类黄酮采用硝酸铝法测定。

抗氧化酶活性测定:参照 Caverzan 等^[25]的方法,超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用黄嘌呤氧化酶-NBT 法测定,过氧化氢酶 (CAT) 活性采用碘量法测定;过氧化物酶 (POD) 活性参照 Gao 等^[18]采用碘量法测定;抗坏血酸过氧化物酶

(APX) 活性参照 Zhang 等^[26]采用 AsA 比色法测定。以上指标均采用试剂盒测定,每种处理重复测定 3 次,试剂盒购于北京索莱宝科技有限公司。

1.4 数据分析

不同模式之间的数据差异显著性检验采用单因素方差分析 (ANOVA) 方法,多重比较采用最小显著差异法 (LSD) ($P < 0.05$)。采用相关性分析和主成分分析对多花黄精生长生理指标进行整理,根据相关系数 (Pearson)、相关显著性及主成分得分筛选出反映多花黄精生长生理适应性的综合指标。然后,采用多因素方差分析方法检验 3 种因素 (果树品种、郁闭度、种植密度) 对对应综合指标的影响显著性。采用 SPSS 26 软件进行数据分析, SigmaPlot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

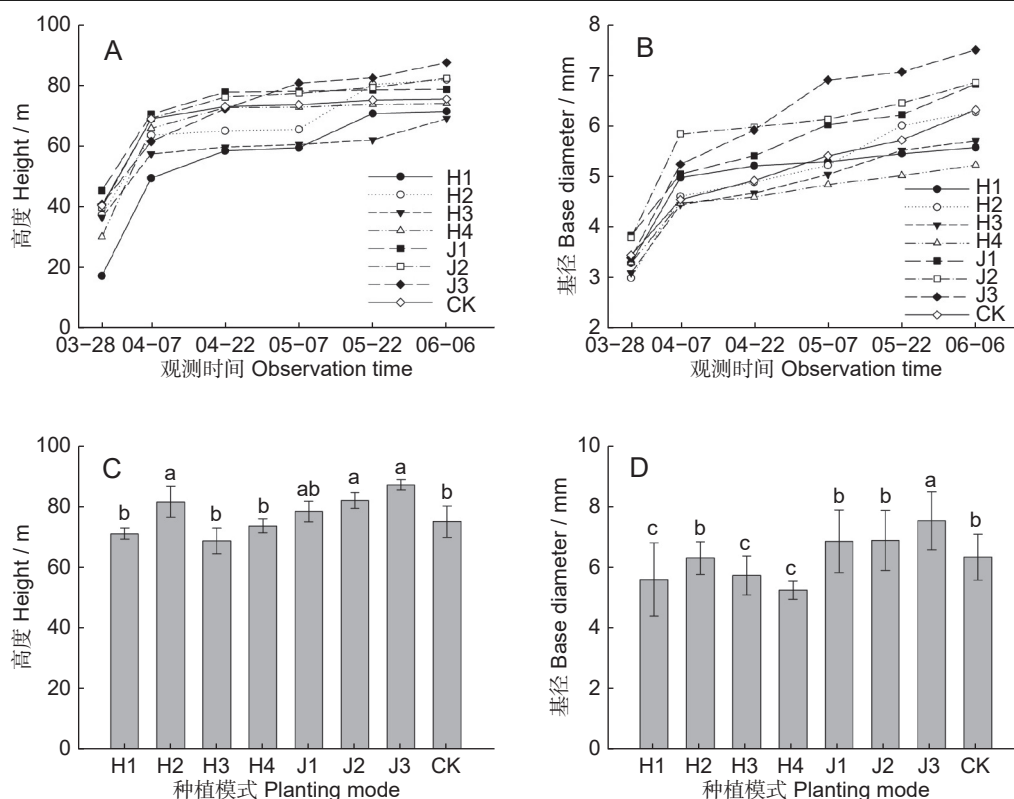
2.1 多花黄精生长适应性

本研究发现,多花黄精于 3 月底开始萌发,4 月上旬开始植株高度和基径快速生长,5 月上旬之后植株高度和基径生长趋于平缓 (图 2)。截止至 6 月上旬,‘金艳’果园林下种植的多花黄精植株 (J1、J2、J3) 高度较高,约 80 cm,基径较粗,约 7 mm;而‘红阳’果园的多花黄精植株 (H1、H3、H4) 高度较低,约 70 cm,基径较细,约 5.5 mm。

2.2 多花黄精生理适应性

通过分析叶片生理性状表明,不同模式中多花黄精叶片含水量、叶绿素、渗透调节物质等存在显著差异 (表 2)。对于叶片中相对含水量,‘红阳’果园中等和低等种植密度 (H2、H3) 含量较高,超过 90%,而‘金艳’果园中等密度和对照组 (J2、CK) 含量较低,不足 85%。对于叶绿素 a 和叶绿素 b,高郁闭度模式 (H1) 含量最高,对照组含量较低。对于可溶性糖,‘金艳’果园中等密度 (J2) 含量最高,而高郁闭度 (H1)、低等种植密度 (H3、J3) 和对照组 (CK) 含量较低。对于可溶性蛋白,高郁闭度 (H1) 和对照组 (CK) 含量较高。对于脯氨酸,‘红阳’果园中等密度和对照组 (J2、CK) 含量较高,而‘金艳’果园中等和低等密度 (J2、J3) 含量较低。

通过分析多花黄精叶片中 MDA、 H_2O_2 、次生代谢物以及抗氧化酶活性,表明不同模式中多花



A: 多花黄精生长期高度; B: 生长期基径; C: 6月上旬高度; D: 6月上旬基径。不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

A: Plant height during *P. cyrtoneura* growth period; B: Basal diameter during growth period; C: Height in early June; D: Basal diameter in early June. Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). Same below.

