

负载量对旱区矮化密植‘富士’苹果生长、品质和产量的影响

吴雅格¹, 马蒙蒙¹, 李前进², 李明军¹

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省洛川县苹果产业研发中心, 陕西 洛川 727400)

【摘要】【目的】探究旱区矮化密植‘富士’苹果负载量与树体生长、果实品质、产量的关系, 确定其最适宜负载量水平, 为旱区矮化密植‘富士’苹果栽培提供科学参考。【方法】在陕西省洛川县不同区域10个矮化密植‘富士’苹果园负载量调研的基础上, 连续两年(2023和2024年)设置单株留果数分别为0(L₀)、85(L₈₅)、110(L₁₁₀)、135(L₁₃₅)和160(L₁₆₀)的5个负载量试验, 系统比较负载量对苹果品质、产量、树体生长等的影响。【结果】①不同负载量显著影响苹果树叶片生理特性, 高负载量显著提高了上午叶片净光合速率和气孔导度, 降低了胞间CO₂浓度, 改善了叶片光合性能, 并以L₁₆₀和L₁₃₅处理效果显著。②不同负载量显著影响树体枝条结构及新梢生长, 且存在年际差异, 并以L₁₃₅处理综合表现较佳。短枝数量及短枝率随负载量增加呈先升后降或逐渐升高趋势, 且L₁₃₅处理表现较优; 中枝数量随负载量增加而提高, 在L₁₆₀处理下较高; 新梢长度在L₁₁₀处理下较高, 而其粗度在处理间无显著差异。③随着负载量增加, 果实可溶性固形物、可滴定酸含量及其比值总体呈先升后降的趋势, 并以L₁₁₀和L₁₃₅处理综合表现较优; L₈₅处理果实品质与L₁₁₀处理无显著差异, 但树体生长旺盛, 第2年成花量少, 而L₁₆₀处理果实大小、可溶性固形物含量显著降低, 树体生长较弱, 第2年成花量减少; 不同负载量处理对果实果糖、葡萄糖、蔗糖、类黄酮及维生素C含量的影响在两年间表现出一致趋势, 并均以L₁₃₅处理表现较好。④随着负载量增加, 单果质量逐渐降低, 单株产量先升后降并以L₁₃₅处理最高; 单株产量在L₁₁₀、L₁₃₅、L₁₆₀处理间无明显差异, 但均显著高于L₈₅处理。【结论】适度增加负载量有利于苹果树体生长、枝条结构优化、果实品质改善及产量增加; 旱区盛果期矮化密植‘富士’果园适宜单株果实负载量为110~135个, 可促进果园优质稳产。

【关键词】 富士苹果; 矮化密植; 负载量; 旱区; 果实品质

【中图分类号】 S661.106+2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2027)03-0001-10

Determination of optimal crop load for high-quality and stable production of dwarf Fuji apple in arid areas

Wu Yage¹, Ma Mengmeng¹, Li Qianjing², Li Mingjun¹

(1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Research and Development Center for Apple Industry, Luochuan, Shaanxi 727400, China)

Abstract: 【Objective】 This research aims to explore the relationship between crop load and tree growth, fruit quality, and yield of dwarf Fuji trees densely planted in arid areas, and determine the optimal crop load for cultivation in such areas. 【Method】 Based on a survey of crop load in 10 densely-planted dwarf Fuji apple orchards in different regions of Luochuan, Shaanxi, a comparative experiment was conducted for two consecutive years (2023—2024), and five crop load treatments were set: L₀, L₈₅, L₁₁₀, L₁₃₅, and L₁₆₀ (with 0, 85, 110, 135, 160 representing the number of apples retained per tree). The effects of different crop loads on fruit quality, yield,

【收稿日期】 2026-01-13 【修回日期】 2026-04-01

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2023YFD2301000)

【作者简介】 吴雅格(1998—), 女, 陕西榆林人, 硕士, 主要从事苹果果实品质研究。E-mail: 18182678770@163.com

【通信作者】 李明军(1981—), 男, 甘肃泾川人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事苹果果实品质研究。E-mail: limingjun@nwsuaf.edu.cn

and tree growth were systematically compared. 【Result】 ① Crop load significantly affected the physiological characteristics of apple leaves. High crop loads significantly increased net photosynthetic rate and stomatal conductance of tree leaves in the morning, while decreased intercellular CO_2 concentration, indicating an improvement in photosynthetic performance, with L_{160} and L_{135} showing the most significant effect. ② Crop load significantly affected shoot structure and new shoot growth, with interannual variation observed, and L_{135} showing comprehensively better effect. The number and proportion of short shoots firstly increased and then decreased or gradually increased as the fruit load increased, with L_{135} showing better effect. And the number of medium shoots increased as fruit load increased, with L_{160} showing higher increase. New shoot length was higher under L_{110} treatment, whereas shoot diameter showed no significant differences among treatments. ③ As crop load increased, the contents of soluble solid and titratable acid, and their ratio firstly increased and then decreased, with L_{110} and L_{135} showing comprehensively better effect. The L_{85} treatment showed no significant difference in fruit quality compared to L_{110} , while showing more vigorous vegetative growth and fewer flowers. The L_{160} treatment significantly reduced fruit size, soluble solid content, and tree growth, while reducing flowering in the second year. The effects of crop load on fructose, glucose, sucrose, flavonoids, and vitamin C contents were consistent in both 2023 and 2024, with L_{135} showing the best results. ④ As the fruit load increased, the single fruit weight gradually decreased, and the per-tree yield firstly increased and then decreased, with L_{135} showing the highest yield. No significant difference was observed in per-tree yield among L_{110} , L_{135} , L_{160} , which were all higher than that in L_{85} treatment. 【Conclusion】 Based on a comprehensive analysis, the optimal crop load range for densely-planted dwarf Fuji apple orchards in arid regions, with Luochuan as an example, is 110—135 apples per tree. Proper crop load management can help promote fruit quality and stabilize fruit yield in orchards in arid zones.

