果 树 学 报 2023,40(1):48-59
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20220285

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

王 凯[1],李秀玲[1],张晓云[1],袁引燕[1],鲁晓燕[1],姜继元[2],张 东[3],杨伟伟[1*]

([1]石河子大学农学院·特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室,新疆石河子 832000;[2]新疆农垦科学院,新疆石河子 832000;[3]西北农林科技大学园艺学院·国家苹果改良中心杨凌分中心,陕西杨凌 712100)

摘 要:【目的】探讨负载量对南疆地区矮化自根砧嘎拉苹果树体生长、光合能力及果实发育和品质周年动态变化的影响,为南疆地区矮化自根砧苹果负载量调控及开发高效栽培技术提供理论依据。**【方法】**以南疆6年生皇家嘎拉/M9-T337苹果为试材,以单位主干横截面积果实数(个·cm^{-2})为标准设置5个负载量处理(0.3、2.3、4.4、6.1和8.2个·cm^{-2}),测定各负载量条件下树体生长、枝类组成、叶片光合、果实品质的动态变化,并估算当年经济效益。**【结果】**负载量增加会显著降低主干、主枝横截面积和冠幅,降低中、长枝比例,增加短枝比例,从而使总枝数显著增加而叶面积指数减小。除长枝梢在0.3个·cm^{-2}负载条件下生长不受抑制外,其他各负载量处理新梢长度和粗度会停止生长;长、中、短枝梢停长时间分别为花后60、45和30 d,且负载量越小,中、长枝梢的长度和基径越大。负载4.4个·cm^{-2}处理的苹果叶片叶绿素含量在冠层任何部位均保持较高水平。负载4.4、6.1和8.2个·cm^{-2}处理在光合周年动态变化和日变化中均保持较高的光合能力。光合周年动态变化中,0.3个·cm^{-2}负载在盛花后120 d达到最大,而其他处理光合能力在盛花后90 d达到最大。0.3和2.6个·cm^{-2}光合日变化呈现"双峰"曲线,而其他负载处理呈"单峰"曲线。负载量的增加显著提高叶片光合能力。然而,负载量的增大会显著降低果实单果质量、纵横径、果形指数、着色指数、可溶性固形物含量和优果率等指标,负载量4.4个·cm^{-2}时,果实品质、产量(44.38 t·hm^{-2})及经济效益(20.19万元·hm^{-2})达到最佳。**【结论】**南疆地区矮化自根砧皇家嘎拉苹果以每平方厘米主干横截面积留果4.4个左右为适宜负载量,有利于叶片光合能力提升及形成良好的树体结构和枝类比例,维持优良树势并获得优质的果实和最佳收益。

关键词:苹果;负载量;生长发育;光合;果实品质

中图分类号:S661.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2023)01-0048-12

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

WANG Kai[1], LI Xiuling[1], ZHANG Xiaoyun[1], YUAN Yinyan[1], LU Xiaoyan[1], JIANG Jiyuan[2], ZHANG Dong[3], YANG Weiwei[1*]

([1]College of Agriculture, Shihezi University/Key Laboratory of Special Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, Xinjiang, China; [2]Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China;[3]College of Horticulture, Northwest A & F University/Yangling Branch of National Apple Improvement Center, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract:【Objective】Impacts of dwarfing rootstock on the performance of apple trees are affected by environmental conditions. There is no precedent for application of dwarfing rootstocks in apple trees in Xinjiang. In addition, fruit load is one of the most important factors that affect the sustainable growth and development of apple trees, and the effects are stage specific. Thus, this research aims to clarify the impacts of fruit load on tree growth, leaf photosynthetic capacity and fruit yield and quality in apple

收稿日期:2022-05-23 **接受日期:**2022-07-30

基金项目:国家自然科学基金项目(31860527);石河子大学2021年度自主支持立项校级科研项目(007)

作者简介:王凯,男,在读硕士研究生,研究方向:果树生理生态。Tel:18167526096,E-mail:2296477313@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:18899592799,E-mail:yangww@shzu.edu.cn

trees grafted on a dwarfing rootstock over growing season in southern Xinjiang. Moreover, impacts of fruit load on total incomes at harvest were estimated.【Methods】Six-year-old Royal Gala/M9−T337 apple trees in southern Xinjiang were used as materials. Fruit loads were controlled according to the number of fruits per cm^2 of trunk cross-sectional area (No. · cm^{-2}). In total, 5 fruit loads were set, including 0.3 (T1), 2.3 (T2), 4.4 (T3), 6.1 (T4) and 8.2 (T5) No. · cm^{-2}. The seasonal dynamics of trunk diameter, branch diameter and leaf gas exchange and diurnal dynamics of leaf gas exchange were measured. The leaf chlorophyll content in various canopy parts were determined. Number of short (＜5 cm), medium (＞5 cm and ＜15 cm), and long (＞15 cm) shoots were counted. Fruit qualities and yield were determined at harvest and the economic incomes were estimated based on fruit diameter distribution.【Results】The cross-sectional areas of trunk and branch started to increase at 40 days after full bloom, irrespective of fruit loads. At 120 days after full bloom, T1 had significantly larger increase in cross-sectional areas of trunk and branch than the other treatments, and corresponding values in T2 and T3 were significantly higher than in T4 and T5. The canopy width started to increase from full bloom. At 120 days after full bloom, canopy width was larger with lower fruit load, and differed significantly among treatments. In addition, the number and proportion of long and medium shoots were higher, and those of the short shoots were lower with higher fruit load. Consequently, the total number of shoots were higher with higher fruit load and the lowest total number of shoots was found in T1, which had 15.04×10^5 shoots per hectare, and the highest in T5, which had 18.45×10^5 shoots per hectare. Except for long shoots under the fruit load of 0.3 per cm^2, the growth of leafy shoots for all shoot types ceased and was not affected by fruit loads. The growth of long, medium and short shoots ceased at 60, 45 and 30 days after full bloom, respectively. The smaller the fruit load, the larger the length and the base diameter for medium and long shoots. Impacts of fruit load on leaf chlorophyll content depended on leaf position within the canopy. T4 had the lowest SPAD value than the other treatments at upper canopy and the SPAD values of T2, T3 and T4 were significantly higher than those of T1 and T5 at the bottom canopy, and were similar among treatments at the middle canopy. Leaf photosynthesis increased from full bloom and reached the highest at 90 days after full bloom and then decreased to harvest, except for T1, in which highest leaf photosynthesis rate occurred at 120 days after full bloom. During the day, the leaf photosynthesis peaked at 11:30 am. Higher fruit load could significantly improve the leaf photosynthetic capacity. The fruit fresh weight, diameter, fruit shape index, color index and soluble solid sugar were reduced, and fruit number and yield were increased with increase in fruit load. However, the income per hectare peaked at the fruit load of 4.4 No. · cm^{-2}, and the corresponding yield and income were 44.38 t · hm^{-2} and 201 900 Yuan · hm^{-2}, respectively.【Conclusion】When fruit load is extremely low, the growth of long shoots were not inhibited. Otherwise, growth of all leafy shoots will ceases after a certain period of time and is not affected by fruit load. In southern Xinjiang. The optimum fruit load for Royal Gala / M9−T337 apple tree is 4.4 fruits per cm^2 of trunk cross-sectional area. This fruit load maximizes the photosynthetic capacity of leaves, and improves canopy structure, fruit yield and quality, and the accumulation of soluble sugars.