图 2 不同模式中多花黄精植株高度和基径生长变化

Fig. 2 Changes in height and basal diameter of *Polygonatum cyrtoneura* under different modes

表 2 不同模式中多花黄精叶片含水率、叶绿素及渗透调节物质含量

Table 2 Water, chlorophyll, and osmotic compound content in *Polygonatum cyrtoneura* leaves in different modes

模式 Mode	相对含水量 Relative water content / %	叶绿素 a Chlorophyll a / mg/g	叶绿素 b Chlorophyll b / mg/g	可溶性糖 Soluble sugar / mg/g	可溶性蛋白 Soluble protein / mg/g	脯氨酸 Proline / μ g/g
H1	85.27 \pm 1.78b	1.09 \pm 0.07a	0.54 \pm 0.04a	26.02 \pm 6.52c	96.55 \pm 9.69a	267.00 \pm 69.80b
H2	91.30 \pm 2.30a	0.79 \pm 0.03ab	0.38 \pm 0.02b	41.15 \pm 7.80b	80.75 \pm 23.01b	345.50 \pm 19.78a
H3	90.54 \pm 5.69a	1.06 \pm 0.29a	0.53 \pm 0.20a	23.15 \pm 5.36c	75.05 \pm 4.48b	279.61 \pm 41.34b
H4	87.01 \pm 4.74ab	1.08 \pm 0.25a	0.52 \pm 0.14a	38.16 \pm 3.28b	82.74 \pm 9.36b	284.05 \pm 20.30b
J1	88.64 \pm 5.70ab	0.96 \pm 0.02a	0.46 \pm 0.02a	48.80 \pm 9.32b	73.38 \pm 15.94b	276.70 \pm 49.31b
J2	82.99 \pm 6.92b	0.52 \pm 0.05b	0.26 \pm 0.02c	61.91 \pm 14.11a	67.53 \pm 24.85b	231.40 \pm 21.63c
J3	89.87 \pm 3.48a	0.97 \pm 0.07a	0.46 \pm 0.06a	22.99 \pm 6.23c	90.36 \pm 14.72ab	246.62 \pm 25.63c
CK	84.36 \pm 5.06b	0.46 \pm 0.07b	0.23 \pm 0.03c	12.07 \pm 3.32d	96.63 \pm 10.74a	315.93 \pm 42.11a

注: 同列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences, $P<0.05$.

黄精生理适应性存在显著差异 (图 3、图 4)。对于 MDA, ‘金艳’果园中等和高等密度以及对照组 (J1、J2、CK) 含量较高, 而高郁闭度模式 (H1) 含量最低。对于 H_2O_2 , ‘金艳’果园低等密度 (J3) 含量最高, 而‘红阳’果园低等密度 (H3) 含量最

低。对于总酚, 中等密度和对照组 (H2、J2、CK) 含量较高。对于类黄酮, 对照组 (CK) 含量最高, 而‘红阳’果园 (H1、H3、H4) 含量较低。

对于 SOD, ‘红阳’果园中等密度 (H2) 酶活性最高, ‘红阳’果园低等密度和对照组 (H3、

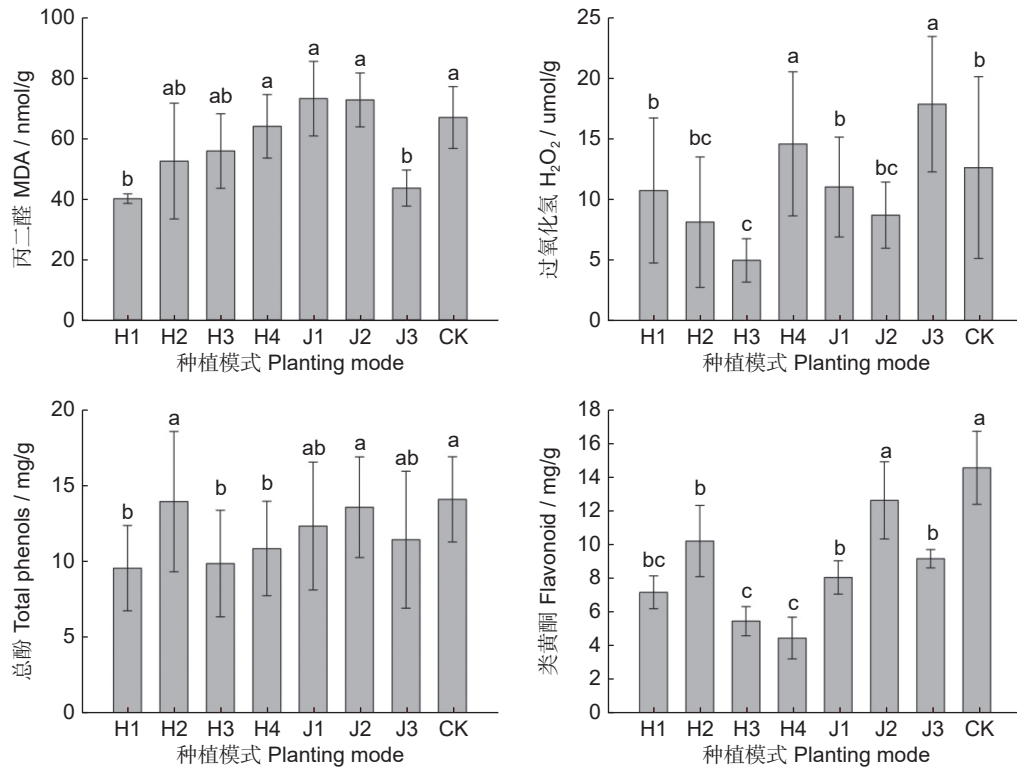


图 3 不同模式中多花黄精叶片丙二醛、过氧化氢及次生代谢物含量

Fig. 3 Malondialdehyde, hydrogen peroxide, and secondary metabolite content in *Polygonatum cyrtoneura* leaves in different modes

