

修剪对新疆核桃冠层微环境、枝组 重构及坚果品质的影响

韩立群, 赵 钰, 赵国庆, 张 辉, 马 凯*

(新疆维吾尔自治区农业科学院果蔬研究所·农业农村部新疆地区果树科学观测试验站, 乌鲁木齐 830091)

摘 要:【目的】研究不同修剪措施对核桃冠层微环境、枝组重构以及坚果品质的影响, 探索新疆核桃适宜的高效修剪模式。【方法】以15年生新丰核桃树为材料, 设置机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪3种模式, 测定冠层的光照度、光合参数等指标; 统计1年生结果枝混合芽数量; 调查产量和坚果品质等。【结果】修剪后, 核桃树冠层的相对湿度降低, 光照度、光合作用能力提升; 坐果数以及新形成的结果枝和混合芽数量显著增加, 混合芽中生长促进激素GA₃和IAA含量提高; 单果质量显著升高, 空壳瘪仁率降至4.3%, 粗脂肪和粗蛋白含量明显增加, 可溶性糖含量升高17.9%~42.7%。3种修剪模式比较的结果表明, 机械+人工辅助修剪是综合评价最优的修剪模式。【结论】修剪能显著改善核桃冠层的微环境, 促进1年生结果枝的重构和坚果品质的提升, 针对新疆成龄核桃树采用修剪机械并辅助简约的人工农艺措施是经济高效的修剪模式。

关键词:新疆核桃; 修剪; 微环境; 1年生结果枝; 坚果品质

中图分类号: S664.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2025)08-1757-16

Effects of pruning on canopy microenvironment, branch composition and nut quality in Xinjiang walnut

HAN Liqun, ZHAO Yu, ZHAO Guoqing, ZHANG Hui, MA Kai*

(Fruit and Vegetable Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Xinjiang Fruit Science Observation and Experiment Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, Xinjiang, China)

Abstract: 【Objective】Pruning is a crucial aspect in fruit cultivation management. The suitable pruning can enhance ventilation and light penetration within the canopy, improve photosynthetic capacity and light energy utilization efficiency, thereby establishing a better balance between vegetative and reproductive growth, and ultimately increasing the fruit quality. For the tall arboreal trees like walnut, adopting efficient and simple pruning method can significantly reduce production costs and enhance economic benefits. The aim of this study was to examine the effects of different pruning models on canopy microenvironment, branch composition and nut quality in walnut, and investigate the suitable and efficient pruning model for Xinjiang walnut trees. 【Methods】The 15-year-old Xinfeng trees, primary walnut cultivar in Xinjiang, were taken as the experimental materials. Three models including mechanical pruning, mechanical and manual-assisted pruning, and manual pruning were adopted, with unpruned trees as the control. Parameters such as canopy temperature, relative humidity, light intensity, photosynthetic capacity, photosynthetically active radiation and chlorophyll content (SPAD) were measured. The number of mixed buds, fruit settings, newly developed bearing branches and mixed buds were quantified. The contents of endogenous hormones in the mixed buds were determined by the enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). The plant yield, nut count, nut weight, and rates of empty and shriveled nuts

收稿日期: 2025-04-10

接受日期: 2025-05-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区公益性项目(KY2022038); 国家重点研发计划项目(2022YFD1000102)

作者简介: 韩立群, 男, 副研究员, 博士, 研究方向为核桃资源育种与高效栽培。E-mail: hanlq1983@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: sunshine002mk@163.com

were recorded during the fruit harvest period. Additionally, the kernel quality parameters including crude fat, crude protein and soluble sugar contents were tested. The parameter indicators were analyzed through clustering and correlation methods. The quantitatively comprehensive method was adopted to evaluate the different pruning models based on the AHP-CRITIC combination weight methods and the TOPSIS model. **【Results】** After pruning, the height and crown width of walnut trees were reduced, and ventilation and light penetration were improved. The relative humidity of canopy decreased, while light intensity, photosynthetic capacity, and the SPAD values of leaves increased, and the net photosynthetic rate and photosynthetically active radiation were significantly enhanced, which collectively enhanced the microenvironment. Photosynthesis is the foundation of walnut growth. Through pruning, light could be utilized more efficiently, which influenced the growth and development of leaves and branches, and ultimately shaped the formation of fruit quality. The results showed the net photosynthetic rate within the canopy exhibited an increasing gradient from the inner canopy to the outer, the mechanical and manual-assisted pruning was higher across all canopy zones compared to other pruning methods. The annual bearing branches and flower buds are critical for the formation of yield and quality. Pruning optimized light utilization and influenced the growth of annual bearing branches. The total number of mixed buds and female flowers in the selected annual bearing branches did not differ significantly among the pruning models. However, the number of fruit set, and newly formed bearing branches and mixed buds increased significantly. Specifically, the mechanical and manual-assisted pruning produced the highest number of new annual branches, and the manual pruning generated the most mixed buds. Additionally, the pruning promoted the accumulations of growth-promoting hormones, such as GA₃ and IAA, with the highest levels observed in mixed buds under the mechanical and manual-assisted pruning and manual pruning, respectively. Conversely, the growth-inhibiting hormone ABA decreased, and showed significant reductions in apical buds under manual pruning condition and lateral buds under mechanical and manual-assisted pruning conditions. Yield and nut quality are the most critical indicators for evaluating the rationality of pruning models in the fruit tree. The pruning can also establish physiological balance between vegetative growth and reproductive capacity, helping to maintain tree structure and improve nut quality. This study revealed that while pruning reduced the yield per plant, it significantly increased the nut weight and reduced the rates of empty and shriveled nuts with the lowest 4.3% in mechanical and manual-assisted pruning. Furthermore, pruning enhanced kernel quality, with significant increase in crude fat, crude protein, and soluble sugar contents from 17.9% to 42.7%. Among the three pruning models, the mechanical and manual-assisted pruning led to substantial improvements in nut quality, and the yield per plant could recover rapidly. Cluster analysis of the measured parameters revealed distinct groupings based on the different pruning methods. Negative indicators such as ABA, yield per plant, nut numbers and the rates of empty and shriveled nuts were clustered, while other parameters formed another. Correlation analysis further indicated that microenvironmental indicators were positively correlated with the numbers of annual fruiting branches, mixed buds, and nut quality traits. Pruning reduced the number of branches, leading to a temporary decline in yield per plant. However, yield could quickly recover through the changes of canopy microenvironment conditions. Based on the comprehensive evaluation, mechanical and manual-assisted pruning emerged as the optimal pruning model. **【Conclusion】** Pruning significantly enhanced the canopy microenvironment, facilitated the reconstruction of annual bearing branches, and improved the nut quality of walnut. The integration of pruning machinery with simplified manual agronomic practices for mature walnut trees in Xinjiang represents an economically viable and highly efficient pruning model.