Key words: Fuji apple; dwarf high-density system; crop load; arid region; fruit quality

苹果是我国主要果树之一,在国民经济和社会发展中具有重要作用^[1]。据统计,我国苹果栽培面积和产量均居世界首位,2023年全国苹果种植面积约为 $1.934 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全球苹果种植面积和产量的一半以上。黄土高原产区目前是我国苹果的核心产区,如2023年陕西苹果种植面积为 $6.152 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全国苹果种植面积的 31.9%^[2]。在渭北黄土高原沟壑丘陵区,陕西洛川地处苹果最适宜生产区,符合7项气象指标要求,‘富士’苹果种植面积达 $2.86 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 占比 80.5%^[3]。苹果已经成为陕西延安等地乡村振兴的支柱产业,其可持续高质量发展是增加该区域农民收入的主要保障。

目前,我国苹果栽培仍以传统栽培模式为主,经营分散且规模化程度低,总体上单产不高,仅排世界第七位^[4]。苹果生产面临成本增加、单位面积效益难以提升、果品品质欠佳、病虫害严重等问题,严重影响果实生产效益和商品性,制约产业进一步发展^[5]。苹果产业呈现大而不强、产业效率低、综合竞争力弱的现状,与苹果生产发达国家还有很大差距。苹果产区降雨量稀少且蒸腾作用强烈,许多地区缺乏水源供给,植物水分供应不足,进而对土壤的营养状况产生负面影响,如土壤中的有机物含量

偏低、土壤板结等,日益成为苹果产业高质量发展、经济效益提升的重大阻碍^[2]。

苹果矮化密植技术选用矮化砧木和密植方式,采用宽行距、窄株距的栽植模式,控制苹果树体营养生长,提高光能利用效率和通风透光条件。与传统栽培方法相比,矮化密植栽培模式中苹果树可以提前产生花芽并加速生长过程,减少到达成熟期所需时间^[5],同时可以促进树体早成形、早结果,提高单位面积产量和资源利用效率^[6]。此外,其紧密低矮的树型有助于实现机械化管理和采收^[7],矮化密植栽培模式是苹果产业发展的趋势。在干旱少雨、土壤贫瘠的黄土高原苹果产区,如陕西渭北,矮化密植已成为新建果园的基本栽植模式,截至2025年洛川全县约有 $9.733 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 矮化密植园,占全县苹果栽培面积的 27%^[8]。但是,黄土高原苹果产区栽培环境不同于欧美国家的苹果产区 and 我国渤海湾产区,在矮化密植栽培技术应用方面还存在一些问题,亟须研究并建立与其相适应的苹果矮化密植栽培体系。例如,部分新建果园由于负载量过大,树势衰弱,新梢生长缓慢,树冠扩展慢,变成“小老树”,严重影响果实产量及经济效益^[9]。因此,本研究以陕西渭北旱区洛川县矮化密植的‘富士’苹果为研究对

象,探究旱区矮化密植‘富士’苹果负载量与树体生长、果实品质、产量的关系,确定其最适宜负载量,为洛川矮化密植‘富士’苹果栽培模式与技术推广提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 and 设计

试验于2022年10月至2024年11月进行。2022年10月初,选择洛川县矮化密植园分布区的槐柏、谷咀、京兆三地,共选取10个不同树龄的果园进行调研,在对不同果园进行统计后得出,随着树龄不断增大,果实负载量也不断提升。其中3年生果园平均负载量41.17个;4年生果园盛果初期平均负载量为65.14个,5~6年生果园盛果期平均负载量为96.25个。基于上述调研结果,选取洛川县槐柏镇果树示范园区6年生矮化中间砧‘富士’(*Malus domestica* Borkh.)苹果树作为试验材料。供试植株基砧为吴起楸子(*Malus prunifolia* (Willd.) Borkh.),中间砧为‘M26’,树形为高纺锤形,采用矮化密植栽培模式,株行距为1.5 m×4.0 m,田间管理措施按当地常规生产水平进行。在2023年4月以及2024年4月选择树体大小、生长势基本一致,无病害,且健壮的‘富士’苹果树,于5月进行人工疏花疏果处理,采用间距留果法,设置5个果实负载量处理,每个处理重复8次,每重复1株,总计40棵树。5个负载量处理分别为:零负载(L_0),不留果;低负载(L_{85} ,略少于生产负载),平均每30 cm留果1个,每株留果85个;中负载(L_{110} ,略多于生产负载),平均每25 cm留果1个,每株留果110个;较高负载(L_{135} ,高于生产负载40%),平均每20 cm留果1个,每株留果135个;高负载(L_{160} ,高于生产负载70%),平均每15 cm留果1个,每株留果160个。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 树势指标 2023和2024年测量各处理树高、干径、冠径,并计算树体体积。

1.2.2 树体枝条比例 2023和2024年在采果落叶后进行树体枝条分类统计,并计算各类枝条比例。其中,短枝长度 ≤ 5 cm,中枝长度 ≤ 30 cm,长枝长度30~50 cm。

1.2.3 叶片光合参数日变化 于2023年7月下旬果实快速生长期,选择不同果实负载副梢的成熟叶片,使用Li-6400光合仪(Li-COR,美国)测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度

(C_i)、蒸腾速率(T_r),从11:00开始,每隔3 h测量1次,到日落20:00结束。每片叶片测量3次,取3次数据的平均值作为测量结果。

1.2.4 叶片生长相关指标 于2023年7月下旬果实快速生长期,在测定光合参数的同时采集叶片样品,每个负载处理采取各重复1年生新枝的第4~6片成熟叶各40枚,叶样采集后立即进行液氮速冻保存,于实验室采用数显游标卡尺测定叶片长轴、短轴及厚度值,并基于椭圆面积估算模型(叶面积 $=0.7123 \times \text{长} \times \text{宽}$, $R^2=0.9772$)计算叶面积。在叶片形态指标测定完成后,用万分之一天平测定叶片鲜质量。之后,参照文献[10]方法测定叶片叶绿素a、b含量。

1.2.5 果实外在品质 2023和2024年10月果实采收时,从不同负载处理的每株苹果树上随机采摘30个果实,使用精度为0.01 g的电子天平称取单果质量,同时使用电子数显游标卡尺测量果实的横径和纵径,并计算果实的果形指数。

1.2.6 果实内在品质 2023和2024年采集各处理的果实进行内在品质测定。果实可溶性固形物含量用NY/T手持糖量计测定;可滴定酸含量用GMK-835F型果实酸度仪测定;可溶性糖含量利用Shimadzu GCMS-2010 SE气相色谱-质谱联用仪,选择DB-5 MS毛细管柱(20 m×0.18 mm×0.18 μm)进行分离分析,通过面积归一化法计算各糖组分相对含量,并以Ribitol为内标进行定量^[11-13]。类黄酮含量采用苏州科铭生物技术有限公司生产的植物类黄酮检测试剂盒(Flavonoid Assay Kit)进行比色法定量分析。维生素C含量采用AIDISH-ENG-ADS-W-V-V004试剂盒测定。

1.3 数据处理

通过Excel 2016完成基础数据整理与可视化图表构建;采用SPSS 22.0统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),结合Duncan多重比较检验(置信水平 $\alpha=0.05$)判定组间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 单株果实负载量对盛果期叶片生长和叶绿素含量的影响

从表1可以看出,随着果实负载量的增加,百叶鲜质量总体呈先升后降的变化趋势,并在 L_{135} 处理下达到最大值。与 L_0 相比,各负载处理均表现出不同程度的提高,但仅 L_{135} 处理增幅(9.41%)达到显著水平,而 L_{135} 与 L_{110} 、 L_{160} 处理之间差异均不显著,