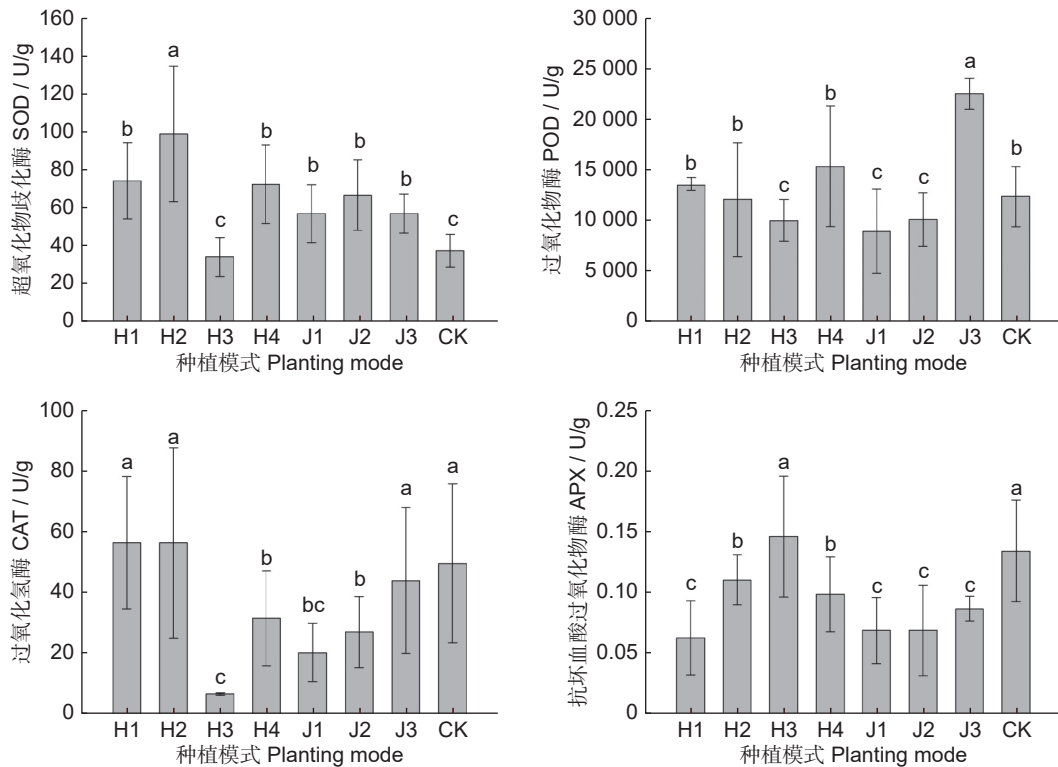


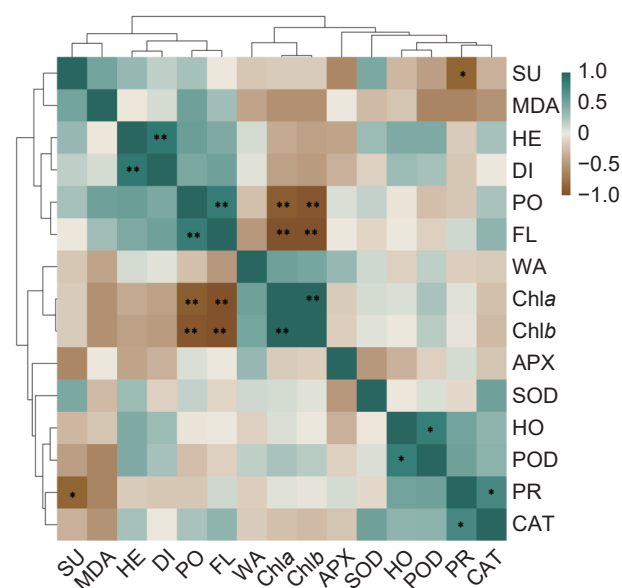
图 4 不同模式中多花黄精叶片抗氧化酶活性

Fig. 4 Antioxidant enzyme activity in *Polygonatum cyrtoneura* leaves in different modes

CK) 酶活性较低。对于 POD, ‘金艳’ 果园低等密度 (J3) 酶活性最高, ‘金艳’ 果园中等和高等密度 (J1、J2) 酶活性较低。对于 CAT, ‘红阳’ 果园中等密度、‘金艳’ 果园低等密度以及对照组 (H1、H2、J3、CK) 酶活性较高, ‘红阳’ 果园低等密度 (H3) 酶活性最低。对于 APX, ‘红阳’ 果园低等密度和对照组 (H3、CK) 酶活性较高, 高郁闭度和 ‘金艳’ 果园 (H1、J1、J2、J3) 酶活性较低。