Key words: Xinjiang walnut; Pruning; Microenvironment; Annual bearing branch; Nut quality

核桃(*Juglans regia* L.)是中国重要的坚果和经济树种之一,其核仁营养丰富,富含脂肪和蛋白质等成分,是优良的食用油以及其他多种食品的重要制作原料^[1]。在国家大力推动木本粮油发展的背景下,核桃产业具有较好的种植前景。新疆南疆地区光热资源丰富,具有适合核桃生长发育的气候、土壤、灌溉、交通等优越条件,非常适合规模化、机械化、标准化生产,是中国商品核桃的最适栽培区域之一^[2-3]。然而,目前新疆核桃园普遍存在着管理粗放、整形修剪不到位的情况,造成通风透光差,内膛空虚、结果部位外移,枝条层次不清,产量低、空壳瘪仁率高等问题^[4-5]。修剪是核桃栽培过程中的重要环节,作为高大乔木树种,核桃树进入结果期后,树冠迅速扩大,必须进行修剪管理。修剪能够平衡营养生长和生殖生长的关系,控制树势,改善冠层的微环境,增加光照及促进空气的流动,提高叶片的光合能力,促进光能利用,促进芽、花、枝条的生长发育,是决定果园产量和果实质量高低的关键因素^[6-7]。张翔等^[8]研究山核桃不同修剪模式的结果表明,通过冠层枝条量的变化,提高了结果枝的萌芽率,促进了新果枝的形成。另外,修剪去除了多余的枝条及花芽,也能提升坚果品质^[9-10]。

核桃成龄树树体高大,传统的人工修剪模式费时费工、劳动强度大。为了降低劳动力成本并提高果树的修剪效率,世界各地研究人员研发了高效省力的机械修剪工具和修剪技术^[11-13]。20世纪50年代,美国Moore^[14]研制了锯盘式果树修剪机,实现了柠檬、葡萄等单侧的修剪。澳大利亚Spagnolo^[15]研发了回转式圆盘刀具的果树修剪机,可实现对葡萄藤蔓的顶部和侧部修剪。英国研究者Martí等^[16]设计了一种圆盘锯修剪机,可以完成果树不同树形的修剪作业。沈晓贺等^[17]设计了一种圆盘式核桃树修剪机,经过修剪后,核桃树冠通风透光条件改善,坚果质量得到提升。采用效率高、成本低、操作简便的修剪模式既可以节省劳动力,也可以形成统一树形,便于核桃的集约化、标准化管理。随着劳动力成本的不断上升,修剪机械化将会是新疆核桃产业高质量发展的必然要求。修剪会改变核桃冠层的微环境,影响结果枝的生长发育以及坚果品质等,但是相关研究还很少,不能很好地指导新疆核桃树的修剪管理。因此,笔者在本研究中以培养核桃高光效、简约化丰产树形为目标,拟采用不同的修剪模式,研究

其对核桃冠层的微环境、1年生结果枝组重构以及坚果品质等的影响,为新疆核桃树的简约、高效修剪提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

样地选择在新疆核桃主产区新疆喀什地区叶城县巴仁乡阿亚克巴仁(8)村(37.85°N, 77.57°E),海拔1300 m,年降水量53.2 mm左右,为绿洲果园。试验地核桃栽培品种为新丰,树龄15 a(年),树形为疏散分层形,东西行向种植,株行距为6.0 m×8.0 m,树体高度9.0~11.5 m,胸径19.9~21.6 cm,冠幅(6.5~7.0) m×(7.0~7.5) m(东西×南北)。栽培土壤为壤砂土,灌溉方式为漫灌,行间自然生草。