Key words: Apple; Load capacity; Growth and development; Photosynthesis; Fruit quality

矮化栽培已成为当今世界苹果栽培发展的主流趋势[1]，其中以M9系选育出的T337砧木为目前应用最为广泛的矮化自根砧木，具有主干性强、易成花、结果早、品质好、产量高等特点，不仅节省劳动力，还极大地提高了生产效率[2]。近年来，以中间砧为主的苹果矮砧密植栽培在中国很多苹果产区发展迅速，而矮化自根砧栽培起步较晚，推广进程缓慢[3]。与此同时，新疆正处于乔化栽培向矮化栽培

转型的关键时期。由于矮化自根砧M9-T337在不同地域的适应性不同，在新疆产区刚开始引进试验，栽培调控措施和花果管理技术匮乏，严重影响矮砧密植集约化栽培在新疆的推广。南疆地区是新疆苹果的主要产区，因此，矮化自根砧M9-T337如何响应南疆生境还需进行研究。

负载量调控是果树高效栽培的关键技术之一，直接影响果树冠层结构、叶片光合能力、果实产量和品质以及来年成花能力。适宜的负载量可均衡树体营养和生殖生长，优化树体结构和枝类组成，提高叶片光合能力，提升冠层光能截获能力和优化光照空间分布，从而利于果实产量和品质形成及经济效益的提高[4-9]。生产中盲目追求果实产量则会造成明显的“大小年”现象。负载量过高，果实品质变差，翌年花量降低，树势衰弱；负载量过低，则会导致树体营养生长过旺，果园郁闭，营养生长抑制生殖生长，造成大幅减产[10-13]。目前，对矮化栽培苹果适宜负载量的研究主要集中于某一物候期树体生长、叶片光合、果实发育的影响方面[14-17]。苹果生长发育具有明显的阶段性，不同时期负载量如何影响自根砧苹果树体生长、叶片光合、果实发育目前尚不清楚。因此，笔者在本研究中以南疆地区6年生皇家嘎拉/M9-T337矮化自根砧苹果为试材，以单位主干横截面积果实数（个•cm^{-2}）为标准设置不同负载量，系统研究负载量对苹果冠层结构、叶片光合能力及果实品质的周年动态变化的影响，以明确新疆产区矮化栽培条件下负载量对冠层结构和叶片光合的调控，为精准的负载量调控及开发矮化栽培高效生产技术提供指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2021年在新疆生产建设兵团一师十团海升集团苹果种植基地进行，该地地处天山南麓中段（E 40.66°，N 81.27°），年降水量为62.4 mm，无霜期为220 d，年平均气温10.7 ℃，年均蒸发量为1 876.6~2 558.9 mm，日照充沛，年日照时数2721~2918 h。试验园嘎拉和富士混栽，品种分别为皇家嘎拉和美玛富士，不套袋，砧木M9-T337，树龄6 a（年），树形按高纺锤形整形，株行距1.0 m × 3.5 m，灌溉采用滴灌，土壤为沙土，行间未覆草，田间整体管理水平较高。

1.2 试验方法

于5月对试验树进行疏果处理，用游标卡尺测量试验树嫁接口上方10 cm处树干粗度，并计算主干横截面积，以单位主干横截面积挂果量（个•cm^{-2}）设置5个负载量处理：T1：0；T2：2；T3：4；T4：6；T5：10个•cm^{-2}。待树体落花落果后统计果实数量，核定各处理最终负载量分别为T1：0.3；T2：2.3；T3：4.4；T4：6.1；T5：8.2个•cm^{-2}，各处理单株小区，5次重复。

1.2.1 树体生长及枝类组成测定 有以下几项。

（1）树体生长动态测定。于5月盛花期后，每隔40 d用钢卷尺分别测量各处理的干周、冠幅、主枝粗度，具体方法参考董铁等[18]和张强等[19]的方法。

（2）枝条生长动态测定及枝类组成统计。于盛花后15 d，分别选取各处理树体外围300个1年生枝条标记，每隔15 d用钢卷尺和游标卡尺测量枝条长度和粗度，共测定7次，所得数据取平均值。并在花后120 d（果实成熟期）统计各处理长（＞15 cm）、中（5~15 cm）、短（＜5 cm）枝（梢）的数量，并依据株行距计算每公顷总枝量和枝类组成比例。

（3）叶面积指数测定。在盛花后120 d选择典型晴天，于上午9：00—11：00使用CI-110植物冠层结构分析仪（CID，美国）对各处理树体进行拍摄。拍摄时，将仪器鱼眼探头置于树体冠层下方获取植物冠层彩色鱼眼图像，随后使用仪器自带软件分析并提取试验树叶面积指数（LAI）。

1.2.2 叶片气体交换测定 试验使用LI-6800型便携式光合仪测定叶片气体交换参数（LI-COR，美国），包括净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）和胞间CO_2浓度（C_i）。测定时在晴天选取各处理树冠中上部生长一致且成熟的叶片测定，5次重复。气体交换测定包括日变化和年变化测定，日变化测定于果实成熟期8月20日的9：30—19：30进行，每隔2 h测定1次；年变化测定于5月盛花后开始，每次测定于上午9：00—12：00进行，每30 d测定1次，同时测定并记录光照、温度等气候因子。

1.2.3 叶片叶绿素含量测定 于盛花后120 d用SPAD-502叶绿素计（Konica Minolta，日本）测定叶片叶绿素含量，每处理取冠层上部（距地面＞2 m）、中部（距地面≥1 m且＜2 m）和下部（距地面＜1 m）部各20枚叶片进行叶绿素含量测定，之后取平均值。

1.2.4 果径动态测定 于坐果15 d后，对每处理随机标记10个果实，每隔15 d用游标卡尺测量果实纵横径，共测定8次，取平均值。

1.2.5　果实产量及经济效益核算　果实成熟后，采收各处理所有果实，统计各株果实数量并使用电子天平测定单株产量，进一步测定所有果实横径并分级[5]。实地调研试验产区苹果收购价格，并结合单株产量、株行距估算每公顷产量及经济效益。

1.2.6　果实品质测定　每处理随机选取100个无病虫害的果实，使用GY-4型果实硬度计测定果实硬度；使用PAL-1型数显糖度计（Atago，日本）测定果实可溶性固形物含量；使用CR-410果实色差计（Konica Minolta，日本）测定果实色差；使用游标卡尺测量果实纵横径。参考薛晓敏等[12]的方法计算果实着色指数和光洁度指数。

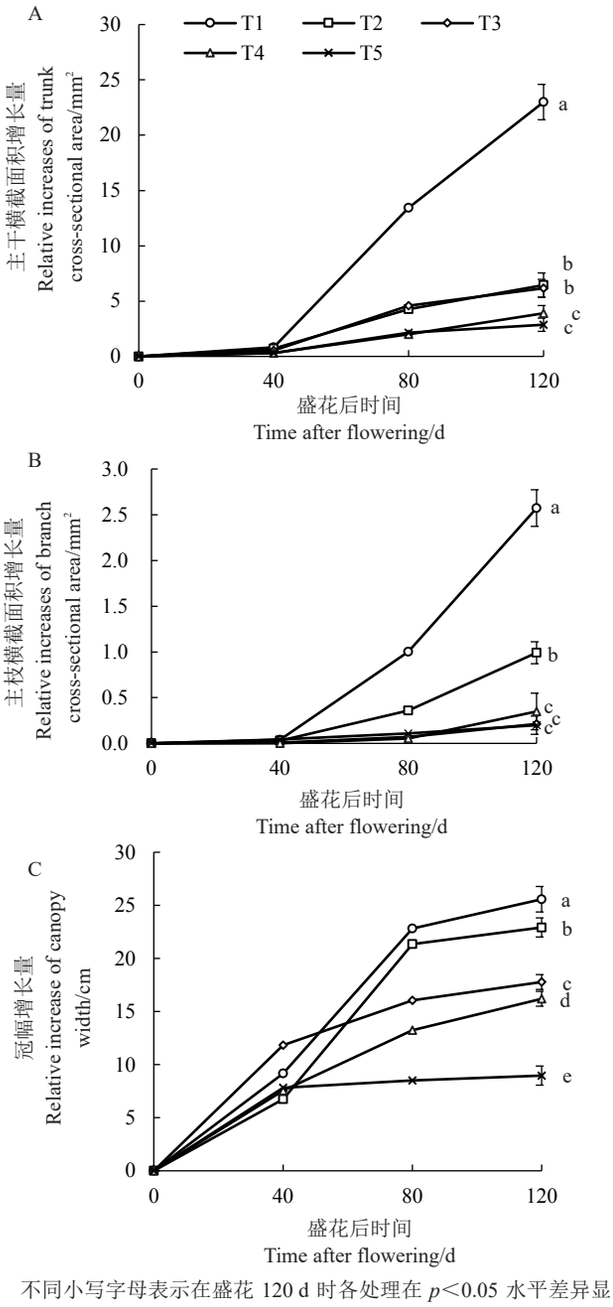
1.2.7　数据处理与分析　采用Microsoft Excel 2010和SPSS软件进行数据分析，采用Origin 2018软件进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　负载量对树体生长动态的影响

由图1-A~B可知，盛花后40 d内，不同负载量苹果树体主干和主枝横截面积增长缓慢且差异不显著，随时间推移，处理间差异增大。盛花后120 d时，T1主干和主枝横截面积增长量显著大于其他处理，T2和T3主干横截面积增加量显著大于T4和T5，T2主枝横截面积增长量显著大于T3、T4和T5，且T3、T4和T5处理间无明显差异。对于冠幅增长量（图1-C），各处理盛花后冠幅快速增加，在盛花40 d后，低负载的T1和T2处理一直保持高速增长，而T3、T4和T5则缓慢增长，至盛花后120 d时冠幅增加量随负载量的增加而降低，且处理间差异显著。由上可知，树体营养生长受负载量的调控，低负载树体生长旺盛，高负载量树体生长缓慢。

由图2-A和图2-D可知，盛花后各负载量长枝梢长度和基径生长迅速；盛花60 d后，除T1保持高速增长外，其他处理生长缓慢；随时间推移，处理间差异增大，至盛花后120 d时，T1枝梢长和基径显著大于其他处理，T2和T3枝梢长显著大于T4和T5处理，而T2枝梢基径显著大于T3、T4和T5处理。不同负载量中枝梢长（图2-B）和基径（图2-E）在盛花后45 d内保持高速增长，之后生长停滞或缓慢；盛花后120 d时，T1和T5枝梢长显著大于其他处理，且二者间差异显著；T1和T2枝梢基径显著大于其他处理，且T2枝梢基径显著大于T1。各负载量短枝



不同小写字母表示在盛花 120 d 时各处理在 $p<0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at 120 d after full bloom among treatments at $p<0.05$. The same below.