表明适中偏高的果实负载量更有利于叶片生物量的积累。随着果实负载量的增加,百叶厚度和叶面积整体呈增加趋势,但各处理间差异均未达到显著水平,说明果实负载对叶片形态结构的促进作用相对有限,未形成显著分化。在光合色素方面,随着果实负载量的提高,叶绿素 a 含量总体呈上升趋势,叶绿素 b 含量变化较为平稳,总叶绿素含量逐渐增加;各处理间叶绿素 a 和叶绿素 b 含量差异均不显

著,而总叶绿素含量在 L_{110} 、 L_{135} 和 L_{160} 处理下分别较 L_0 显著提高 16.12%, 16.48% 和 18.68%, 但 L_{85} 处理与 L_0 之间差异不显著。该结果表明,提高果实负载量在一定范围内有助于促进叶绿素积累,从而增强叶片潜在光合能力。综合来看,适宜的果实负载水平(L_{110} — L_{135})更有利于叶片生长及光合色素积累的充分发挥。

表 1 不同果实负载量处理下苹果树叶片生长指标和叶绿素含量

Table 1 Growth index and chlorophyll content in leaves of apple tree under different fruit load treatments

处理 Treatment	百叶鲜质量/g Fresh mass of 100 leaves	百叶厚/mm Thickness of 100 leaves	叶面积/cm ² Leaf area	叶绿素 a 含量/ (mg·g ⁻¹) Chlorophyll a	叶绿素 b 含量/ (mg·g ⁻¹) Chlorophyll b	总叶绿素含量/ (mg·g ⁻¹) Total chlorophyll
L_0	66.10±1.07 b	23.37±1.85 a	24.90±0.93 a	1.85±0.21 a	0.88±0.14 a	2.73±0.33 b
L_{85}	66.13±1.10 b	23.36±1.75 a	25.92±0.87 a	2.02±0.03 a	0.90±0.13 a	2.92±0.41 b
L_{110}	68.21±1.51 ab	24.93±0.87 a	26.23±1.02 a	2.32±0.14 a	0.85±0.13 a	3.17±0.79 a
L_{135}	72.32±2.12 a	24.25±1.87 a	27.37±1.58 a	2.32±0.21 a	0.86±0.17 a	3.18±0.23 a
L_{160}	71.81±2.22 ab	26.23±2.54 a	26.62±2.03 a	2.39±0.03 a	0.85±0.02 a	3.24±0.11 a

注: L_0 、 L_{85} 、 L_{110} 、 L_{135} 、 L_{160} 表示每株苹果树分别留 0, 85, 110, 135 和 160 个果实的负载量处理;同列数据后标不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异。下同。

Note: L_0 , L_{85} , L_{110} , L_{135} , L_{160} represent 0, 85, 110, 135, 160 fruits left per apple plant, respectively; Different lowercase letters within the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

2.2 单株果实负载量对盛果期叶片光合日变化的影响

图 1 显示,各处理组‘富士’苹果叶片气孔导度(G_s)日变化呈双峰曲线。在 11:00 时, L_{135} 处理组叶片 G_s 达最大值且显著高于其余处理组;在 14:00 时,除 L_{135} 处理组下降外,其余处理组 G_s 均比 11:00 上升,且 L_{135} 处理组显著低于其余处理组;在 17:00 时, L_0 处理组叶片 G_s 最低,并与其他处理组差异显著;在 20:00 时,各处理组 G_s 均降至最低值,且处理间无显著差异。

叶片蒸腾速率(T_r)日变化呈单峰曲线,在 14:00 达最大值后下降。其中,在 11:00 时,各处理组间 T_r 无显著差异;在 14:00 时, L_{110} 处理组 T_r 最低,并显著低于 L_0 处理组;在 17:00 时,叶片 T_r 以 L_{160} 、 L_{135} 处理组最高,并与其他处理组差异显著,而 L_0 处理组最低;在 20:00 时,各处理组间 T_r 无显著差异。

各负载处理组叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)日变化趋势一致,均呈先降后升型曲线。在 11:00 时, L_0 、 L_{85} 、 L_{160} 处理组叶片 C_i 均达最低值, L_{135} 、 L_{110} 处理组 C_i 仍处于较高水平,且 L_{135} 处理组显著高于其余处理组;在 14:00 时, L_{135} 、 L_{110} 处理组 C_i 降至最低, L_0 、 L_{85} 处理组显著高于其余组;在 17:00 和 20:00 时,叶片 C_i 在各组间无显著差异。

5 个负载量处理叶片净光合速率(P_n)日变化在

观测时段内呈现先升后降的变化趋势,并在 11:00 达到观测时段内的较高值。在 11:00 时, L_{160} 处理组 P_n 显著高于其余处理组 8%~14%,最大值为 16.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;在 14:00 和 20:00 时,叶片 P_n 在各处理组间均无显著差异;在 17:00 时, L_{160} 、 L_{135} 处理组的 P_n 显著高于其余处理组,且以 L_{160} 处理组最高。

2.3 单株果实负载量对树体枝条类别组成的影响

如表 2 所示,不同果实负载量对树体枝条数量及新梢生长有显著影响,且存在年际差异。其中,在 2023 年,长枝数量随负载量增加无显著变化;中枝数量随负载量增加呈上升趋势,但处理间差异不显著;短枝数量和短枝率随负载量增加而先升后降,并在 L_{135} 处理时最高,其短枝数量与其他处理均差异显著,但短枝率仅与 L_{85} 处理有显著差异;新梢长度在 L_{110} 处理下较高,新梢粗度在 L_{135} 处理下最大,但两者在各处理间均无显著差异。在 2024 年,长枝数量随负载量增加总体呈下降趋势,但仅 L_{110} 处理显著低于其他处理;中枝数量随负载量增加呈上升趋势,并在 L_{160} 处理下达到最高值,且显著高于其他处理;短枝数量及短枝率总体随负载量增加而升高,其中短枝数量在 L_{110} 、 L_{135} 和 L_{160} 处理下均显著高于 L_{85} 处理,而短枝率仅在 L_{135} 处理与 L_{85} 处理差异显著;新梢长度在 L_{110} 处理下显著高于 L_{85} 处理,而其余处理间差异不显著;新梢粗度在各处理间均无

显著差异。综上,适当提高果实负载量有利于促进树体中、短枝形成及提高短枝比例,优化枝条结构,并以 L₁₃₅ 处理综合表现较优。适宜负载水平能够在一定程度上协调营养生长与生殖生长之间的关系,促进树体生长发育。