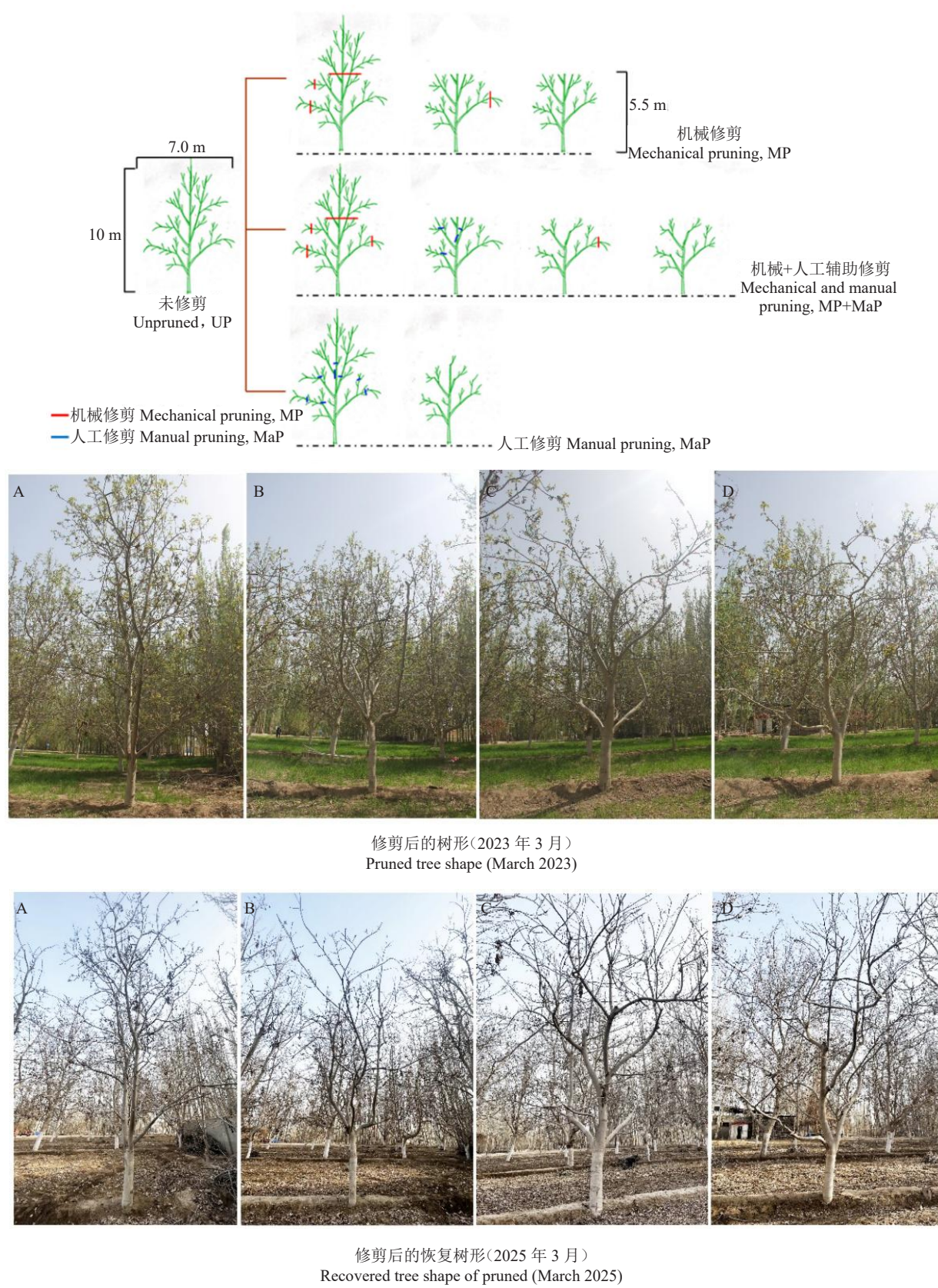
1.2 试验设计

修剪于2023年3月10—15日进行。设定4种修剪模式:处理1(UP),未修剪;处理2(MP),机械修剪:采用圆盘式修剪机对树冠落头至5.0~5.5 m,株间回缩至有1.0 m的通风带,第1年只进行落头和行向的单侧修剪,次年春季萌芽前进行行向另一侧的修剪;处理3(MP+MaP),机械+人工辅助修剪:采用圆盘式修剪机对树冠落头至5.0~5.5 m,株间回缩至有1.0 m的通风带,其中机械修剪第1年进行落头和行向的单侧修剪,再进行人工疏除或回缩内膛过密的3年生以上骨干枝,次年春季萌芽前进行行向另一侧的修剪;处理4(MaP),人工修剪:采用人工操作,根据树形,回缩主干,疏除或回缩3年生以上的骨干枝,使树体高度保持在5.0~5.5 m,株间有1.0 m的通风带(图1、表1)。以树干为中心,参照谢辉等^[18]的方法,根据树冠距主干距离设定Zone 1(距树干0~1.0 m)、Zone 2(距树干1.0~2.0 m)和Zone 3(距树干2.0~3.0 m)3个区域,同时根据冠层高度分成上、下两层。选择长势一致的3株树进行测定分析。

1.3 试验方法

1.3.1 冠层微环境测定 冠层温湿度及光照度:于核桃树冠郁闭期(7月1—5日),选择晴朗无风的天气,使用彭云pywl-001温湿度自动记录仪,观测冠层的温度、相对湿度与光照度等参数。采集时间为09:00—21:00,每10 min采集1次数据。

冠层光谱指标:使用UniSpec-SC单通道便携式光谱测定仪,在已测过温湿度及光照的区域进行环境光谱组成测定,包括总辐射(total radiation, TR)、



A. 未修剪;B. 机械修剪;C. 机械+人工辅助修剪;D. 人工修剪。下同。
A. Unpruned, UP; B. Mechanical pruning, MP; C. Mechanical and manual pruning, MP+MaP; D. Manual pruning, MaP. The same below.