图1　负载量对皇家嘎拉/M9−T337主干（A）、主枝（B）和冠幅（C）增加量的影响

Fig. 1　Impacts of fruit load on relative increases in trunk cross-sectional area (A), branch cross-sectional area (B) and canopy width (C) in Royal Gala apple trees grafted onto M9−T337 rootstock

梢长（图2-C）和基径（图2-F）盛花后30 d内生长迅速，在30 d后生长缓慢；盛花后120 d时，T3、T4和T5枝梢长显著大于T1和T2，而各处理枝梢基径无显著差异。综上，除长枝梢在极低负载水平（T1）下

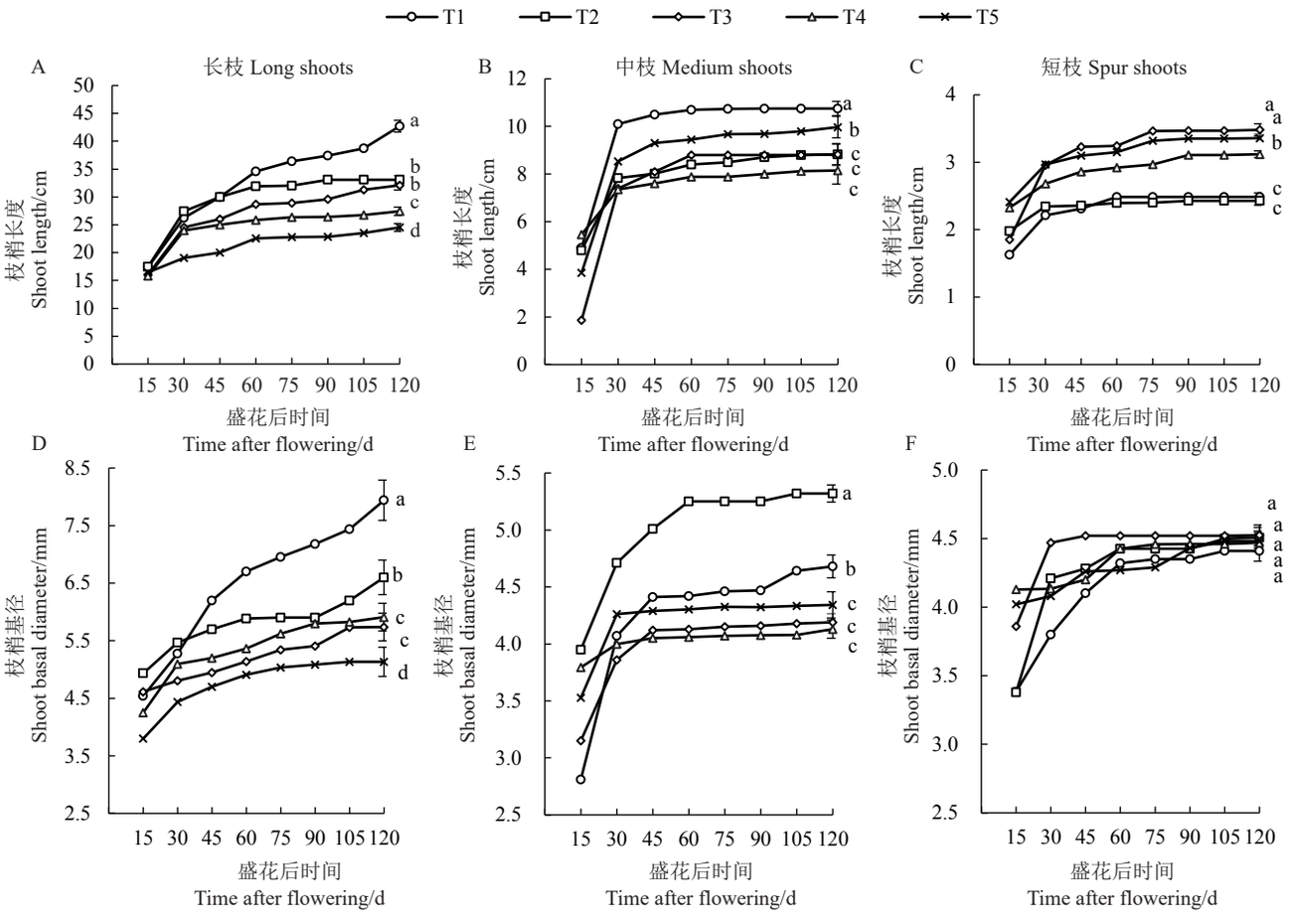


图 2 负载量对皇家嘎拉/M9−T337 长枝（A、D）、中枝（B、E）、短枝（C、F）枝长（A、B 和 C）和基径（D、E 和 F）的影响

Fig. 2 Impacts of fruit load on seasonal dynamics of shoot length (A, B and C) and shoot basal diameter (D, E and F) for long (A, B), middle (C, D) and short (E, F) shoots in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

枝梢长和基径生长不受抑制外，其他各类枝梢经快速生长后停止生长，且负载量未影响各类枝梢的停长时间。长、中和短枝梢的长和基径停长时间分别为盛花后约 60、45 和 30 d。

2.2 负载量对树体枝类组成及叶面积指数的影响

由表 1 可知，皇家嘎拉/M9−T337 各类枝梢数量和比例及总枝量在不同处理间差异显著，负载量的降低可显著增加中、长枝梢数量和比例，减少短枝数

表 1 负载量对皇家嘎拉/M9−T337 树体枝类组成及叶面积指数的影响

Table 1 Impacts of fruit load on the shoot composition and leaf area index (LAI) in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

处理 Treatment	枝梢数量 Number of shoots/(×10⁵ 条•hm⁻²)				枝梢比例 Proportion to total number of shoots/%			叶面积指数 LAI
	长枝 Long shoot ＞15 cm	中枝 Medium shoot 5~15 cm	短枝 Short shoot ＜5 cm	总枝数 Total shoot	长枝 Long shoot ＞15 cm	中枝 Medium shoot 5~15 cm	短枝 Short shoot ＜5 cm	
T1	1.88±0.02 a	3.44±0.07 b	9.72±0.03 e	15.04±0.08 e	12.48±0.02 a	22.91±0.07 b	64.62±0.07e	2.19±0.03 c
T2	1.59±0.04 d	4.00±0.03 a	11.55±0.04 d	17.14±0.05 c	9.26±0.01 c	23.37±0.07 a	67.38±0.07d	2.74±0.01 a
T3	1.74±0.01 b	2.83±0.03 d	11.69±0.04 c	16.25±0.04 d	10.68±0.03 b	17.40±0.03 c	71.91±0.06 c	2.21±0.02 b
T4	1.21±0.01 e	3.13±0.06 c	13.70±0.12 b	18.04±0.13 b	6.73±0.03 e	17.33±0.04 d	75.94±0.06 b	2.02±0.03 d
T5	1.65±0.02 c	2.11±0.11 e	14.69±0.04 a	18.45±0.08 a	8.95±0.00 d	11.43±0.03 e	79.62±0.06 a	1.75±0.04 e

注：同列不同小写字母表示在 $p<0.05$ 差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $p<0.05$. The same below.