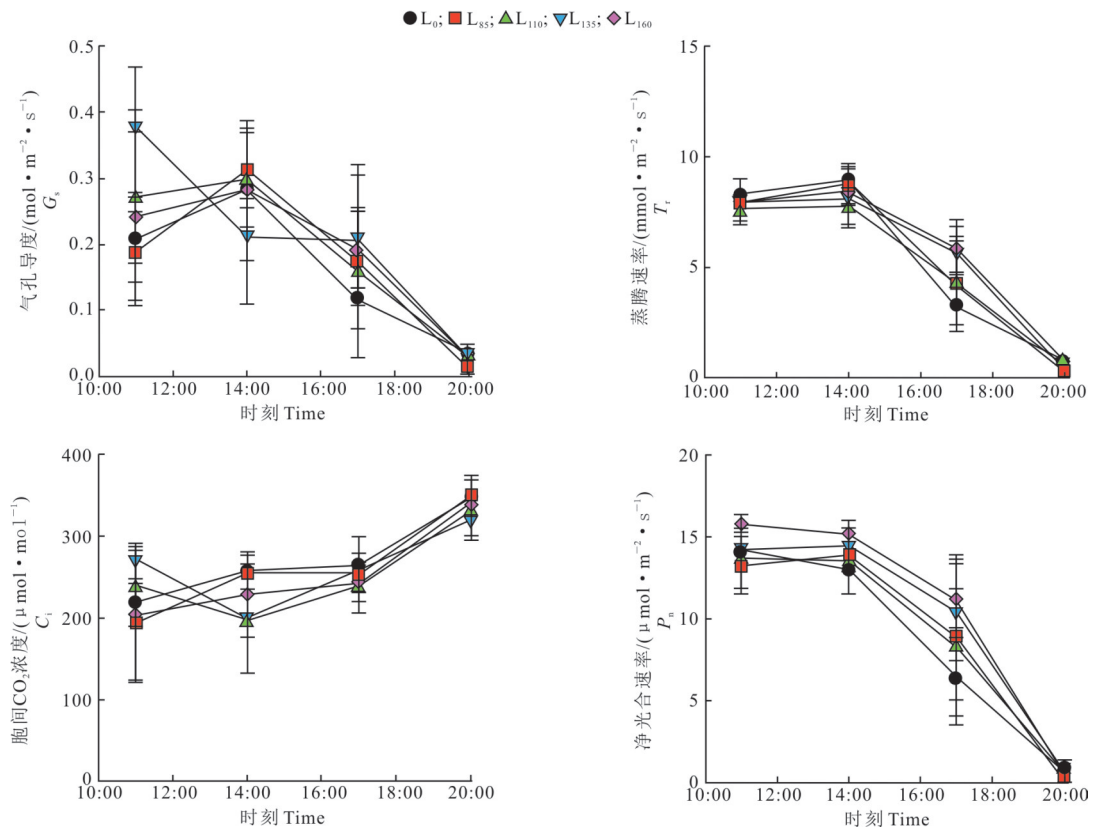


图 1 不同果实负载量处理下苹果树叶片光合参数日变化特征
Fig. 1 Diurnal variation of photosynthesis parameters in leaves of apple tree under different fruit load treatments

表 2 不同果实负载量对树体当年枝条生长发育的影响

Table 2 Effects of different fruit loads on tree shoot growth and development in the current year

年份 Year	处理 Treatment	长枝数量 Number of long shoot	中枝数量 Number of medium-length shoot	短枝数量 Number of short shoot	短枝率/% Short shoot ratio	新梢长度/cm Shoot length	新梢粗度/mm Diameter of new shoots
2023	L ₈₅	71.33±4.41 a	47.00±3.21 a	58.66±4.63 c	33.14 b	20.80±2.34 a	5.34±0.31 a
	L ₁₁₀	66.00±2.08 a	50.67±1.85 a	88.66±7.68 b	43.17 ab	27.86±4.21 a	5.56±0.41 a
	L ₁₃₅	69.00±1.73 a	47.66±2.60 a	98.67±5.78 a	45.82 a	24.93±3.55 a	5.96±0.44 a
	L ₁₆₀	66.00±2.08 a	50.66±1.85 a	88.67±7.69 b	43.14 ab	24.4±1.85 a	5.06±0.27 a
2024	L ₈₅	76.33±4.26 a	49.00±4.72 b	61.67±4.41 b	32.87 b	20.77±0.82 b	5.13±0.18 a
	L ₁₁₀	67.67±2.33 b	53.67±1.20 ab	91.00±6.51 a	42.85 ab	28.33±2.33 a	5.57±0.52 a
	L ₁₃₅	69.33±4.33 a	48.67±1.86 b	99.33±6.96 a	45.70 a	25.33±0.88 ab	6.03±0.24 a
	L ₁₆₀	70.00±3.61 a	65.00±6.51 a	105.33±3.71 a	43.82 ab	24.00±1.73 ab	5.63±0.17 a

2.4 单株果实负载量对树势及次年花量的影响

如表 3 所示,不同果实负载量对树冠结构及次年花量也产生了不同程度的影响,并表现出一定的年际差异。两年的干径在 L₁₁₀ 处理下均处于较高水平;在 2023 年, L₁₁₀ 处理干径显著高于 L₈₅,而与 L₁₃₅ 和 L₁₆₀ 处理差异不显著;在 2024 年,各处理间干径差异均未达到显著水平。这说明负载量对干径的影响在不同年份表现不稳定。冠幅面积在两年各处

理间均无显著差异,表明负载量对树冠横向扩展影响较小。树冠体积在两年中均以 L₁₆₀ 处理较大,但处理间差异总体不显著,仅在 2024 年 L₁₆₀ 处理显著高于 L₁₁₀ 和 L₁₃₅ 处理,说明负载量对树冠体积的影响较为复杂,且受年际条件影响较大;同时,从数值上看,低负载(L₈₅)处理的树冠体积在两年中均处于较高水平,表明较低负载有利于维持较大的树冠结构。在次年单株花量方面,两年表现出明显差异。

在 2023 年,次年单株花量随负载量增加呈先升后降趋势,在 L_{110} 处理下达到最大值,且显著高于 L_{85} 处理;而在 2024 年,次年单株花量以 L_{85} 处理最高,并显著高于 L_{160} 处理,整体表现出随负载量增加而下降的趋势,说明较高负载量不利于花芽形成。综合来看,不同负载量对树体营养生长和生殖生长的调

控作用存在差异:中等负载量(L_{110})在部分年份有利于提高花芽分化水平,而低负载量(L_{85})有利于维持较大的树冠结构;高负载量(L_{160})虽然在部分情况下表现出较大的树冠体积,但对次年花量形成存在一定抑制作用,反映出营养生长与生殖生长之间的权衡关系。

表 3 不同果实负载量处理下树冠特征及次年花量

Table 3 Canopy characteristics and flower number in the following year under different fruit load treatments