图 1 核桃树的 4 种修剪模式
Fig. 1 Four pruning models of walnut trees

表1 修剪后核桃树体基本参数

Table 1 The parameters of walnut after pruning in different models

修剪模式 Pruning model	株号 Plant number	树高 Tree height/m	干高 Pole height/m	胸径 Basal diameter/cm	冠幅(东西×南北) Crown width (east-west × north-south)/m	冠层高度 Canopy height/m	主枝数量(>5年生) Number of main branches (>5 years old)	侧枝数量(3~5年生) Number of lateral branches (3-5 years old)
UP	1	10.5	1.21	21.02	7.2×7.4	9.29	7	17
	2	9.5	1.18	20.38	7.0×7.2	8.32	6	13
	3	10.0	1.11	22.62	6.6×7.2	8.89	8	15
MP	1	5.4	1.22	20.00	5.3×6.2	4.18	5	10
	2	5.5	1.18	20.70	5.1×5.8	4.32	4	8
	3	5.3	1.17	20.25	5.2×5.8	4.13	4	8
MP+MaP	1	5.4	1.12	20.38	5.0×6.0	4.18	6	11
	2	5.4	1.15	21.34	5.2×6.0	4.32	5	8
	3	5.5	1.02	20.45	4.8×5.8	4.13	5	10
MaP	1	5.5	1.20	19.85	5.7×6.2	4.28	6	10
	2	5.5	1.23	20.70	5.5×6.5	4.25	5	9
	3	5.3	1.12	20.22	5.5×6.7	4.48	5	8

光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)及近红外和远红外等参数。

叶片光合参数:使用 CIRAS-3 便携式光合仪(美国, PP Systems 公司),分别选择树冠 Zone 1、Zone 2、Zone 3 区域发育良好的枝条上复叶各 10 枚,测定顶叶下第一对单叶的净光合速率 P_n (net photosynthetic rate)、气孔导度 G_s (stomatal conductance)、胞间 CO_2 浓度 C_i (intercelluar CO_2 concentration)和蒸腾速率 T_r (transpiration)等光合参数。连续测定 3 d。

叶片 SPAD 值:使用 SPAD-502 Plus 手持植物叶绿素检测仪,在已测定过光合参数的样本叶片上测定叶绿素相对含量,即 SPAD 值。

1.3.2 1 年生枝重构测定 1 年生枝及混合芽统计:核桃萌芽前(3 月 21—25 日),每个分区随机选取长度 10~30 cm、生长良好的 1 年生结果枝各 5 个,采用目测方法,统计枝条上总芽、混合芽数量,花期统计雌花数,果实采收期统计坐果率,休眠期统计发枝数及新发结果枝上的混合芽数量。

混合芽的内源激素含量测定:在核桃混合芽生理分化完成(10 月 10 日),采取冠层 1 年生结果枝的顶芽及顶芽下 1~3 个侧芽,迅速放入液氮速冻,使用干冰保冷并带回实验室,用于赤霉素(gibberellin 3, GA_3)、生长素(ndole-3-acetic acid, IAA)、玉米素(zeatin, ZT)和脱落酸(abscisic acid, ABA)内源激素含量测定。使用上海酶联生物科技有限公司的试剂盒,参照试剂盒说明书,采用酶联免疫吸附测定法(ELISA)测定内源激素含量。

1.3.3 单株产量和坚果品质测定 在果实成熟期,收集供测试核桃树的所有果实,统计单株产量及果实数量。在不同方位分别选取 100 个坚果,参照《核桃种质资源性状描述规范和数据标准》^[19]的方法测定单果质量及空壳瘪仁率。采用索氏抽提法测定粗脂肪含量,采用凯氏定氮法测定粗蛋白含量,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,均使用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒进行测定,方法参照试剂盒说明书。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件对数据进行整理及方差分析,其中单因素方差分析以最小显著差异检验($P<0.05$),采用 Excel 2021 和 OriginPro 2024 软件作图。参照周罕觅等^[20]的方法,通过 Rstudio(R version 4.4.1)软件,采用 AHP 层次分析法确定各评价指标的主观权重,首先将负向指标(单株产量、单株果数、空壳瘪仁率、ABA 含量、修剪成本)和正向指标(除负向指标外的所有指标)进行归一化处理,进而通过 1~9 标度法,根据各评价指标对坚果品质影响的重要程度,构建判断矩阵。采用 CRITIC 法确定各评价指标的客观权重,得到主观和客观的组合权重。最后参照文献中的描述,采用 TOPSIS 算法对不同修剪模式进行综合评价,得出各修剪模式的优劣排序。