量和比例，并导致总枝梢数和叶面积指数的下降。长枝梢数量范围为1.21×10^5~1.88×10^{5}条•hm^{-2}，以T1最大，T4最小；中枝数量范围为2.11×10^5~4.00×10^{5}条•hm^{-2}，以T2最大，T5最小；短枝和总枝梢数量范围分别为9.72×10^5~14.69×10^{5}条•hm^{-2}和15.04×10^5~18.45×10^{5}条•hm^{-2}，均以T5最大，T1最小。各负载量处理间叶面积指数差异显著，大小顺序为T2＞T3＞T1＞T4＞T5。

2.3　负载量对叶片光合特性的影响

负载量对皇家嘎拉/M9−T337叶绿素含量的影响取决于叶片空间位置（图3）。T4处理冠层上部叶片叶绿素含量显著低于其他处理；冠层中部各处理间叶片叶绿素含量相似；T1和T5处理冠层下部叶片叶绿素含量显著低于T2、T3和T4，且T2、T3和T4间差异不显著。

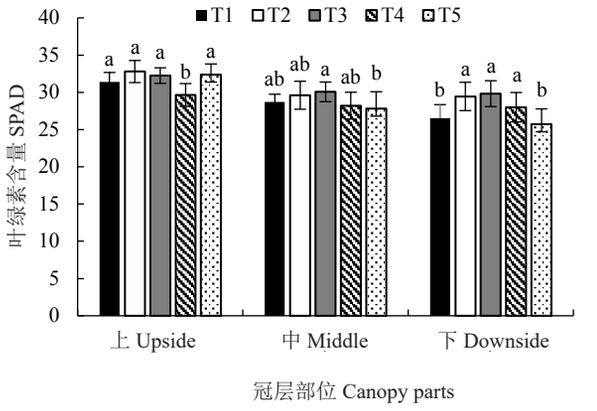


图3　负载量对皇家嘎拉/M9−T337不同冠层部位叶片叶绿素含量的影响

Fig. 3　Impacts of fruit load on leaf chlorophyll content in different canopy parts in Royal Gala apple trees grafted on M9-T337 rootstock

图4为不同负载量处理下苹果叶片气体交换年变化曲线。总体上各处理除C_i值于盛花后60 d下降外，其他叶片气体交换参数盛花后数值不断增加，至盛花后90 d达到最大值，到果实采收时较盛花后90 d

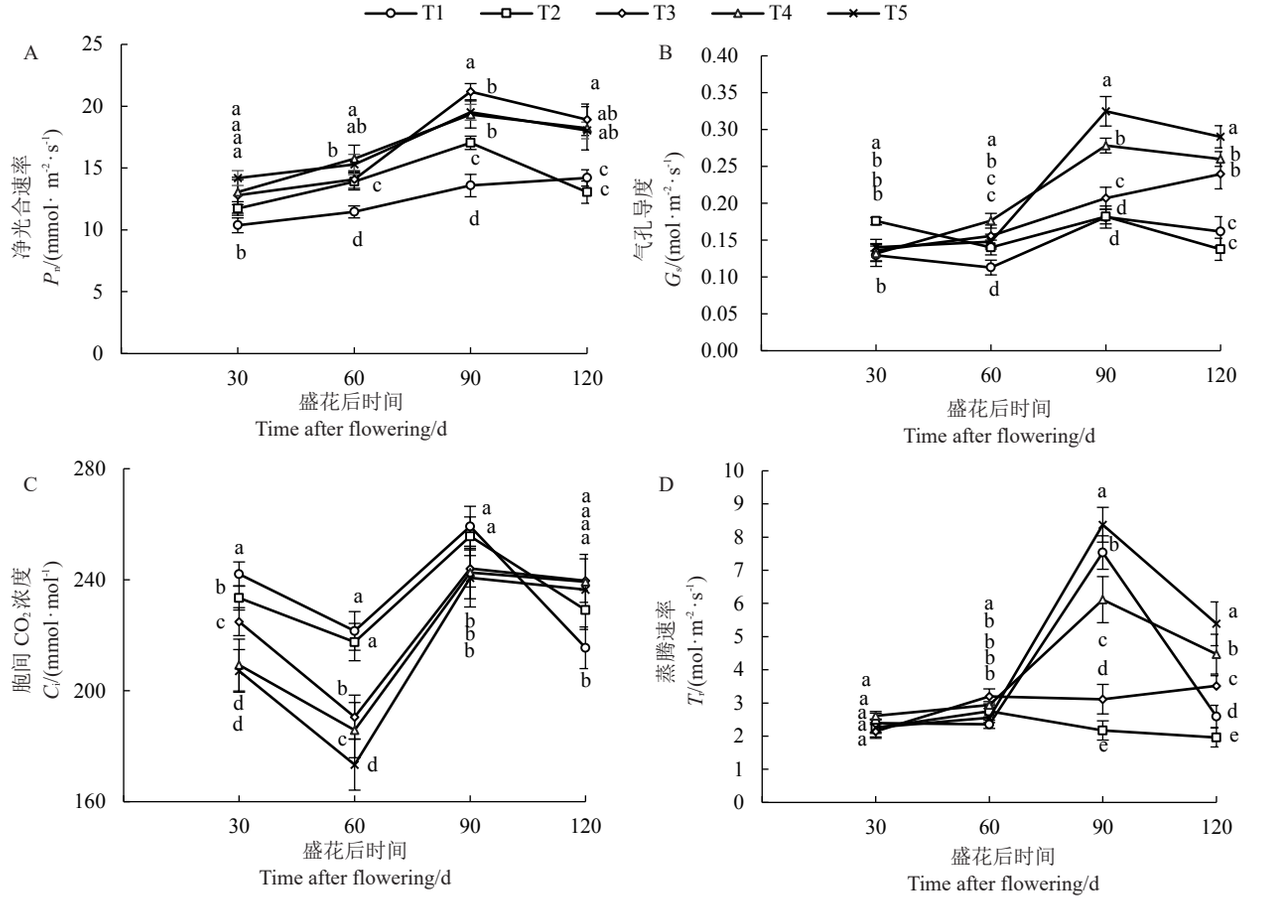


图4　负载量对皇家嘎拉/M9−T337叶片净光合速率（A）、气孔导度（B）、胞间二氧化碳浓度（C）和蒸腾速率（D）年变化的影响

Fig. 4　Impacts of fruit load on the annual dynamic changes of net photosynthesis rate (A), stomatal conductance (B), intercellular CO_2 concentration (C), and transpiration rate (D) in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

数值下降。负载量的增加会显著增加叶片光合能力（图4-A~B），盛花后90和120 d时，高负载处理T3、T4和T5叶片的P_n和G_s显著大于其他处理，其中T3的P_n值最大，但T3的G_s值显著低于T4和T5。

盛花后90 d前，高负载处理T3、T4和T5的C_i值显著小于T1和T2（图4-C）。各处理T_r值（图4-D）在花后30 d时无显著差异。盛花后60~90 d时，T1、T4和T5的T_r值显著大于T2和T3，且T2和T3的T_r值周年保持在较低水平。

图5为不同负载量处理下苹果叶片气体交换日变化曲线。总体上，P_n、G_s和T_r随着负载量的增加而不断增加，结合图6可知，清晨9:30光照弱（334.41 μmol·m^{-2}·s^{-1}），温度低（24.13 ℃），此时气孔开合程度较大，T_r较低，C_i较高，有利于光合作用的进行；到11:30时，光照度（1 245.66 μmol·m^{-2}·s^{-1}）和温度（32.00 ℃）迅速升高；各处理C_i值下降，P_n、G_s和T_r值上升并达到全天最高峰。13:30时，此时光照度为一天最大值（1 508.89 μmol·m^{-2}·s^{-1}），温度为35.32 ℃，气孔关闭，T_r和P_n下降，C_i达到谷底开始上升。15:30时，此时光照和温度开始下降，气孔打开，低负载T1和T2的P_n和T_r值开始上升，并在17:30时达到2次高峰，而其他处理P_n值不断降低。傍晚19:30光照较弱（413.01 μmol·m^{-2}·s^{-1}），而温度较高（34.09 ℃），此时气孔开合程度小，T_r值低，除T1外各处理达一天中光合最小值。日变化中，低负载T1和T2呈现“双峰”曲线，其他处理呈现“单峰”曲线。

由图5可知，不同负载量叶片气体交换参数在15:30—17:30变化有所差异，除T5的G_s、T3和T5的T_r以及T1的C_i降低外，其他处理G_s、T_r和C_i值在15:30—17:30均呈上升趋势。同时，T1和T2的P_n呈“双峰”曲线，T3、T4和T5呈“单峰”曲线。此外，在17:30前，高负载量始终保持着较高的P_n、G_s、T_r和较低的C_i（如T5），低负载量始终保持着较低的P_n、