年份 Year	处理 Treatment	干径/mm Trunk diameter	冠幅面积/m ² Canopy area	树冠体积/m ³ Average tree canopy volume	次年单株花量 Number of flowers per tree in the following year
2023	L_{85}	89.8±2.18 b	2.52±0.44 a	7.34±1.74 a	96.33±36.33 b
	L_{110}	100.06±2.65 a	2.22±0.43 a	5.91±1.21 a	186.67±53.67 a
	L_{135}	97.40±1.42 ab	1.96±0.21 a	4.91±1.46 a	126.33±50.33 ab
	L_{160}	95.38±3.52 ab	2.39±0.28 a	8.12±1.15 a	116.02±35.33 ab
	L_{85}	98.91±6.35 a	2.20±0.46 a	6.57±0.36 ab	183.33±17.13 a
2024	L_{110}	99.10±2.96 a	2.29±0.13 a	5.71±0.25 b	179.33±8.95 ab
	L_{135}	95.37±2.26 a	2.01±0.17 a	5.39±1.10 b	141.67±10.41 bc
	L_{160}	96.05±3.16 a	2.43±0.29 a	7.85±1.04 a	118.33±5.55 c

2.5 单株果实负载量对果实品质的影响

2.5.1 果实大小和果形指数 表4显示,单株果实负载量对果实大小和果形指数有显著影响,各指标随着负载量增加整体呈减小的趋势。其中,在 2023 年, L_{85} 、 L_{110} 、 L_{135} 处理的单果质量、纵径、横径均显著高于 L_{160} 处理,而前 3 个处理间均无显著差异,3 个指标较 L_{160} 处理增幅依次为 34.1%~44.6%,16.0%~18.1% 和 9.9%~15.9%;果形指数以负载量 L_{135} 最大,但各处理之间差异不显著。在 2024 年,单果质

量、纵径、横径、果形指数均在 L_{85} 处理下最大,分别高于其他处理组 22.5%~38.8%,7.6%~20.8%,4.8%~8.1% 和 3.4%~12.2%,而单果质量增幅在 L_{85} 处理下均达显著水平,纵径增幅在 L_{135} 、 L_{160} 处理下达显著水平,横径、果形指数增幅均仅在 L_{160} 处理下达到显著水平。总体而言,增加负载量会不同程度限制果实外在品质,过度增加负载量会使果实大小和果形指数显著减小。

表 4 不同果实负载量处理下果实大小和果形指数

Table 4 Fruit size and fruit shape index under different fruit load treatments

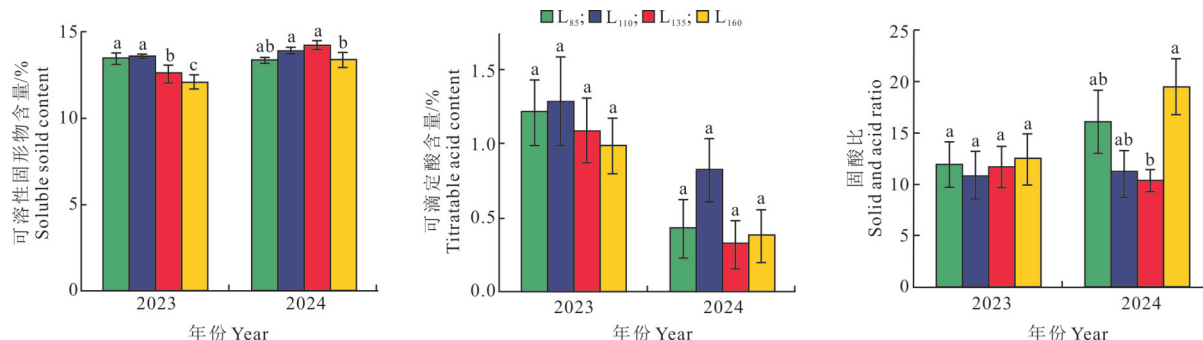
年份 Year	处理 Treatment	单果质量/g Fruit weight	纵径/mm Longitudinal diameter	横径/mm Transverse diameter	果形指数 Fruit shape index
2023	L_{85}	310.48±7.03 a	76.28±0.89 a	91.16±1.28 a	0.85±0.02 a
	L_{110}	308.57±10.93 a	76.81±1.28 a	89.91±1.82 a	0.84±0.01 a
	L_{135}	287.93±9.72 a	77.71±0.65 a	86.39±1.09 a	0.89±0.10 a
	L_{160}	214.73±7.75 b	65.78±0.97 b	78.63±2.03 b	0.83±0.01 a
	L_{85}	347.37±14.92 a	83.11±1.89 a	90.16±2.07 a	0.92±0.01 a
2024	L_{110}	284.60±16.17 b	77.24±2.62 ab	86.00±1.26 ab	0.89±0.03 a
	L_{135}	281.98±8.39 b	76.65±2.15 b	85.84±1.13 ab	0.89±0.02 a
	L_{160}	250.12±7.22 b	68.78±1.05 c	83.38±1.67 b	0.82±0.02 b

2.5.2 可溶性固形物、可滴定酸含量及其比值 整体来看,两年不同负载量对苹果可溶性固形物、可滴定酸含量和固酸比的影响具有较为一致的规律。如图 2 所示,随着单株果实负载量的逐渐增加,果实可溶性固形物和可滴定酸含量均呈现“先升高、后降低”的趋势,并在负载量处理 L_{110} 或 L_{135} 时达到最高值,但两年的可滴定酸含量在各负载量处理间均无显著差异,说明适度的负载有利于促进苹果

糖和酸的积累,而负载过高则会削弱果实的品质表现。与之相反,两年果实固酸比均随负载量增加表现为先降低后升高的趋势,并在 L_{110} 或 L_{135} 时最低,但处理间多差异不显著,表明适度负载可降低固酸比,高负载会导致糖酸比例失衡、风味下降。以上结果说明, L_{110} 和 L_{135} 在各负载量处理中总体表现较佳,其可溶性固形物和可滴定酸含量通常处于高值区间,且品质稳定;而 L_{160} 处理多数指标表现偏低,

固酸比偏高,易对果实品质造成不利影响,即中等负载(110~135个/株)处理果实在糖分、酸度及风

味平衡方面更具优势,而过高负载处理会降低果实品质。



不同小写字母表示相同年份处理间在0.05水平存在显著性差异。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments in same year at 0.05 level. The same below.