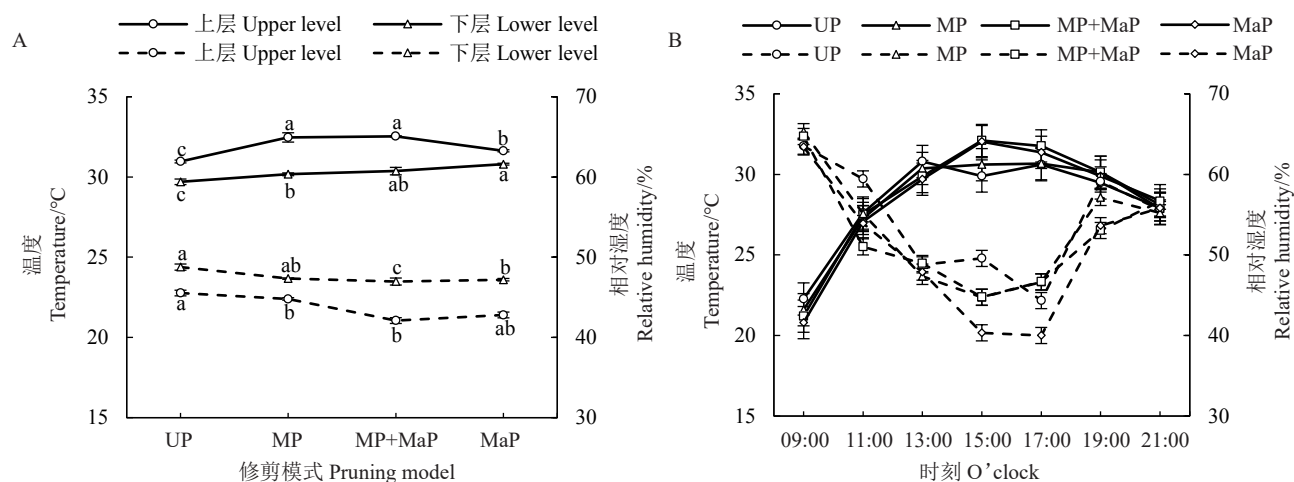
2 结果与分析

2.1 不同修剪模式对核桃树体微环境的影响

2.1.1 对冠层温度及相对湿度的影响 研究结果

(图2)表明,冠层上部区域的温度均高于下部区域,而湿度则低于下部区域。3种修剪方式处理后树体冠层下部区域的温度均高于未修剪,且差异显著,人工修剪温度最高,平均为32.5℃;修剪后冠层下部区域的相对湿度均低于未修剪,机械+人工辅助修

剪和人工修剪均与未修剪差异显著,机械+人工辅助修剪相对湿度最低,平均为42.8%。温度日变化比较,修剪后冠层下部区域的温度到13:00以后上升较明显,并开始高于未修剪,均在15:00左右达到峰值;而修剪后相对湿度的日变化,基本均低于未修



实线表示温度数据,虚线表示相对湿度数据。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

The solid line represents temperature data, the dashed line represents relative humidity data. Different small letters represent significant difference ($P<0.05$). The same below.

图2 不同修剪模式下冠层温湿度的差异

Fig. 2 Differences in temperature, humidity of canopy with different pruning models

剪,均在15:00左右最低。

2.1.2 对冠层光照度的影响 冠层上部区域光照度显著高于下层,不同修剪模式的上层区域光照度均差异不显著,而下层区域修剪后均和未修剪差异显著,机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪分别比未修剪增加46.7%、56.2%和65.8%(图3)。不同

修剪模式的光照度日变化差异较明显,未修剪模式的光照度始终保持较低水平;机械+人工辅助修剪后的冠层光照度变化起伏较大,在09:00—13:00和未修剪差异不明显,随后急剧上升,在17:00达到最高峰,为67 067 lx;机械修剪模式的光照度变化起伏较大,在11:00和17:00分别出现峰值,为35 600 lx和

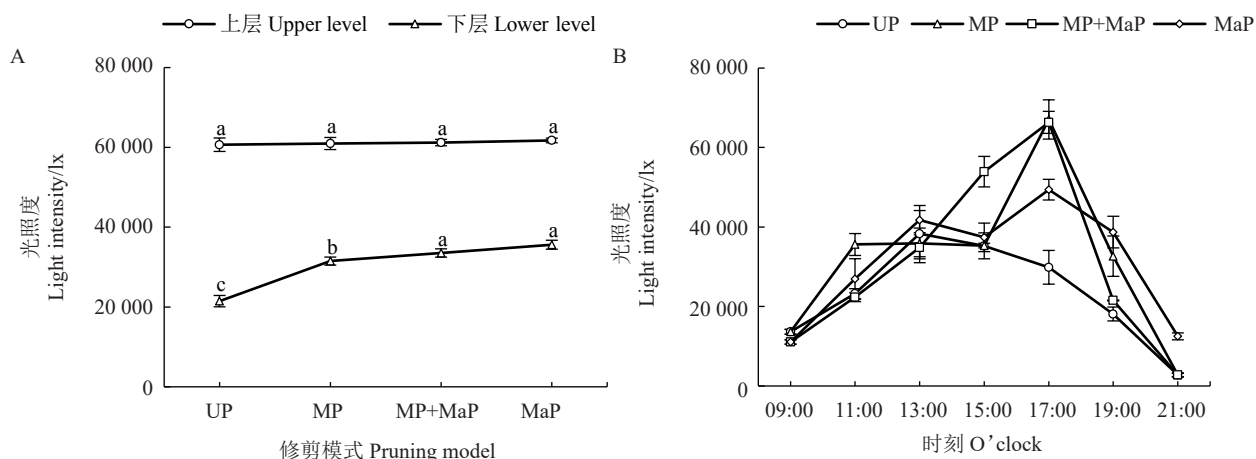


图3 不同修剪模式下冠层光照度的差异

Fig. 3 Differences in light intensity of canopy with different pruning models

66 330 lx;人工修剪模式冠层光照度变化较稳定,始终高于未修剪(图3)。

2.1.3 对冠层光环境的影响 修剪后,冠层区域的光辐射明显提升(表2)。不同修剪模式下310~1130 nm波长的总辐射、光合有效辐射、近红外以及远红外比较,均为人工修剪>机械+人工辅助修剪>机械修剪>未修剪,而且由树冠的外围到内膛递减。与未修剪相比,人工修剪、机械+人工辅助修剪、机械修剪的冠层总辐射和光合有效辐射平均分别增加22.04%和27.65%、64.21%和66.89%、69.19%和72.23%,其中人工修剪模式的冠层Zone 3区域的总辐射、光合有效辐射及近红外和远红外值最高,机械+人工辅助修剪模式Zone 3区域次之。