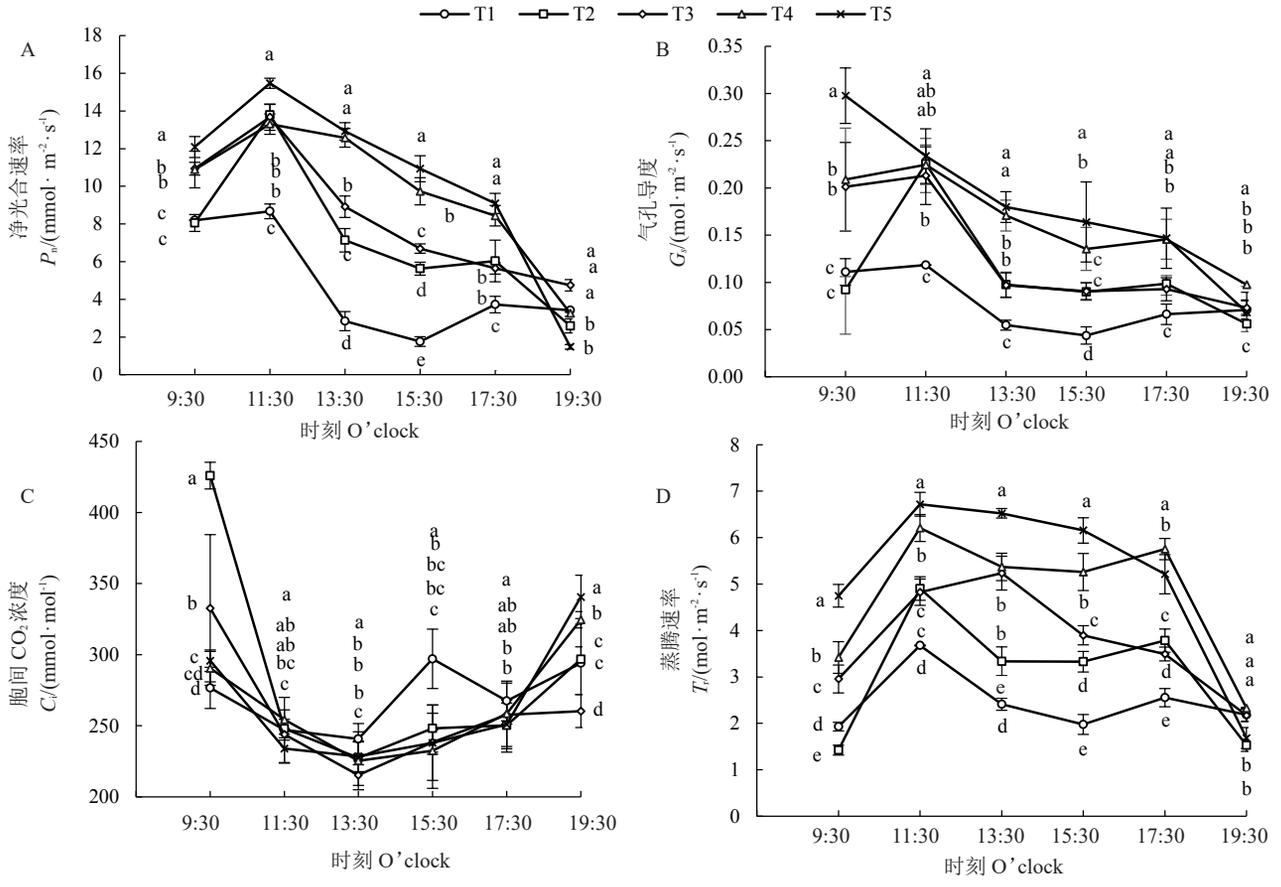


图5 负载量对皇家嘎拉/M9−T337叶片净光合速率（A）、气孔导度（B）、胞间二氧化碳浓度（C）和蒸腾速率（D）日变化的影响

Fig. 5 Impacts of fruit load on the diurnal changes of net photosynthesis rate (A), stomatal conductance (B), intercellular CO_2 concentration (C) and transpiration rate (D) in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

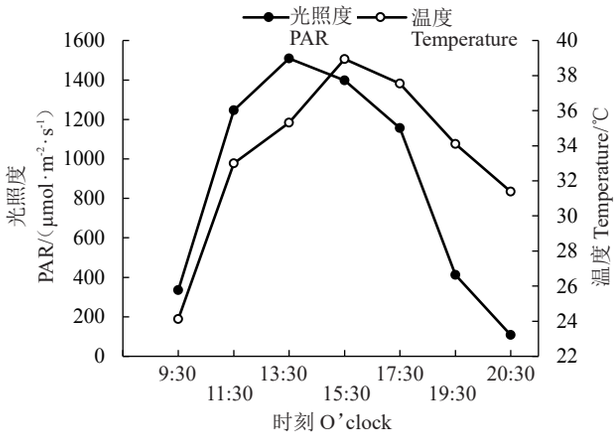


图6　2021年8月20日光照度和温度的日变化

Fig. 6　Diurnal changes in PAR and temperature during measurements of leaf gas exchange on 20th August, 2021

G_s、T_r和较高的C_i（如T1）。

2.4　负载量对果实发育和品质的影响

由表2可知，果实品质受负载量的显著影响。随着负载量的增大，果实单果质量、着色指数和可溶性固形物含量不断下降。负载量对果实光洁指数无显著影响。负载量增加会使果实硬度降低，但当负载量达到T4处理水平后，果实硬度会随着负载量的增加而增加。对于果实着色，L值越大，果面越亮，越有光泽；a值越大，果面越红；b值越大，果面黄色越深，底色越好。负载量处于低水平时（如T1），果面虽红，但光泽度和亮度显著低于其他处理；当负载量处于高水平时（如T5），果面光泽度和亮度虽高于其他处理，但果面红色却显著降低。可见，当负载处于中等水平时（T3），果面着色各个指标较为均衡。

表2　负载量对皇家嘎拉/M9−T337果实品质的影响

Table 2　Impacts of fruit load on fruit quality in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

处理 Treatment	单果质量 Single fruit weight/g	着色指数 Coloring index	光洁指数 Brightness index	硬度 Firmness/(kg·cm⁻²)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	果实色泽 The fruit color		
						L	*a*	*b*
T1	195.15±15.67 a	0.82±0.01 a	0.83±0.02 a	10.08±0.78 a	19.42±1.67 a	39.89±2.20 c	31.50±2.25 a	14.90±0.69 c
T2	160.65±16.32 b	0.78±0.01 b	0.76±0.01 a	8.97±0.86 b	16.49±0.87 b	44.81±2.20 b	28.02±2.25 b	17.40±0.59 a
T3	160.34±19.60 b	0.71±0.01 c	0.85±0.01 a	8.02±1.02 d	15.75±1.01 c	47.80±2.65 a	27.01±2.33 b	17.92±0.58 a
T4	127.02±18.57 c	0.66±0.01 d	0.84±0.02 a	8.23±0.81 cd	13.92±1.04 d	44.46±2.69 b	27.85±1.69 b	16.35±0.69 b
T5	122.77±20.33 c	0.52±0.01 e	0.78±0.01 a	8.56±0.94 c	13.90±1.08 d	46.40±2.20 a	23.06±1.21 c	17.91±0.41 a

图7为负载量对皇家嘎拉/M9−T337果实横径和单果质量频率分布的影响。负载量增加会使果个和单果质量降低，其中果实横径大于70 mm以T1（100%）占比最大，其他处理果实横径大于70 mm占比由大到小顺序为T2（78%）、T3（70%）、T4（21%）和T5（14%）。同果实横径分布相似，单果质量大于150 g以T1（100%）占比最大，随后依次为T2（75%）、

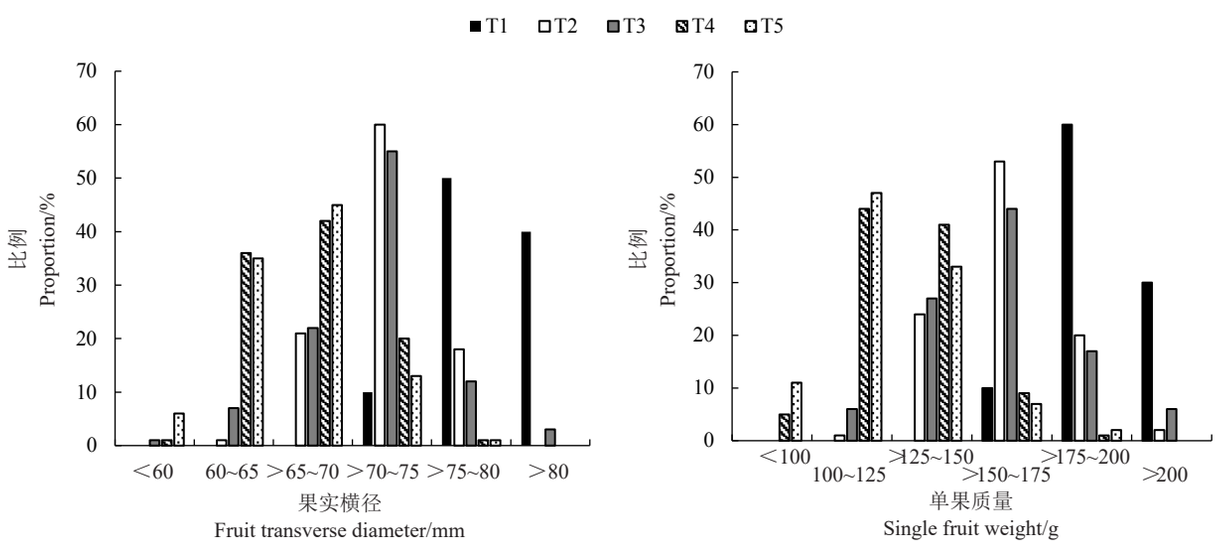


图7　负载量对皇家嘎拉/M9−T337果实横径和单果质量频率分布的影响

Fig. 7　Impacts of fruit load on distribution of fruit diameter and fresh weight in Royal Gala apple trees grafted on M9−T337 rootstock