图2 2023和2024年不同负载量下果实可溶性固形物、可滴定酸含量及其比值

Fig. 2 Fruit soluble solid and titratable acid contents and their ratio under different fruit load treatments in 2023 and 2024

2.5.3 可溶性糖、类黄酮和维生素C含量 从图3可以看出,两年果实蔗糖含量均随负载量增加呈先降后升的变化趋势,并在L₁₆₀处理下达到较高水平,其中2023年最高值为21.42 mg/g。2023年的各处理间蔗糖含量差异不显著,但整体上高负载处理相对较高;2024年的L₁₆₀处理显著高于L₁₁₀和L₁₃₅处理,而与L₈₅处理差异不显著。两年果实果糖和维生素C含量随着负载量增加基本呈‘降-升-降’波动变化趋势,但在年内负载量处理间多无显著差异;2023和2024年维生素C含量分别以L₁₃₅和L₈₅处理组较高,而两年果糖含量分别以L₁₃₅和L₁₆₀处理组较

高。两年果实葡萄糖和类黄酮含量随负载量增大均表现为先升后降的变化趋势,且均以L₁₃₅处理最高,L₈₅处理最低,且在L₁₃₅与L₈₅处理间均差异显著;2023和2024年的L₁₃₅处理果实葡萄糖含量分别为44.99和44.92 mg/g,相应的类黄酮含量分别为1.13和1.14 mg/g。可见,不同单株负载量对苹果果实品质指标的影响在2023年和2024年表现出一定的相似性,但各指标间表现存在一定差异。总体而言,单株负载量为135个时的各指标表现最佳,能够有效提升果实的糖分和抗氧化物质含量,可作为提升果实品质的理想负载量。

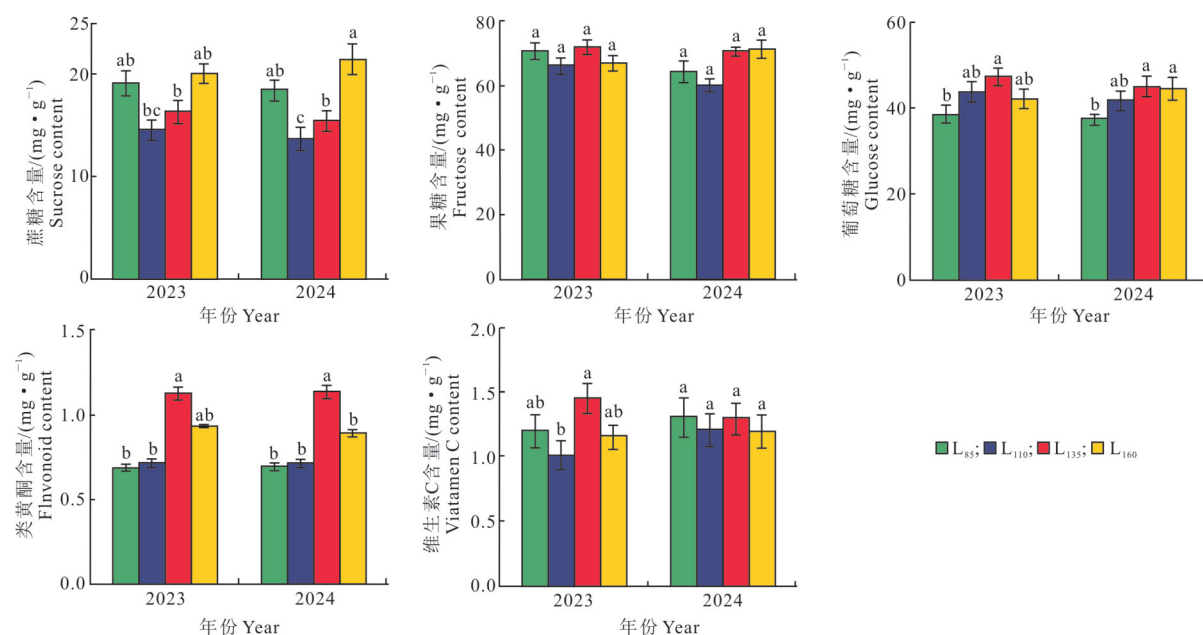


图3 2023和2024年不同负载量处理下果实可溶性糖、类黄酮和维生素C含量

Fig. 3 The soluble sugar, flavonoid, and vitamin C contents under different fruit load treatments in 2023 and 2024

2.6 单株果实负载量对苹果产量的影响

两年间不同果实负载量处理对苹果果实产量

均有显著影响;随着果实负载量的增加,单果质量均逐渐降低,而单株产量先升后降,并均在L₁₃₅处理

下达到最高值,在 L_{85} 处理下达到最低值(表5)。其中, L_{85} 和 L_{110} 处理单果质量在2023年与负载 L_{135} 处理无显著差异,与负载 L_{160} 处理差异显著,在2024年与负载 L_{135} 和 L_{160} 处理均差异显著,而两年的 L_{85} 与 L_{110} 处理间均无显著差异; L_{85} 处理单果质量在2023和2024年分别比 L_{160} 处理显著增加44.6%和36.7%。同时, L_{135} 处理单株产量在2023年与其余处理组均差异显著, L_{135} 、 L_{160} 处理又显著高于 L_{85} 处理, L_{135} 处理较 L_{85} 处理显著提高47.3%; L_{135} 处理单株产量在2024年与 L_{135} 、 L_{160} 处理均无显著差异,但三者均显著高于 L_{85} 处理, L_{135} 处理较 L_{85} 处理显著提高38.4%。综上可知,负载量对果实产量具有显著影响,适度增加负载量(如 L_{110} 、 L_{135})可以在保证单果质量的同时显著提高单株产量,但过高负载量(L_{160})会导致单果质量显著下降,对单株产量的促进作用减弱。因此,合理控制单株果实负载量可以在保证果实品质、单果质量的同时,有效提升产量。

表 5 2023 和 2024 年不同果实负载量处理下苹果果实产量

Table 5 Apple fruit yield under different fruit load treatments in 2023 and 2024

年份 Year	处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	单株产量/kg Individual plant yield
2023	L_{85}	310.48 ± 7.03 a	26.39 ± 0.60 c
	L_{110}	308.57 ± 10.93 a	33.94 ± 1.20 b
	L_{135}	287.93 ± 9.72 ab	38.87 ± 1.31 a
	L_{160}	214.73 ± 7.75 b	34.36 ± 1.24 b
2024	L_{85}	328.17 ± 10.36 a	27.90 ± 0.88 b
	L_{110}	322.60 ± 15.33 a	35.49 ± 1.69 a
	L_{135}	285.98 ± 6.11 b	38.61 ± 0.82 a
	L_{160}	240.12 ± 6.80 c	38.42 ± 1.09 a