表2 不同修剪模式下冠层光质变化

Table 2 Spectrogram distribution of canopy with different pruning models (10000 Bit)

修剪模式 Pruning model	冠层区域 Canopy area	总辐射 Total radiation (310~1130 nm)	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (380~710 nm)	近红外 Near infrared (710~760 nm)	远红外 Far infrared (760~1130 nm)
UP	Zone 1	56.83±5.29 g	9.68±0.96 g	30.22±2.77 e	16.03±1.61 g
	Zone 2	61.69±5.53 fg	10.57±0.95 fg	32.49±2.62 e	17.70±1.97 fg
	Zone 3	68.36±4.17 efg	11.76±0.76 efg	35.53±2.13 de	20.10±1.61 efg
MP	Zone 1	70.77±3.57 efg	12.87±0.68 def	40.24±2.05 cd	16.81±0.91 fg
	Zone 2	75.50±5.65 def	13.55±1.01 de	41.76±2.88 bc	19.29±2.15 fg
	Zone 3	81.78±4.66 cde	14.44±0.84 cd	43.77±2.55 bc	22.64±0.74 ef
MP+MaP	Zone 1	90.24±1.10 bcd	16.44±0.12 bc	49.69±0.24 ab	23.19±0.82 def
	Zone 2	102.28±4.61 ab	17.78±0.87 ab	51.63±2.22 a	31.81±1.84 bc
	Zone 3	114.36±8.64 a	19.20±1.26 a	56.40±4.41 a	37.15±4.58 ab
MaP	Zone 2	95.27±2.23 bc	17.06±0.32 ab	51.04±0.49 ab	26.24±1.78 cde
	Zone 2	103.27±2.84 ab	18.43±0.39 ab	54.57±0.97 a	29.25±2.21 cd
	Zone 3	117.64±6.35 a	19.64±1.39 a	56.16±1.92 a	40.63±3.70 a

2.1.4 对冠层叶片光合参数及SPAD值的影响 修剪后,叶片的净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)均显著高于未修剪,且表现出自树冠内膛到外围递升的趋势,其中机械+人工辅助修剪模式各区域的净光合速率和气孔导度均高于其他修剪模式,在Zone 3区域表现最高,分别达到 $10.37\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.43\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别是未修剪的1.15倍和4.20倍(图4-A~B)。不同修剪模式冠层叶片的胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)差异较不明显,但均显著高于未修剪,均在Zone 1区域与未修剪差异显著(图4-C~D)。

随着冠层的外移,叶片的SPAD值逐渐增加,在树冠内膛Zone 1区域,修剪后的核桃叶片SPAD值均显著大于未修剪;在Zone 2区域,除人工修剪外,其他修剪模式和未修剪差异不显著;而在Zone 3外围区域,各修剪模式均无显著差异。不同冠层区域比较,人工修剪模式叶片的SPAD值始终最高,最高平均为45.3(图4-E)。

2.2 不同修剪模式对核桃1年生结果枝组重构的影响

2.2.1 对1年生结果枝和混合芽形成的影响 不同修剪模式分别选定的1年生枝条在总芽、混合芽及形成的雌花数量方面差异不明显,总芽数、混合芽数和雌花数分别在244~259个、87~100个和98~103个之间。修剪后统计的坐果数、新发枝数及新形成的混合芽数量明显增加,其中未修剪、机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪坐果比分别为54.37%、77.22%、78.00%和78.57%;与未修剪相比,机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪的新发枝和新形成的混合芽数量增加显著,分别增加26.79%和38.49%、50.00%和43.25%、32.14%和51.59%(表3)。

2.2.2 对混合芽中激素含量的影响 核桃混合芽中 GA_3 、IAA、ZT和ABA的含量测定结果(图5)表明,不同修剪模式比较,顶芽中机械修剪的 GA_3 含量最高,侧芽中机械+人工辅助修剪的 GA_3 含量(w,后