2.3 多花黄精生长生理适应性综合评价

根据 Person 相关性分析结果, 高度与基径, 总酚与类黄酮, 叶绿素 *a* 与叶绿素 *b*, 彼此之间为极显著正相关 ($P<0.01$) (图 5)。H₂O₂ 与 POD, 可溶性蛋白与 CAT, 彼此之间为显著正相关 ($P<0.05$)。总酚与叶绿素 *a*, 总酚与叶绿素 *b*, 类黄酮与叶绿素 *a*, 类黄酮与叶绿素 *b*, 彼此之间为极显著负相关 ($P<0.01$)。可溶性糖与可溶性蛋白为显著负相关 ($P<0.05$)。根据主成分分析结果,



SU: 可溶性糖; MDA: 丙二醛; HE: 植株高度; DI: 植株基径; PO: 总酚; FL: 类黄酮; WA: 相对含水量; Chla: 叶绿素 *a*; Chlb: 叶绿素 *b*; APX: 抗坏血酸过氧化物酶; SOD: 超氧化物歧化酶; HO: 过氧化氢; POD: 过氧化物酶; PR: 脯氨酸; CAT: 过氧化氢酶。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。

SU: Soluble sugar; MDA: Malondialdehyde; HE: Height; DI: Basal diameter; PO: Total phenols; FL: Flavonoid; WA: Relative water content; Chla: Chlorophyll *a*; Chlb: Chlorophyll *b*; APX: Ascorbate peroxidase; SOD: Superoxide dismutase; HO: H₂O₂; POD: Peroxidase; PR: Proline; CAT: Catalase.

图 5 多花黄精生长生理指标相关性热图

Fig. 5 Correlation heatmap of *Polygonatum cyrtonema* growth and physiological indices

主成分 1 方差百分比为 33.26%, 其中得分绝对值在 0.8 以上的为叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总酚、类黄酮; 主成分 2 方差百分比为 24.30%, 得分绝对值在 0.8 以上的为 POD (表 3)。根据相关性和主成分分析综合结果, 选择高度代表生长指标, 叶绿素 *a*、可溶性蛋白、MDA、总酚和 POD 代表生理指标, 共 6 个指标作为反映多花黄精生长生理适应性的综合指标。

根据多因素方差分析结果, 猕猴桃品种影响多花黄精植株高度、叶片叶绿素 *a*、可溶性蛋白和总酚含量, 果园郁闭度影响植株高度、叶片叶绿素 *a* 和总酚含量, 多花黄精种植密度影响叶片叶绿素 *a*、MDA 和总酚含量 (表 4)。具体而言, ‘金艳’ 果园中多花黄精植株高度较高, 叶片叶绿素 *a* 含量较低, 总酚含量较高 (图 6)。高郁闭度模式中叶片叶绿素 *a* 含量较高, 总酚含量较低; 中郁闭度模式植株高度较高; 低郁闭度模式叶片叶绿素 *a* 含量较低, 总酚含量较高。低等种植密度模式叶片 MDA 和总酚含量较低; 中等密度模式叶片叶绿素 *a* 含量较低, 总酚含量较高; 高等密度叶片 MDA 含量较高。

表 3 多花黄精生长生理指标主成分分析
Table 3 Principal component analysis of *Polygonatum cyrtonema* growth and physiological indices

指标 Index	PC1	PC2	PC3
方差百分比 / %	33.256	24.301	17.026
高度	0.559	0.502	0.548
基径	0.580	0.343	0.337
相对含水量	-0.459	0.023	0.227
叶绿素 <i>a</i>	-0.934	-0.008	0.328
叶绿素 <i>b</i>	-0.952	-0.063	0.283
可溶性糖	0.398	-0.464	0.761
可溶性蛋白	-0.252	0.766	-0.510
H ₂ O ₂	-0.010	0.771	0.147
MDA	0.603	-0.613	-0.003
总酚	0.923	0.064	-0.041
类黄酮	0.901	0.249	-0.294
SOD	0.035	0.229	0.620
APX	-0.108	-0.191	-0.735
POD	-0.251	0.850	0.139
CAT	0.151	0.789	-0.089

表 4 不同模式对多花黄精生长生理适应性影响的多因素方差分析
Table 4 Multivariate analysis of variance on effects of different modes on *Polygonatum cyrtonea* growth and physiological adaptability

组合因子 Factors	高度 Height	叶绿素 a Chlorophyll a	可溶性蛋白 Soluble protein	丙二醛 MDA	总酚 Total phenols	过氧化物酶 POD
果树品种	0.003**	0.030*	0.010*	0.303	0.010*	0.499
果园郁闭度	0.041*	0.022*	0.745	0.178	0.008**	0.707
多花黄精种植密度	0.132	0.005**	0.231	0.026*	0.005**	0.115
品种×郁闭度	-	-	0.642	-	-	-
品种×密度	0.054	0.491	-	0.055	0.087	0.426
郁闭度×密度	-	-	0.256	-	-	-
品种×郁闭度×密度	-	-	-	-	-	-