3 讨 论

作为苹果生长发育最主要的“库”器官,叶片生长发育、光合速率的高低与作物产量紧密相关^[14]。光合作用是将光能转化为化学能从而制造有机物的过程,是产量形成的基础,叶面积是衡量叶片光合能力的重要指标^[15],同时,树体结构及其对光能利用效率的调控也直接影响光合产物的积累与分配^[16]。与冉辛拓等^[17]和薛晓敏等^[18]关于苹果的报道一致,本研究结果表明适度提高单株果实负载量能够刺激苹果叶片光合机构运行,但过高的负载又会使光合压力上升,光合产品无法满足持续消耗,导致光合指标下降。此外,陈青^[19]和Baldassi等^[20]在酿酒葡萄负载量对叶片叶绿素含量影响的研究中也发现,随着负载量的增大,叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量也逐渐增大。但王伯臣等^[21]在

‘瑞香红’苹果的研究中指出,随着果实负载量的增大,叶水势下降,叶片脱落酸含量上升,叶绿素含量下降。本研究结果显示,‘富士’苹果百叶质量和叶面积在 L_{85} ~ L_{160} 的负载量范围内呈“先增后降”的趋势,而叶绿素含量则随负载量提高而增加,这与光合机构在较高负载条件下保持较高活性有关。同时,本研究还发现,在光照较强的时段(11:00—14:00),中等以上负载处理(L_{110} 、 L_{135} 、 L_{160})的苹果植株叶片均表现出更高的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,同时胞间 CO_2 浓度下降,说明其叶片 CO_2 同化能力增强。

单株果实负载水平还显著影响果树树体生长结构与翌年结果潜力。维持光合产物分配阈值与冠层三维空间构型的协同优化,是调控果树地上部器官(茎、叶)与根系协同发育的关键生理基础^[22],通过建立源-库动态平衡关系,实现营养生长与生殖生长的动态平衡,这既是果树持续稳产的保障,更是果实品质形成的生理前提^[23]。本试验结果显示,在不同单株果实负载处理下,‘富士’苹果树体中、短枝数量以及新梢长度、粗度、干径均随负载量提高表现出先升后降的趋势,中、短枝变化尤其敏感。中、短枝比例是衡量树体稳定结果能力的重要结构指标,其与花芽分化率呈强正相关。当负载过高时,树体代谢压力增加,光合产物优先供应果实,对营养生长造成抑制,这些结果与刘丽等^[10]、卢蒙蒙^[24]在苹果中的研究结论一致。此外,持续高负载还可能导致树体早衰、品质下降以及抗逆性减弱^[25]。

本研究结果表明,在苹果果实外在品质方面,随着单株负载量增加,单果质量、果径和果形指数普遍下降,这与王凯^[26]和González-villagra等^[27]的研究结果吻合。单株负载水平对果实品质具有显著调控作用。已有研究表明,通过疏花疏果调节负载量可显著改善果实品质,如在枇杷中可促进果实膨大并提高品质指标^[28],降低负载量可导致草莓品种‘Ventana’可滴定酸含量下降^[29],说明不同品质指标对负载变化的响应存在差异。在果实内在品质方面,本研究观察到‘富士’苹果果糖、葡萄糖和总糖含量均在中等负载水平达到较高值,而在高负载量(L_{160})下明显下降;同时,果实类黄酮与维生素含量也在 L_{135} 处理达到峰值,说明适宜负载能够促进果实次生代谢产物积累,提高果实品质,这与‘丽嘎啦/MM106’苹果^[14]和毛花猕猴桃(*Actinidia eriantha* Benth.)^[27]的相关研究报道一致。在苹果产量

方面,本研究中尽管较高负载处理(L_{160})单株产量较高,但由于单果质量显著下降,其单株产量又与 L_{110} 处理差异不显著;综合‘富士’苹果单果质量、单株产量两方面的表现认为,负载量 L_{135} 处理实现了产量最大化并保持较佳品质,这与库尔勒香梨^[30]和‘黄果梨’^[31-32]中的研究结果基本一致。

4 结 论

单株果实负载量对陕西渭北旱区果园矮化密植‘富士’苹果树体生长、果实品质、产量有显著影响。110~135个/株的“中等负载量”是维持树体生长平衡、促进花芽分化、提升果实综合品质并实现稳产增产的关键区间。渭北旱区果园在进行矮化密植‘富士’果园管理时,可以借鉴135个/株的负载量解决树势衰弱、新梢生长缓慢、树冠扩展慢、变成“小老树”等问题,达到平衡果实产量与经济效益的目的。

【参考文献】

- [1] 陈学森,王楠,彭福田,等. 中国重要落叶果树果实品质和熟期育种研究进展[J]. 园艺学报,2024,51(1):8-26.
Chen X S, Wang N, Peng F T, et al. Advances in quality and maturity breeding of important deciduous fruit trees in China [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2024, 51(1):8-26.
- [2] 马锋旺. 中国苹果产业发展的思考:现状、问题与出路[J]. 落叶果树,2023,55(4):1-4.
Ma F W. Reflections on the development of China's apple industry: current situation, problems and solutions [J]. Deciduous Fruits, 2023, 55(4):1-4.
- [3] 李前进. 陕西洛川苹果品种发展思考与建议[J]. 西北园艺(果树),2020(10):3-4.
Li Q J. Thoughts and suggestions on the development of apple varieties in Luochuan, Shaanxi Province [J]. Northwest Horticulture, 2020(10):3-4.
- [4] 邓秀新. 关于我国水果产业发展若干问题的思考[J]. 果树学报,2021,38(1):121-127.
Deng X X. Thoughts on the development of China's fruit industry [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(1):121-127.
- [5] 戚正云. 苹果矮化密植的优势及栽培技术[J]. 现代园艺,2025,48(9):121-123.
Qi Z Y. Advantages and cultivation techniques of dwarf high-density apple planting [J]. Modern Horticulture, 2025, 48(9):121-123.
- [6] 花蕾,刘炳辉,任秋会. 渭北优质无公害苹果生产技术研究[J]. 西北农业大学学报,1998,26(3):28-33.
Hua L, Liu B H, Ren Q H. Study on high-quality pollution-free apple production technology in Weibei region [J]. Journal of Northwest Agricultural University, 1998, 26(3):28-33.
- [7] 胥坤. 陕西省洛川县苹果矮砧密植栽培模式经济效益分析[J]. 农业工程,2025,15(2):159-162.
Xu K. Economic benefit analysis of apple dwarf rootstock dense planting mode in Luochuan County [J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(2):159-162.
- [8] 张利敏,候锋博,王李青,等. 洛川矮化密植苹果园产量效益调查[J]. 西北园艺,2025(2):81-84.
Zhang L M, Hou F B, Wang L Q, et al. Investigation on yield and benefit of dwarf and close planting apple orchard in Luochuan [J]. Northwest Horticulture, 2025(2):81-84.
- [9] 王永俊,刘杨. 苹果“小老树”的形成与抢救[J]. 北方果树,2022(3):33-34.
Wang Y J, Liu Y. The formation and rescue of apple “little old tree” [J]. Northern Fruits, 2022(3):33-34.
- [10] 刘丽,石彩云,魏志峰,等. 负载量水平对矮化自根砧‘富士’苹果生长发育和果实品质的影响[J]. 果树学报,2022,39(6):982-991.
Liu L, Shi C Y, Wei Z F, et al. Effects of fruit load on growth, development and fruit quality of Fuji apple on dwarfing rootstock [J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(6):982-991.
- [11] 张瑞芳. 不套袋对苹果品质的影响及果锈产生主要因素分析[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
Zhang R F. The effect of un-bagged on apple quality and analysis of main factors of fruit russet [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [12] 霍玉坤. ‘秦脆’苹果生长结果习性调查及栽培特性研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
Huo Y K. Study on growth and fruit habit and cultivation characteristics of ‘Qincui’ apple [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [13] 王正阳. 苹果果糖含量的QTL定位及己糖转运蛋白MdHT2.2的功能分析[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Wang Z Y. QTL mapping of fructose content and functional analysis of hexose transporter MdHT2.2 in apple [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [14] 罗宏海,李俊华,张宏芝,等. 源库调节对新疆高产棉花产量形成期光合产物生产与分配的影响[J]. 棉花学报,2009,21(5):371-377.
Luo H H, Li J H, Zhang H Z, et al. Effects of source and sink manipulation on transportation and allocation of leaf photosynthetic products during flowering and boll-setting stage in high-yield cotton of Xinjiang [J]. Cotton Science, 2009, 21(5):371-377.
- [15] 张秀美,王宏,张广仁. 不同负载量对苹果‘丽嘎啦/MM106’冠层光合能力及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):218-220.
Zhang X M, Wang H, Zhang G R. Effects of different loads on photosynthetic capacity and quality of apple ‘Ligala/MM106’ [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(10):218-220.
- [16] 吴万兴,鲁周民,李文华,等. 疏花疏果与套袋对枇杷果实生长与品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(11):73-75.
Wu W X, Lu Z M, Li W H, et al. Effects of flower and fruit