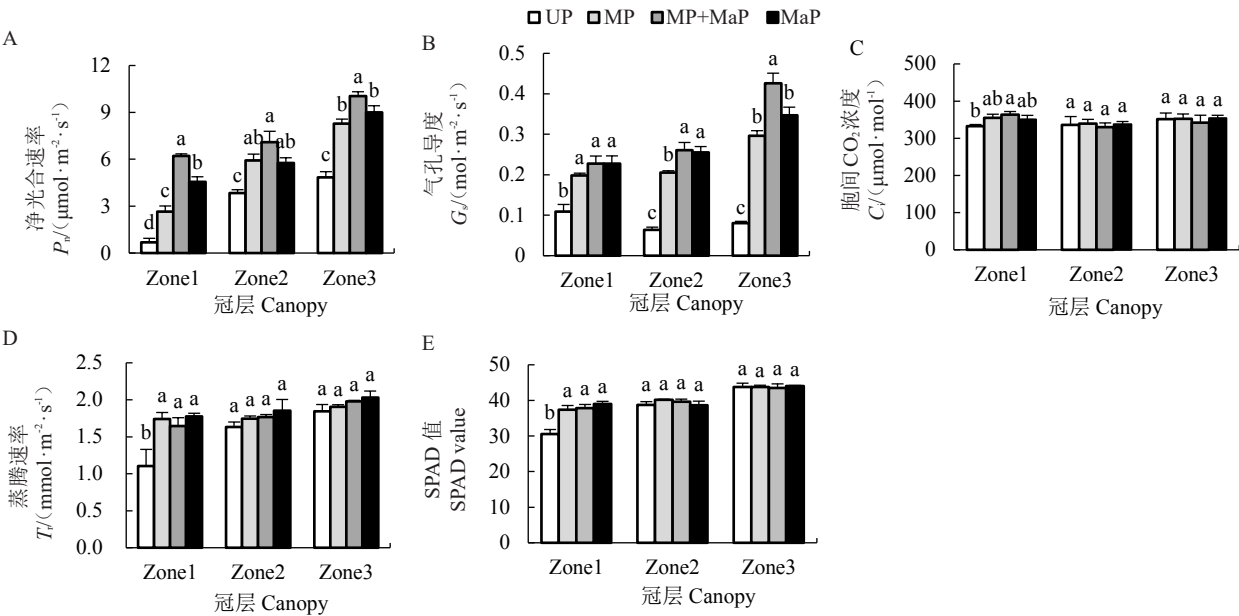


图 4 不同修剪模式下叶片光合参数和 SPAD 值的差异

Fig. 4 Differences in photosynthetic parameters and SPAD value of leaves with different pruning models

表 3 不同修剪模式下 1 年生枝条生长及成花数的差异

Table 3 Differences of annual branches growth and flowering with different pruning models

修剪模式 Pruning model	冠层分布 Canopy distribution	总芽数 Total buds	混合芽数 Mixed buds	雌花数 Female flowers	坐果数 Fruit settings	新发枝数 New branches	新混合芽数 New mixed buds
UP	Zone 1	81	29	33	16	15	74
	Zone 2	79	29	33	19	18	85
	Zone 3	87	30	37	20	22	95
	合计 Total	247 ab	87 a	103 a	56 b	56 c	252 c
MP	Zone 1	79	31	31	25	20	107
	Zone 2	82	29	33	25	22	116
	Zone 3	98	30	37	28	28	126
	合计 Total	259 a	89 a	101 a	78 a	71 b	349 b
MP+MaP	Zone 1	84	32	36	28	26	99
	Zone 2	84	34	31	26	29	128
	Zone 3	80	34	33	25	28	135
	合计 Total	247 ab	100 a	100 a	78 a	84 a	361 b
MaP	Zone 1	86	27	33	25	23	127
	Zone 2	74	31	29	23	24	123
	Zone 3	84	31	35	28	27	132
	合计 Total	244 b	89 a	98 a	77 a	74 b	382 a

同)最高,分别为1 171.81 ng·g⁻¹和1 276.88 ng·g⁻¹。顶芽的 IAA 平均含量为人工修剪模式最高,侧芽中的 IAA 平均含量为机械+人工辅助修剪模式最高,分别为 54.63 ng·g⁻¹和 51.26 ng·g⁻¹,均与其他修剪模式差异显著。顶芽和侧芽的 ZR 平均含量均在机械+人工辅助修剪模式中最高,为 40.01 ng·g⁻¹和 46.67 ng·g⁻¹,其中侧芽中的含量与其他修剪模式差

异显著。1 年生结果枝的顶芽和侧芽中 ABA 含量均为未修剪最高,人工修剪最低。

2.3 不同修剪模式对核桃产量和果实品质的影响

2.3.1 对单株产量的影响 如图 6 所示,修剪后当年的平均单株产量和平均单株果数均显著降低,机械+人工辅助修剪下降最为显著,分别为未修剪的 53.7%和 41.6%。修剪后的第 2 年,未修剪核桃树的