Notes: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

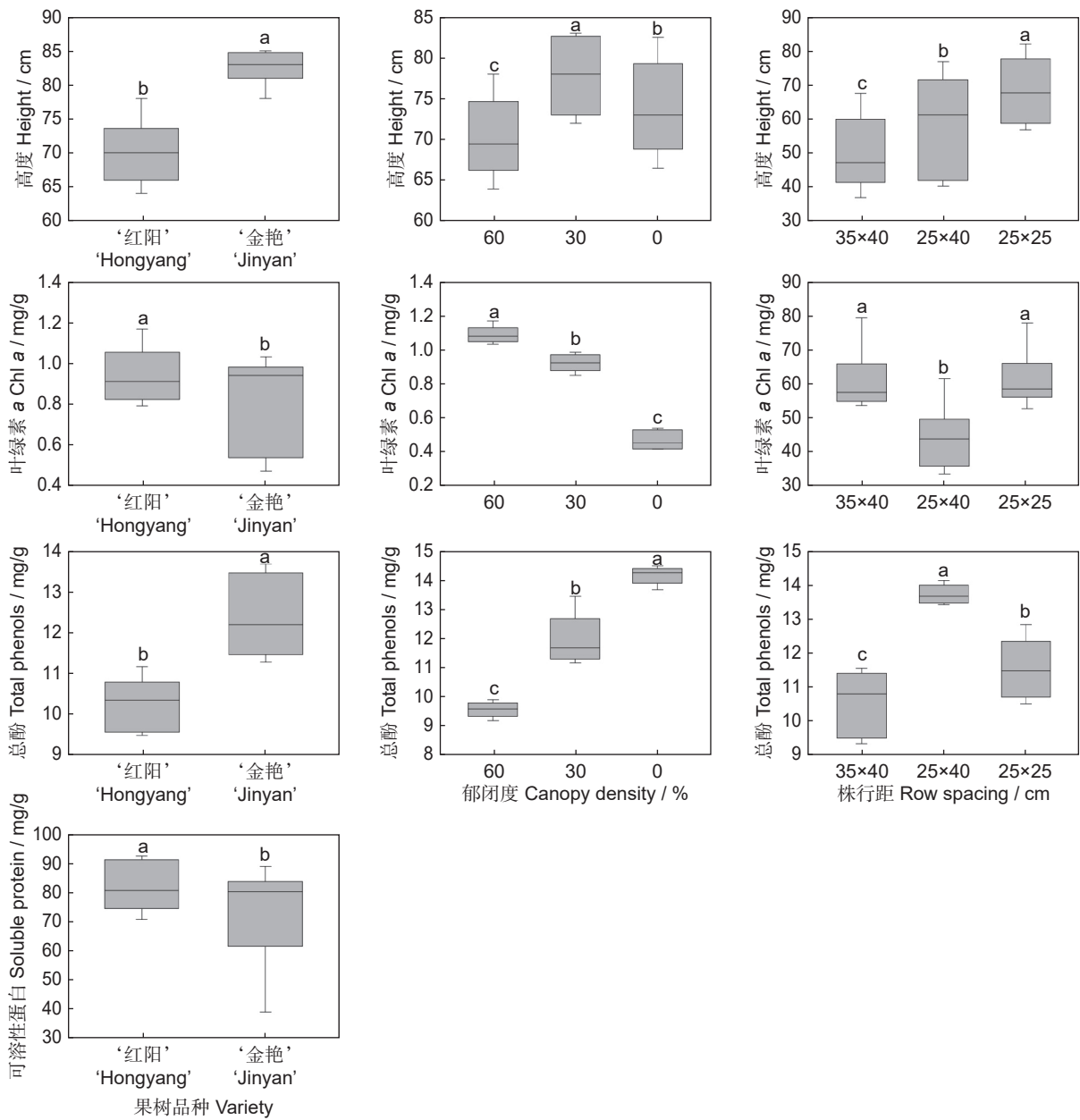


图 6 猕猴桃品种、郁闭度及种植密度对多花黄精生长生理适应性的影响
Fig. 6 Effects of fruit variety, canopy density, and planting density on *Polygonatum cyrtonea* growth and physiological adaptability

3 讨论

根据不同种植模式中多花黄精的株高、基径、叶绿素、渗透调节物质、次生代谢物、抗氧化酶活性等, 果园郁闭度、种植密度和果树品种对多花黄精的生长生理适应性均有不同程度的影响。果园郁闭度直接影响多花黄精生长的林下光环境, 而光是植物的必需条件, 影响植物的生长发育、光合作用、营养物质的吸收转运分配、形态结构等一系列生理生化活动^[27]。光合色素是植物进行光合作用时捕获和利用光能的重要物质, 对光环境变化敏感。本研究中, 高郁闭度环境下多花黄精的叶片叶绿素 *a* 和 *b* 含量最高, 而全光照条件下叶绿素含量最低。换言之, 弱光环境导致叶绿素含量上升, 这在多种植物的研究中均有发现, 包括多花黄精、蛇莓委陵菜 (*Potentilla centigrana* Maxim.)、东方草莓 (*Fragaria orientalis* Losinsk.)、侧金盏花 (*Adonis amurensis* Regel & Radde) 等^[18, 28, 29]。这是植物对弱光环境的适应表现, 特别是喜阴植物, 通过增加叶片中叶绿素的含量, 从而提高对光能的捕获和利用能力^[30, 31]。而在强光条件下, 植物通过降低叶绿素含量, 削弱捕光能力, 让过多的光能通过热量和荧光耗散掉, 避免光合反应中心受害。

可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸是植物体细胞中的渗透调节物质, 可以调控细胞水势, 以应对外界环境胁迫^[18, 32]。高郁闭度果园和全光照条件下, 多花黄精叶片中可溶性糖含量较低, 可溶性蛋白含量较高, 但全光照条件下脯氨酸含量较高。可溶性糖是光合作用的产物, 过强和过弱的光环境均会抑制光合作用, 导致可溶性糖合成减少, 这与童龙等^[29]的研究结果相一致。可溶性蛋白含量同时也是植物氮代谢水平的反映, 弱光环境下多花黄精叶片仍维持较高的可溶性蛋白含量, 表明氮代谢水平较高, 是耐阴性较强的表现^[31]。而全光照条件下, 较高的可溶性蛋白和脯氨酸可使植物体增加细胞渗透压, 缓解氧化损伤, 以满足细胞正常生长的结果。