- thinning and bagging on fruit growth and quality of loquat[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2004, 32(11): 73-75.
- [17] 冉辛拓, 张新生. 不同负载量对苹果光合速率及干物质生产的影响[J]. 华北农学报, 2003, 18(S1): 131-132.
- Ran X T, Zhang X S. Effect of crop load on photosynthetic rate and dry matter production of apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(S1): 131-132.
- [18] 薛晓敏, 韩雪平, 王来平, 等. 负载量水平对矮化中间砧苹果生长发育、光合作用及产量品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 202-206.
- Xue X M, Han X P, Wang L P, et al. Effects of different fruit load levels on growth, photosynthesis, yield and quality of apples with dwarf interstock[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 202-206.
- [19] 陈青. “厂”字整形方式下负载量对酿酒葡萄光合作用的调控研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- Chen Q. Studies on regulated mechanism of berry loading to photosynthesis in grapevine with shape training system [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [20] Baldassi C, Berim A, Roeder S, et al. Rootstock and crop load effects on ‘Honeycrisp’ photosynthetic performance and carbohydrate accumulation[J]. Plants, 2023, 12(23): 4035.
- [21] 王伯臣, 李鸿飞, 杨亚州, 等. 负载量对高接‘瑞香红’苹果果实生长和品质的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(6): 1146-1156.
- Wang B C, Li H F, Yang Y Z, et al. Impacts of crop load on fruit growth and quality for top grafted ‘Ruixianghong’ apple [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(6): 1146-1156.
- [22] 王凯, 李秀玲, 张晓云, 等. 负载量对南疆矮化自根砧苹果树体生长、光合能力及果实发育和品质的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(1): 48-59.
- Wang K, Li X L, Zhang X Y, et al. Impacts of fruit load on tree growth, leaf gas exchange and fruit development and quality in apple trees grafted on a dwarfing rootstock in southern Xinjiang [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(1): 48-59.
- [23] 孙宇. 负载量对富士苹果地上部及根系生长的影响[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2020.
- Sun Y. Effects of crop load on aerial and root growth in Fuji apple[D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2020.
- [24] 卢蒙蒙. 红富士苹果化学疏花疏果技术和盛果期适宜负载量研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Lu M M. Study on chemical flower-thinning and fruit-thinning techniques of red Fuji apple and suitable load at full fruit stage [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [25] 李卓阳, 董晓颖, 王志鹏, 等. 不同负载量处理对红富士苹果产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(2): 210-214.
- Li Z Y, Dong X Y, Wang Z P, et al. The effects of different capacity on yield and quality of red Fuji apple [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(2): 210-214.
- [26] 王凯. 负载量对南疆矮化自根砧嘎啦苹果形态建成、光合和可溶性糖的影响研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2022.
- Wang K. Impacts of fruit load on canopy morphogenesis, leaf photosynthesis and soluble sugar for Gala apple trees grafted on dwarfing rootstock in southern Xinjiang [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2022.
- [27] González-villagra J, Palacios-peralta C, Muñoz-alarcón A, et al. Influence of fruit load regulation on harvest and postharvest fruit quality and antioxidant-related parameters in sweet cherry (*Prunus avium* L.) cv. *Regina* cultivated under plastic covers in southern Chile[J]. Plants, 2024, 13(16): 2257.
- [28] Syvertsen J P, Goñi C, Otero A. Fruit load and canopy shading affect leaf characteristics and net gas exchange of ‘Spring’ navel orange trees[J]. Tree Physiology, 2003, 23(13): 899-906.
- [29] 徐金涛, 赵会英, 李永红, 等. 整形方式对‘黄冠梨’幼树生长及光能利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 85-90.
- Xu J T, Zhao H Y, Li Y H, et al. Effects of training systems on growth and light utilization of young ‘Huangguan’ pear trees [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 85-90.
- [30] Liao G L, Jiang Z Q, He Y Q, et al. The comprehensive evaluation analysis of the fruit quality in *Actinidia eriantha* pollinated with different pollen donors based on the membership function method[J]. Erwerbs-Obstbau, 2022, 64(1): 91-96.
- [31] 王乾, 邵白俊杰, 温玥, 等. 不同叶果比对库尔勒香梨果实品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(18): 182-188.
- Wang Q, Shao-bai J J, Wen Y, et al. Effects of different leaf-fruit ratios on fruit quality of Korla fragrant pear [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(18): 182-188.
- [32] 魏海斌, 刘小利, 顾文毅, 等. ‘黄果梨’不同负载量对产量和果实品质的影响[J]. 现代园艺, 2021, 44(23): 1-3.
- Wei H B, Liu X L, Gu W Y, et al. Effects of different loads on yield and fruit quality of ‘Huangguo pear’ [J]. Contemporary Horticulture, 2021, 44(23): 1-3.

(责任编辑: 裴阿卫)