T3（67%）、T4（10%）和T5（9%）。

由于试验初期将T1设置为0负载量，因此T1只测定了盛花后15 d和120 d的果实纵横径。由图8可知，在盛花后45 d内，各负载量果实纵横径生长迅速；盛花后45~75 d时，各负载量生长速度减缓；在75~90 d时，由于进入果实膨大期，果实生长加快，横径生长加速；盛花后120 d时，果实纵横径以T1最大并显著大于其他处理，其次为T2和T3，最后为T4和T5。

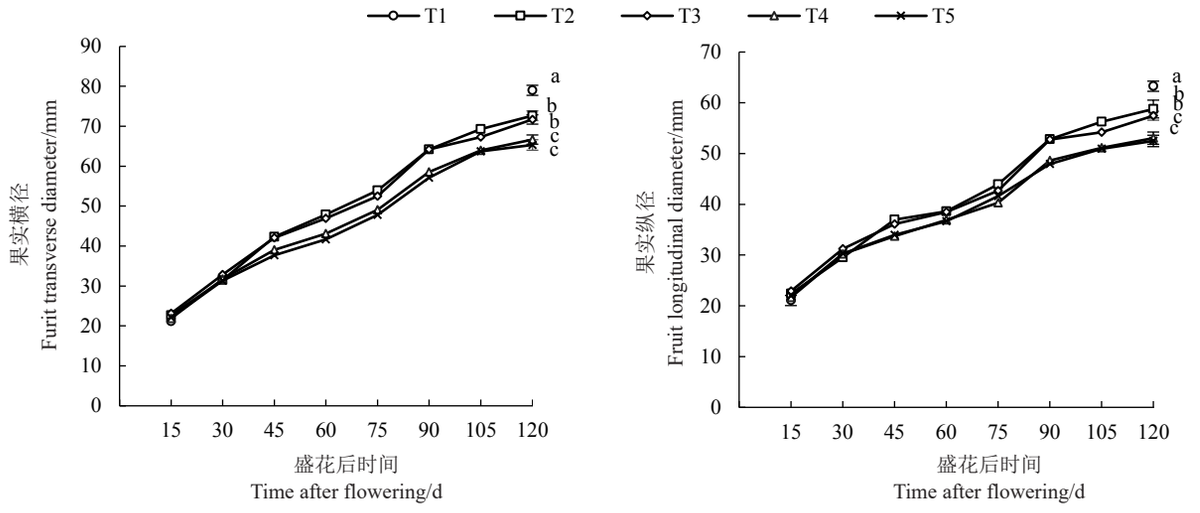


图 8 负载量对皇家嘎拉/M9-T337果实纵、横径年变化的影响

Fig. 8 Impacts of fruit load on seasonal change of fruit transverse diameter and longitudinal diameter in Royal Gala apple trees grafted on M9-T337 rootstock

2.5 负载量对经济效益的影响

由图9可知，单株果实个数、单株产量和公顷产量随着负载量的增加而增加，其中以T5最大，分别为199.4 个•株$^{-1}$、22.07 kg•株$^{-1}$和61.79 t·hm^{-2}；T1最小，对应值分别为5.8 个•株$^{-1}$，1.22 kg•株$^{-1}$和3.41 t·hm^{-2}。结合表3可知，负载量增加虽然会使产量同步增加，但果实收益并未同步增加，果实收益以T3负载水平最佳（20.19 万元•hm^{-2}）。

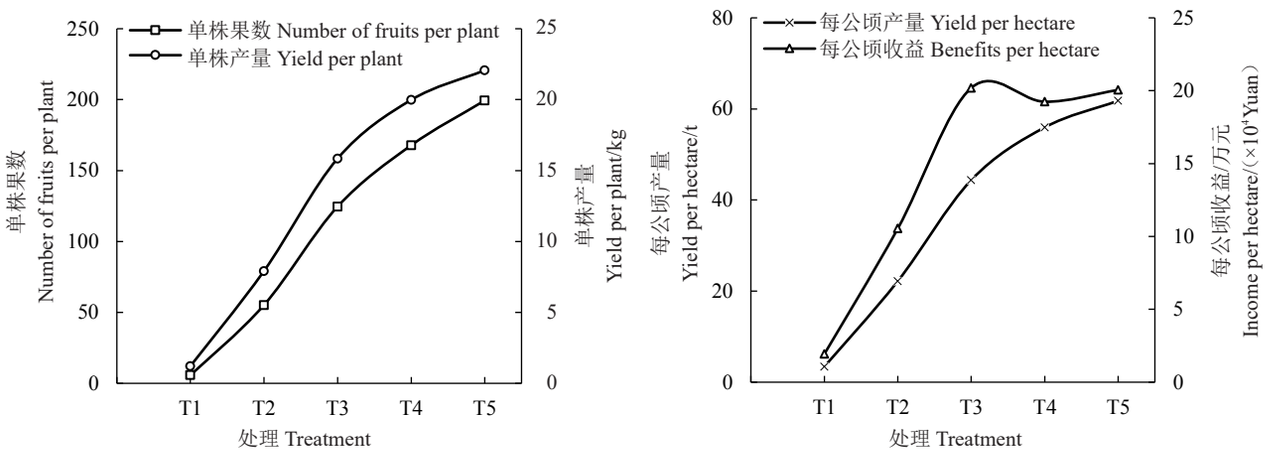


图 9 负载量对皇家嘎拉/M9-T337每公顷产量和收益的影响

Fig. 9 Impact of fruit load on yields and income per hectare in Royal Gala apple trees grafted on M9-T337 rootstock

表 3 2021年南疆产区不同级别皇家嘎拉果实收购价格

Table 3 Prices of Royal Gala apple fruits according to fruit transverse diameter in southern Xinjiang in 2021

果实横径 Fruit transverse diameter/mm	<60	60~65	>65~70	>70~75	>75~80	>80
单价 Price/(Yuan·kg^{-1})	1.5	2.5	3.5	5.0	5.5	6.0

3 讨 论

维持合理的负载量、保持适当的冠层结构是果树稳产、高产、优质的基础，也有利于保证果树营养和生殖生长的均衡发展。李宏建等[9]发现，树高、新

梢长和冠幅等树体参数的变化规律与负载量的大小有直接关系。本研究结果表明，主干和主枝横截面积增长量以及冠幅增长量均随负载量的升高而下降；说明负载量降低，可显著促进树体营养生长。此外，主干、主枝和冠幅的初始生长时间不同，冠幅从盛花后便开始生长，而主干和主枝从盛花后40 d才开始生长。这主要是由于冠幅的增加主要依赖于新梢的增长。同时，在发育前期，树体生长以贮存营养为主，供应新梢，但随着新梢及叶片的成熟，冠层光合总量不断增加，除可满足新梢和果实生长外，部分营养用于主干和主枝等其他器官的生长。

负载量对树体冠层发育和枝类组成有显著影响[4]，降低负载量会导致长枝数量下降，中、短枝数量增加[6]。本研究结果亦表明，长、中枝梢数量和比例会因负载量的降低而显著升高，短枝梢数量和比例及总枝梢数量则随负载量降低而显著下降。中、短枝作为苹果花芽的主要来源，其比例的升高有利于苹果连续结果能力的提升，而一定的枝条量也是保证树体连年稳产丰产的关键因素[20]。梁海忠等[21]的研究表明高纺锤形矮砧苹果树合理枝量为12×10^5条•hm^{-2}。李宏建等[9]的研究表明，7年生丽嘎拉苹果树适宜枝条量为15.02×10^5条•hm^{-2}。此外，长枝比例保持在10%、短枝数量保持在70%上下有利于维持矮化树势和产量[20]。本研究表明，中负载量（T3）的长枝（10.68%）、中枝（17.40%）、短枝（71.91%）占比及总枝梢量（16.25×10^5条•hm^{-2}）更能表现出优良的枝条比例和树体结构，并确保稳产丰产。