此外, 高郁闭度环境下, 多花黄精叶片中的MDA、类黄酮和总酚含量较低, APX活性较低; 而全光照条件下, 叶片中MDA、类黄酮和总酚含

量较高, APX、CAT活性较高。MDA是植物体在受到外界胁迫时, 膜脂质发生过氧化反应所产生的物质^[33], MDA含量越高, 说明植物体细胞膜过氧化水平越高, 即受到损害越严重。对于多花黄精, 全光照属于强光胁迫, 导致细胞内活性氧的产生和积累, 进而膜脂质发生过氧化反应产生MDA。同时, 植物体的抗氧化系统也被激活, 对应的是抗氧化酶活性上升。抗氧化酶可以清除植物体内的活性氧, 例如, CAT可以分解H₂O₂, 是最主要的H₂O₂清除酶, 而APX可以催化H₂O₂氧化抗坏血酸(AsA), 是清除活性氧和参与抗坏血酸代谢的酶之一^[34]。类黄酮和总酚是植物次生代谢物, 也是植物体中的非酶抗氧化剂系统组成部分, 可以清除活性氧自由基, 与酶促抗氧化剂系统协同作用^[35]。因此, 强光胁迫下, 叶片中类黄酮和总酚含量上升。同理, 在高郁闭度果园中, 多花黄精对弱光环境的适应性较强, 植物体未受到严重胁迫, 活性氧的产生和清除处于稳定状态, MDA含量较低, 抗氧化系统不活跃, 因而类黄酮和总酚含量较低, APX活性较低。

种植密度影响着植物获取光、水分、土壤养分等生长必需资源的情况, 密度过高, 则个体间竞争剧烈, 植物生长受到限制, 密度过低, 则总体产量下降, 导致资源浪费^[15]。高密度种植的多花黄精叶片中叶绿素和MDA含量较高, 表明植株间对光资源的获取存在竞争, 植物体合成更多的叶绿素以捕获和利用更多的光能, 这在紫花苜蓿等植物中也被发现^[36]。同时, 这种竞争对植物体造成了一定程度的胁迫, 活性氧积累而膜脂质过氧化, MDA含量上升。低密度种植的多花黄精叶片中MDA和总酚含量均较低, 表明植物体未受到严重胁迫。

不同品种的猕猴桃往往在物候期、叶片形态、生长势等多方面存在差异, ‘红阳’猕猴桃属于早熟的红肉品种, 物候期较早, 枝条更长, 叶片更大, 而‘金艳’猕猴桃属于晚熟的黄肉品种, 物候期较晚, 枝条更短, 叶片更小^[37]。‘金艳’果园为郁闭度30%的幼龄园, 树势较弱, 多花黄精株高更高, 基径更粗, 生长状况更好。而‘红阳’果园包含了幼龄和盛果期园, 郁闭度30%~60%, 树势较强。多花黄精株高较低, 叶片中叶绿素含量较高, 总酚含量较低, 原因可能是‘红阳’果树的叶

形和冠层结构导致的林下光环境差异。此外,不同品种的果树根系生长往往存在差异。卢瑜珺^[38]的研究发现不同品种的枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)根系生长高峰期不同;张春兰等^[39]的研究指出,‘红阳’和‘金艳’猕猴桃根系的AM真菌感染率、种丰度和多样性均存在差异,而真菌孢子密度与土壤中速效磷和全氮等养分元素显著相关,AM真菌可以加速土壤中有机磷的矿化过程。因此,‘红阳’和‘金艳’果树的根系差异以及由此导致的土壤环境变化,也可能是导致多花黄精生长生理差异的原因。

参考文献:

- [1] 罗敏,章文伟,邓才富,谭秋生,罗川,罗舜.药用植物多花黄精研究进展[J].时珍国医国药,2016,27(6):1467-1469.
Luo M, Zhang WW, Deng CF, Tan QS, Luo C, Luo S. Advances in studies of medicinal crop *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2016, 27(6): 1467-1469.
- [2] 陈炬烽,钟起尧,郭志鹏,林燕华.人工生态种植对土壤理化性质、多花黄精产量及品质的影响[J].中药材,2023,46(7):1613-1616.
- [3] 万修福,杨野,康传志,王升,王铁霖,等.林草中药材生态种植现状分析及展望[J].中国现代中药,2021,23(8):1311-1318.
Wan XF, Yang Y, Kang CZ, Wang S, Wang TL, et al. Current situation and future perspectives of ecological planting of Chinese medicinal plants in forests and grasslands[J]. *Mod Chin Med*, 2021, 23(8): 1311-1318.
- [4] Brooker RW, Bennett AE, Cong WF, Daniell TJ, George TS, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytol*, 2015, 206(1): 107-117.
- [5] 刘跃钧,蒋燕锋,葛永金,姚理武,谢建秋,等.锥栗-多花黄精不同复合经营模式经济生态效益评价[J].经济林研究,2020,38(4):72-81.
Liu YJ, Jiang YF, Ge YJ, Yao LW, Xie JQ, et al. Economic and ecological benefits evaluation of different compound management modes of *Castanea henryi* and *Polygonatum cyrtonema*[J]. *Non-Wood Forest Research*, 2020, 38(4): 72-81.
- [6] 黄云鹏,范繁荣,王邦富,沈琼桃,陈绍煌,等.4种不同林分类型对多花黄精生长的影响[J].西部林业科学,2016,45(5):132-135.
Huang YP, Fan FR, Wang BF, Shen QT, Chen SH, et al. The influence of four different forest types on the growth of *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2016, 45(5): 132-135.
- [7] 卢玉鹏,高柱,张小丽,陈璐,王小玲.果园生态系统复合经营的开展模式及生态机制综述[J].中国果树,2021(12):9-15.
Lu YP, Gao Z, Zhang XL, Chen L, Wang XL. Review on the development model and ecological mechanism of compound management of orchard ecosystem[J]. *China Fruits*, 2021(12): 9-15.
- [8] Wang YJ, Liu L, Luo Y, Awasthi MK, Yang JF, et al. Mulching practices alter the bacterial-fungal community and network in favor of soil quality in a semiarid orchard system[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 725: 138527.
- [9] Gómez-Muñoz B, Hatch DJ, Bol R, García-Ruiz R. Nutrient dynamics during decomposition of the residues from a sown legume or ruderal plant cover in an olive oil orchard[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2014, 184: 115-123.
- [10] 秦秦,宋科,孙丽娟,孙雅菲,王峻,等.猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J].果树学报,2020,37(1):68-76.
Qin Q, Song K, Sun LJ, Sun YF, Wang J, et al. Effect of inter-row sod system on the contents and availability of soil nutrients in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(1): 68-76.
- [11] Michel L, Peña Á, Pastenes C, Berríos P, Rombolà AD, et al. Sustainable strategies to prevent iron deficiency, improve yield and berry composition in blueberry (*Vaccinium* spp.) [J]. *Front Plant Sci*, 2019, 10: 255.
- [12] 赵俊侠,张中社,龙凤来.猕猴桃果园套种板蓝根试验研究[J].价值工程,2014,33(24):315-316.
Zhao JX, Zhang ZS, Long FL. A testing study on the inter-planting of *Radix isatidis* in the kiwifruit orchards[J]. *Value Engineering*, 2014, 33(24): 315-316.
- [13] 张彩霞.天水地区樱桃——药材果园复合生态农业模式及其效益分析[J].现代农业科技,2015(4):114-115.
- [14] 高秋美,任丽华,米真如,孟庆峰,董秋颖,等.不同光照强度对多花黄精生长及光合特性的影响[J].山东农业科学,2021,53(6):44-47.
Gao QM, Ren LH, Mi ZR, Meng QF, Dong QY, et al. Effects of different illumination intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(6): 44-47.
- [15] 郭妮.栽培措施对林下多花黄精产量和品质的影响[D].重庆:西南大学,2019:40-42.