笔者通过对不同负载量各类枝梢生长动态的测定发现，除极低负载条件下长枝梢外，同一类型枝梢停止时间基本一致且不受负载量的影响，且各类枝梢停长时间与前人[21]报道一致。造成这一现象的原因可能是不同类型枝梢对积温的需求不同，长枝梢需求积温最大，中枝梢次之，短枝梢最少[22]。除极低负载条件下长梢外，其他负载条件下各类枝梢的停长时间主要还是受积温的调控，负载量对枝梢停长时间无影响。而极低负载条件下长枝梢持续生长，可能由于此种条件下虽然库限制解除，碳供应极为充分，但枝梢长度的增加限制了碳的外运，主要用于自身形态建成，此种条件下温度对生长的调控作用消失，具体的调控机制还需深入研究。

植物的光合能力是植物进行新陈代谢的基础，也是影响果实产量及品质的重要条件[23]。适量的负载可提高树体叶片的光合能力[24]。冉辛拓等[13]认为负载量和叶片光合速率呈极显著正相关。郭继英等[25]通过对巨峰葡萄的结果枝与营养枝研究发现，叶片同化物向果实的转移能力提升可促进叶片光合能力提升。笔者在本研究中发现，在盛花后90 d（果实膨大期）和120 d（果实成熟期）时中负载量净光合速率最大，而高负载量次之，说明负载量的增加可有效提高植物的光合能力，但当负载量过大时，反而会抑制其光合能力的升高，矮化中间砧苹果亦出现相似现象[12]。这可能是由于在果实膨大期和成熟期时地上和地下部会产生激烈的营养竞争，光合同化物运往果实，根系无法获得足够养分而产生“饥饿”，抑制矿质营养和水分的吸收，从而影响地上部叶片的营养水平，最终造成叶片光合能力的下降[24]。不同时期负载量对光合能力的影响并不一致，树体生长发育过程中结构及营养状况的改变也会影响不同负载量叶片光合能力的强弱。如本研究发现在果实成熟期时除极低负载量（T1）外，其他各负载量P_n均低于果实膨大期，其原因可能是果实成熟后，树体供应给果实的光合产物减少，使得叶片中的光合同化产物大量累积，从而产生“光合作用的末端产物抑制”效应而降低了叶片的光合能力[26]。因此，适宜的负载量可最大程度地提高叶片的光合能力及水分利用率以维持果实负载，保证果实产量和质量的平衡。

日光合变化曲线有单峰型、双峰型、平坦型和不规则型等多种类型[27]。本试验表明，南疆地区负载量差异会导致皇家嘎拉日光合P_n出现“单峰”和“双峰”2种曲线，这种现象可能由于强光和高温导致高负载量叶片光合系统损伤，使Rubisco等相关酶的活性降低，从而造成叶肉细胞的光合能力持续性的下降[28]。笔者发现光合日变化伴随明显的“光合午休”现象，根据本试验“光合午休”时气体交换参数趋势可知，P_n降低，G_s下降，C_i上升；说明产生“光合午休”现象可能是中午光合辐射强，温度高，叶片蒸腾失水率高，进而导致叶温升高，气孔闭合[29]。

果实品质是决定果树生产水平和经济效益的重要指标[30-31]。同已报道结果一致[5-9]，负载量越高，果实品质越差，单果质量、果实硬度越小，小果及残次果的比例越大。笔者进一步对果实纵、横径的周年动态变化研究后发现，果实动态生长曲线形状不受负载量的影响，且花后30 d内各处理动态曲线几乎相同，而30 d后各处理间增长幅度受负载量影响较

大，并导致最终果个大小的差异。这说明负载量对果实细胞分裂和细胞增大阶段的影响可能不同，需要进一步进行解剖学观察。目前，缺少负载量对果实大小分布及经济效益的比较分析。本文通过结合产量、果实大小分布及果实收购价格估算出当年经济效益，结果表明，高负载量并不具有最佳收益，而中等负载量具有最佳收益（20.19 万元•hm^{-2}）。对于苹果需要套袋的栽植区域，高负载量会进一步增加专用袋购买及套袋和摘袋的人工费用，降低收益。此外，高负载量虽然产生较为理想的收益，但会降低果实品质，影响树体的营养生长并削弱树势。低负载量虽能有效节省劳动力和资金的投入，但又会严重影响果园经济效益，而中等负载量果形端正，色泽艳丽，往往容易受到消费者的喜爱，并且可明显提高果园产量和收益。

4 结 论

综合不同负载量对苹果树体生长、光合、果实发育与品质形成的动态生长影响，除负载0.2 个•cm^{-2} 时长枝梢生长季内不停长外，负载量对同类枝梢长度及粗度的停长时间无显著影响。同时，年光合和日光合变化特征均受负载量调控的影响，负载量增加可显著提高叶片光合能力。南疆地区每平方厘米主干横截面积留果量4.4个左右有利于提高叶片光合能力及优良树体结构和枝类比例的形成，并有利于提升果实品质和收益。

参考文献 References：

[1] 陈学森，韩明玉，苏桂林，刘凤之，过国南，姜远茂，毛志泉，彭福田，束怀瑞 . 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报，2010，27(4)：598-604.
CHEN Xuesen，HAN Mingyu，SU Guilin，LIU Fengzhi，GUO Guonan，JIANG Yuanmao，MAO Zhiquan，PENG Futian，SHU Huairui. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China[J]. Journal of Fruit Science，2010，27(4)：598-604.

[2] 韩明玉 . 苹果矮砧集约栽培模式研究进展与下一步任务[J]. 西北园艺，2016(3)：4-6.
HAN Mingyu. Research progress and next task of apple dwarf anvil intensive cultivation model[J]. Northwest Horticulture，2016(3)：4-6.

[3] 马小龙，马豆豆，史继东，韩明玉，杨伟伟，张东 . 双主干并棒树形对矮化自根砧苹果幼树生长和结果的影响[J]. 园艺学报，2020，47(3)：541-550.
MA Xiaolong，MA Doudou，SHI Jidong，HAN Mingyu，YANG Weiwei，ZHANG Dong. Effect of bi-axis bibaum tree shape on growth and bearing of young apple tree on dwarf rootstock[J]. Acta Horticulturae Sinica，2020，47(3)：541-550.

[4] 孙宇 . 负载量对富士苹果地上部及根系生长的影响[D]. 保定：河北农业大学，2020.
SUN Yu. Effects of crop load on aerial and root growth in 'Fuji' apple[D]. Baoding：Hebei Agricultural University，2020.

[5] 薛晓敏，韩雪平，王来平，丛培建，聂佩显，王金政 . 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 Xiaomin，HAN Xueping，WANG Laiping，CONG Peijian，NIE Peixian，WANG Jinzheng. Effects of loading level on growth，photosynthesis，yield and quality of dwarf interstock apples[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2019，47(21)：202-206.

[6] 张新生，郝宝锋，陈湖，刘勇 . 负载量对沙地苹果品质及枝类组成的影响[J]. 河北果树，2002(5)：7.
ZHANG Xinsheng，HAO Baofeng，CHEN Hu，LIU Yong. Effect of load on apple quality and clump composition in sandy land[J]. Hebei Fruits，2002(5)：7.

[7] 宁万军，张强，黄闽敏，刘旭丽 . 不同负载量对新新 2 核桃树体营养、生长及果实品质的影响[J]. 果树学报，2021，38(9)：1550-1556.
NING Wanjun，ZHANG Qiang，HUANG Minmin，LIU Xuli. Effects of loading capacity on tree nutrition，growth and fruit quality in Xinxin 2 walnut[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(9)：1550-1556.

[8] 张秀美，王宏，张广仁 . 不同负载量对苹果'丽嘎拉/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 Xiumei，WANG Hong，ZHANG Guangren. Effects of different loadings on photosynthetic capacity and quality of apple 'Ligala/MM106' canopy[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2015，43(10)：218-220.

[9] 李宏建，王宏，刘志，于年文，宋哲，张秀美，里程辉 . '嘎拉'苹果不同留果量对枝类组成、果实品质和产量的影响[J]. 果树学报，2020，37(12)：1856-1864.
LI Hongjian，WANG Hong，LIU Zhi，YU Nianwen，SONG Zhe，ZHANG Xiumei，LI Chenghui. Effects of fruit load on the composition of branches，fruit quality and yield of 'Regal Gala' apple[J]. Journal of Fruit Science，2020，37(12)：1856-1864.