- [16] 倪松娟. 毛竹林不同生境下多花黄精生长及其与土壤性质的关系 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2021: 14-15.
- [17] Lu YP, Gao Z, Mao JP, Chen L, Zhang XL, *et al.* Litter decomposition characteristics and variety differences in a kiwifruit orchard in subtropical climate zone of China[J]. *Agronomy*, 2023, 13 (3): 774.
- [18] Gao SS, Wang YL, Yu S, Huang YQ, Liu HC, *et al.* Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two *Adonis species* in Northeast China[J]. *Sci Hortic*, 2020, 259: 108795.
- [19] 张维, 付复华, 罗赛男, 赖灯妮, 朱向荣, 张群. 湖南红心猕猴桃品种品质评价及综合分析 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47 (5): 201-210.
- Zhang W, Fu FH, Luo SN, Lai DN, Zhu XR, Zhang Q. Quality analysis and evaluation of Hunan red kiwifruit varieties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47 (5): 201-210.
- [20] 赵海云, 姜成英, 戚建莉, 赵梦炯, 金高明, 吴文俊. 油橄榄落果规律及果实发育期叶片可溶性糖、淀粉、内源激素含量变化 [J]. 中国果树, 2022 (10): 43-48.
- Zhao HY, Jiang CY, Qi JL, Zhao MJ, Jin GM, Wu WJ. The law of fruit dropping and changes of soluble sugar, starch and endogenous hormone contents in leaves of olive during fruit development period[J]. *China Fruits*, 2022 (10): 43-48.
- [21] 韩富亮, 袁春龙, 郭安鹊, 张予林, 李运奎. 二喹啉甲酸法 (BCA) 分析蛋白多肽的原理、影响因素和优点 [J]. 食品与发酵工业, 2014, 40 (11): 202-207.
- Han FL, Yuan CL, Guo AQ, Zhang YL, Li YK. The principle, influence factors and advantages of bicinchoninic acid method (BCA) for protein and peptide assay[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014, 40 (11): 202-207.
- [22] 王小玲, 于一尊, 高柱, 黄国昌, 刘小宁. 羽扇豆套种对猕猴桃叶片和果实丙二醛含量的影响 [J]. 北方园艺, 2018 (24): 54-58.
- Wang XL, Yu YZ, Gao Z, Huang GC, Liu XN. Effects of intercropping Lupin on malondialdehyde content in kiwifruit leaf and fruit[J]. *Northern Horticulture*, 2018 (24): 54-58.
- [23] 郑飞雪, 张新忠, 王忆, 韩振海. 苹果实生树个体发育不同阶段叶片 H_2O_2 含量及相关酶活性的变化 [J]. 果树学报, 2013, 30 (5): 759-764.
- Zheng FX, Zhang XZ, Wang Y, Han ZH. Changes of H_2O_2 content and activities of related enzymes in leaf among ontogenetic phases in apple (*Malus ssp.*) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, 30 (5): 759-764.
- [24] 郝岩, 王英平, 李金玲, 金银萍. 不同采收时期五味子叶片中总黄酮、总黄酮醇和总酚酸含量的动态变化研究 [J]. 时珍国医国药, 2021, 32 (10): 2500-2502.
- [25] Caverzan A, Passaia G, Rosa SB, Ribeiro CW, Lazzarotto F, *et al.* Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection[J]. *Genet Mol Biol*, 2012, 35 (4 Suppl): 1011-1019.
- [26] Zhang ZY, Liu HH, Sun C, Ma QB, Bu HY, *et al.* A C_2H_2 zinc-finger protein OsZFP213 interacts with OsMAPK3 to enhance salt tolerance in rice[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 229: 100-110.
- [27] 王艺, 韦小丽. 不同光照对植物生长、生理生化和形态结构影响的研究进展 [J]. 山地农业生物学报, 2010, 29 (4): 353-359, 370.
- Wang Y, Wei XL. Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphostructure of plant[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2010, 29 (4): 353-359, 370.
- [28] 王梅, 徐正茹, 张建旗, 曹效东, 刘乐乐, 等. 遮阴对 10 种野生观赏植物生长及生理特性的影响 [J]. 草业科学, 2017, 34 (5): 1008-1016.
- Wang M, Xu ZR, Zhang JQ, Cao XD, Liu LL, *et al.* Effect of shades on growth and physiological characteristics of 10 species of wild ornamental plants in Lanzhou[J]. *Pratacul-tural Science*, 2017, 34 (5): 1008-1016.
- [29] 童龙, 张磊, 高勇军, 陈丽洁, 耿养会, 李彬. 不同遮阴处理对多花黄精生理生长的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2020, 40 (3): 68-75.
- Tong L, Zhang L, Gao YJ, Chen LJ, Geng YH, Li B. Growth and physiological characteristics of *Polygonatum cyr-tonema* under different shading treatments[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2020, 40 (3): 68-75.
- [30] Liu SL, Yang RJ, Ren B, Wang MH, Ma MD. Differences in photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and antioxidant system between invasive *Alnus formosana* and its native congener in response to different irradiance levels[J]. *Botany*, 2016, 94 (12): 1087-1101.
- [31] 何小燕, 马锦林, 张日清, 叶航. 弱光胁迫对植物生长影响的研究进展 [J]. 经济林研究, 2011, 29 (4): 131-136.
- He XY, Ma JL, Zhang RQ, Ye H. Research progress on effects of low-light stress on plant growth[J]. *Non-Wood Forest Research*, 2011, 29 (4): 131-136.
- [32] 丁凯鑫, 王立春, 田国奎, 王海艳, 李凤云, 等. 外源烯效唑对干旱胁迫下马铃薯叶片抗氧化能力及渗透调节的影响 [J]. 核农学报, 2024, 38 (1): 169-178.
- Ding KX, Wang LC, Tian GK, Wang HY, Li FY, *et al.* Effect of exogenous uniconazole on antioxidant capacity and

- osmotic adjustment of potato leaves under drought stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38 (1): 169–178.
- [33] Cheng L, Han M, Yang LM, Li Y, Sun Z, *et al.* Changes in the physiological characteristics and baicalin biosynthesis metabolism of *Scutellaria baicalensis* Georgi under drought stress[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122: 473–482.
- [34] Zhu DB, Hu KD, Guo XK, Liu Y, Hu LY, *et al.* Sulfur Dioxide Enhances Endogenous Hydrogen sulfide accumulation and alleviates oxidative stress induced by aluminum stress in germinating wheat seeds[J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2015, 2015: 612363.
- [35] 蔡元保, 杨祥燕, 孙光明, 张治礼, 黄强, 等. 菠萝叶片色泽、色素及抗氧化活性的关系 [J]. 植物科学学报, 2017, 35 (2): 283–290.
- Cai YB, Yang XY, Sun GM, Zhang ZL, Huang Q, *et al.* Relationship among colors, pigments, and antioxidant activities of pineapple leaves[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35 (2): 283–290.
- [36] 卢发光, 顾立峰, 刘昱茜, 任桢, 施雨, 等. 种植密度和施氮量互作对盐碱地紫花苜蓿生长性能和生理特性的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38 (8): 1570–1578.
- Lu FG, Gu LF, Liu YQ, Ren Z, Shi Y, *et al.* Interaction effects of plant density and nitrogen rate on the growth and physiological traits of alfalfa in saline alkali soils[J]. *Prata-cultural Science*, 2021, 38 (8): 1570–1578.
- [37] 李秀亚, 宋福兵, 肖钧, 汪志威, 韩振诚. 5 个猕猴桃品种在六盘水的生物学特性比较 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (17): 47–51.
- Li XY, Song FB, Xiao J, Wang ZW, Han ZC. Comparison of biological characteristics of five kiwi varieties in Liupanshui[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (17): 47–51.
- [38] 卢瑜珺. 阿拉尔骏枣和灰枣根系年生长变化与地上部生长结果的关系研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022: 12–32.
- [39] 张春兰, 李苇洁, 姚红艳, 罗充, 徐昂昂, 申笑阳. 不同猕猴桃品种根际 AM 真菌多样性与土壤养分相关性分析 [J]. 果树学报, 2017, 34 (3): 344–353.
- Zhang CL, Li WJ, Yao HY, Luo C, Xu HH, Shen XY. Correlation study on the diversity of the AM fungi and soil nutrients in the rhizosphere of different kiwifruit cultivars[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34 (3): 344–353.

(责任编辑: 周媛)