[10] 徐濛 . 不同叶果比对雪青梨果实品质及叶片特性的影响[D]. 保定：河北农业大学，2015.
XU Meng. Effects of different leaf-fruit ratio on fruit quality and leaf characteristics in 'Xueqing' pear[D]. Baoding：Hebei Agricultural University，2015.

[11] 李卫东，李绍华，吴本宏，杨建民，王红清 . 果实不同发育阶段去果对桃源叶光合作用的影响[J]. 中国农业科学，2005，38(3)：565-570.
LI Weidong，LI Shaohua，WU Benhong，YANG Jianmin，WANG Hongqing. Leaf photosynthesis in response to fruit thinning at different phenological stages of fruit development in peach trees[J]. Scientia Agricultura Sinica，2005，38(3)：565-570.

[12] 薛晓敏，韩雪平，陈汝，王来平，聂佩显，王金政 . 盛果期矮化中间砧'烟富 3 号'苹果适宜负载量的研究[J]. 中国果树，2020(1)：87-91.
XUE Xiaomin，HAN Xueping，CHEN Ru，WANG Laiping，NIE

Peixian，WANG Jinzheng. Study on the suitable load of dwarfing interstock ‘Yanfu 3’ apples in full fruit period[J]. China Fruits，2020(1)：87-91.

[13] 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 Xintuo，ZHANG Xinsheng. Effect of crop load on photosynthetic rate and dry matter production of apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2003，18(S1)：131-132.

[14] 丁宁，陈建明，丰艳广，沙建川，张民，姜远茂 . 矮化苹果负载量对氮素吸收、分配及利用的影响[J]. 园艺学报，2016，43(3)：147-154.
DING Ning，CHEN Jianming，FENG Yanguang，SHA Jianchuan，ZHANG Min，JIANG Yuanmao. Effects of fruit load on absorption，distribution and utilization in the dwarf apple[J]. Acta Horticulturae Sinica，2016，43(3)：147-154.

[15] 薛晓敏，王金政，聂佩显，陈汝，王来平 . 结果初期矮化中间砧苹果适宜负载量研究[J]. 北方农业学报，2017，45(4)：100-104.
XUE Xiaomin，WANG Jinzheng，NIE Peixian，CHEN Ru，WANG Laiping. Research of suitable load on dwarfing intermediate stock apple at beginning of fructification[J]. Journal of Northern Agriculture，2017，45(4)：100-104.

[16] 张秀美，王宏，刘志，于年文，李宏建，里程辉 . 岳阳红苹果矮化栽培与负载量关系研究[J]. 果树学报，2021，38(7)：1077-1083.
ZHANG Xiumei，WANG Hong，LIU Zhi，YU Nianwen，LI Hongjian，LI Chenghui. A study on the relationship between dwarfing cultivation and load of Yueyanghong apple[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(7)：1077-1083.

[17] 厉恩茂，赵德英，李敏，安秀红，李壮，程存刚 . 不同矮化中间砧‘嘎拉’苹果适宜负载量研究[J]. 中国果树，2019(6)：27-31.
LI Enmao，ZHAO Deying，LI Min，AN Xiuhong，LI Zhuang，CHENG Cungang. Research on suitable load of ‘Gala’ apple trees with different dwarfing intermediate stocks[J]. China Fruits，2019(6)：27-31.

[18] 张强，魏钦平，王小伟，尚志华，刘军，刘松忠，孙志鸿 . 乔砧富士苹果树冠枝梢数量和分布对产量与品质的影响[J]. 园艺学报，2010，37(8)：1205-1212.
ZHANG Qiang，WEI Qinping，WANG Xiaowei，SHANG Zhihua，LIU Jun，LIU Songzhong，SUN Zhihong. Effects of shoot numbers and distribution in canopy on yield and qualities of ‘Fuji’ apple with standard rootstock[J]. Acta Horticulturae Sinica，2010，37(8)：1205-1212.

[19] 董铁，王红平，孙文泰，尹晓宁，牛军强，刘兴禄，马明 . 不同矮化中间砧对‘长富 2 号’苹果生长特性、叶片生理及果实品质的影响[J]. 果树学报，2020，37(12)：1846-1855.
DONG Tie，WANG Hongping，SUN Wentai，YIN Xiaoning，NIU Junqiang，LIU Xinglu，MA Ming. Effects of different dwarfing interstocks on tree growth characteristics，leaf physiology and fruit quality of ‘Nagano Fuji No.2’ apple[J]. Journal of Fruit Science，2020，37(12)：1846-1855.

[20] 张强，魏钦平，刘松忠，王小伟，尚志华，路瑾瑾 . SH6 矮化中间砧富士苹果幼树至结果初期树冠结构、产量和品质的形成[J]. 中国农业科学，2013，46(9)：1874-1880.
ZHANG Qiang，WEI Qinping，LIU Songzhong，WANG Xiaowei，SHANG Zhihua，LU Jinjin. Formation of canopy structure，yield and fruit quality of ‘Fuji’ apple with SH6 dwarf interstock from juvenility to fruiting early stage[J]. Scientia Agricultura Sinica，2013，46(9)：1874-1880.

[21] 梁海忠，范崇辉，江道伟 . 不同树龄苹果高纺锤形树体结构及产量的研究[J]. 西北林学院学报，2011，26(4)：152-154.
LIANG Haizhong，FAN Chonghui，JIANG Daowei. Structure and yield of tall-spindle shaped apple trees with different ages[J]. Journal of Northwest Forestry University，2011，26(4)：152-154.

[22] CHEN D Y，PALLAS B，MARTINEZ S，WANG Y K，COSTES E. Neoformation and summer arrest are common sources of tree plasticity in response to water stress of apple cultivars[J]. Annals of Botany，2019，123(5)：877-890.

[23] MARCELIS L F M. Effects of sink demand on photosynthesis in cucumber[J]. Journal of Experimental Botany，1991，42(244)：1387-1392.

[24] 伍涛，陶书田，张虎平，宋跃，姚改芳，张绍铃 . 疏果对梨果实糖积累及叶片光合特性的影响[J]. 园艺学报，2011，38(11)：2041-2048.
WU Tao，TAO Shutian，ZHANG Huping，SONG Yue，YAO Gaifang，ZHANG Shaoling. Effects of fruit thinning on fruit sugar accumulation and leaf photosynthetic characteristics of pear[J]. Acta Horticulturae Sinica，2011，38(11)：2041-2048.

[25] 郭继英，严大义，王秉昆，郭勇，程桂红 . 巨峰群葡萄光合特性的研究[J]. 北京农业科学，1994(2)：30-32.
GUO Jiying，YAN Dayi，WANG Bingkun，GUO Yong，CHENG Guihong. Study on the photosynthetic characteristics of Jufeng group grape[J]. Beijing Agricultural Sciences，1994(2)：30-32.

[26] KASAI M. Regulation of leaf photosynthetic rate correlating with leaf carbohydrate status and activation state of Rubisco under a variety of photosynthetic source/sink balances[J]. Physiologia Plantarum，2008，134(1)：216-226.

[27] WANG X J，ZHANG B B，GUO S L，GUO L，CHEN X X，HE X，MA R J，YU M L. Effects of fruit load on photosynthetic characteristics of peach leaves and fruit quality[J]. Scientia Horticulturae，2022，299：110977.

[28] 张俊苗，李文胜，史进 . 短枝条红型‘红富士’苹果芽变光合特性的日变化研究[J]. 北方园艺，2016(6)：24-27.
ZHANG Junmiao，LI Wensheng，SHI Jin. Diurnal changes in photosynthetic characteristics of short-branched red ‘Red Fuji’ apple buds[J]. Northern Horticulture，2016(6)：24-27.

[29] YANG X H，CHEN L S，CHENG L L. Leaf photosynthesis and carbon metabolism adapt to crop load in ‘Gala’ apple trees[J]. Horticulturae，2021，7(3)：47.

[30] 张琦，何天明，冯建菊，陈敬峰 . 香梨树冠内的光照分布及其对果实品质的影响[J]. 落叶果树，2001，33(3)：1-3.
ZHANG Qi，HE Tianming，FENG Jianju，CHEN Jingfeng. Light distribution in the crown of pear variety Xiangli and influence on fruit quality[J]. Deciduous Fruits，2001，33(3)：1-3.

[31] 苏丹，胡明文，蓬桂华，朱文超，廖芳芳，宋拉拉 . 种植密度对辣椒 DU01 光合特性及产量的影响[J]. 中国瓜菜，2022，35(2)：67-71.
SU Dan，HU Mingwen，PENG Guihua，ZHU Wenchao，LIAO Fangfang，SONG Lala. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and yield of pepper cultivar DU01[J]. China Cucurbits and Vegetables，2022，35(2)：67-71.