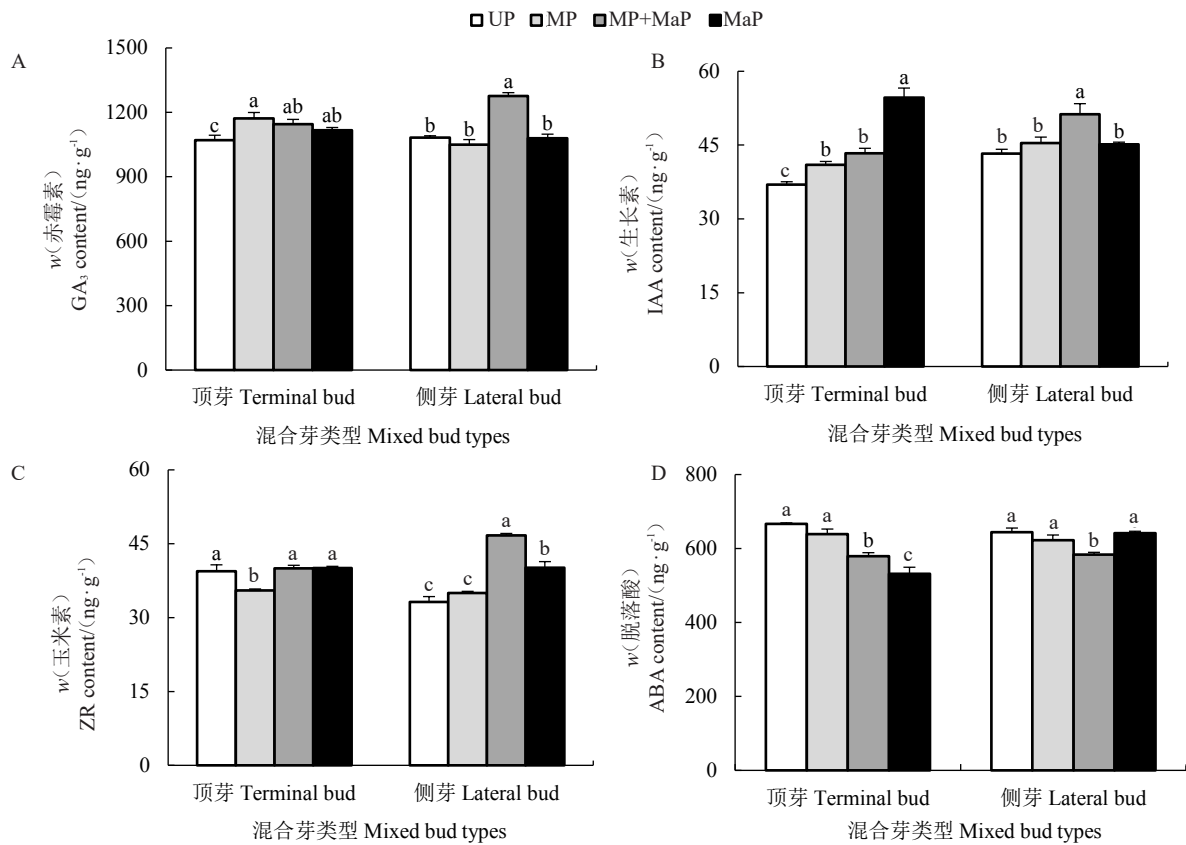


图5 不同修剪模式下混合芽中激素含量的差异

Fig. 5 Differences in the contents of hormones of mixed buds with different pruning models

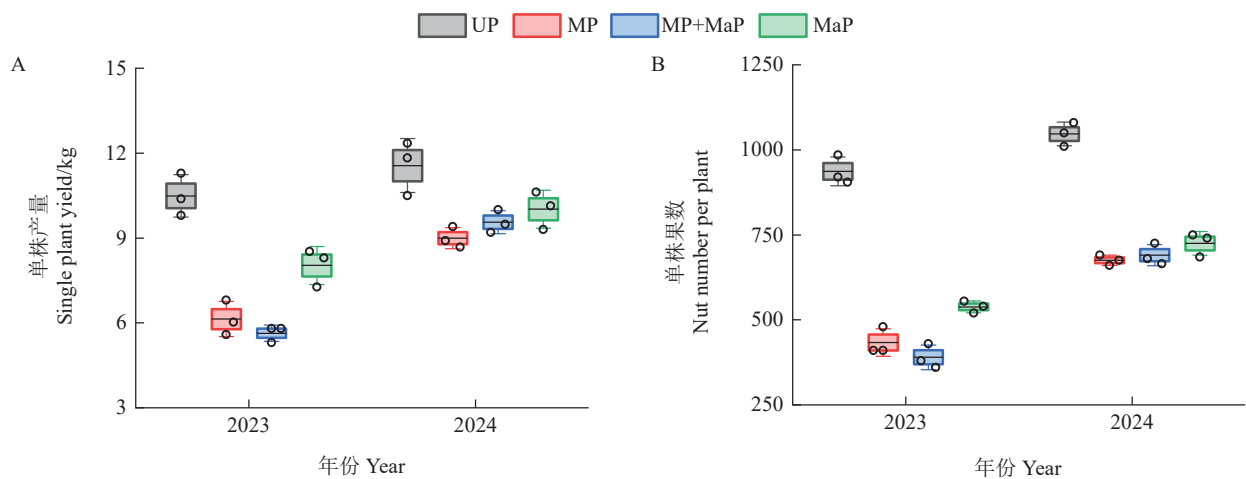


图6 不同修剪模式下单株产量与单株果数的差异

Fig. 6 Differences in per plant yield and nut number with different pruning models

单株产量和单株果数变化不明显,而修剪后的单株产量和单株果数较上一年度明显增加,机械+人工辅助修剪和人工修剪的单株产量与未修剪相比较,差异不显著。

2.3.2 对坚果品质的影响 修剪后坚果的单果质量均显著提高,其中机械+人工辅助修剪的平均单果

质量最高,为未修剪的1.26倍(图7-A);修剪后坚果空壳瘪仁率也显著降低,未修剪的核桃树坚果空壳瘪仁率达到34.1%,而修剪后的核桃树坚果空壳瘪仁率均在9%以下,机械+人工辅助修剪最低,为6.3%(图7-B)。修剪后的第2年坚果空壳瘪仁率持续降低,机械+人工辅助修剪最低为4.3%,坚果品质

改善明显,而未修剪核桃树坚果的单果质量和空壳瘪仁率变化不明显,瘪仁率为33.1%(图 7-B)。核仁的内在品质测定发现,修剪后粗脂肪、粗蛋白和可溶性糖含量均发生显著变化。与未修剪比较,机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪的粗脂肪和粗蛋白含量分别增加 10.4%和 8.3%、11.6%和 15.5%、10.4%和 19.0%;可溶性糖含量变化最大,分别提高

了 17.9%、32.1%和 42.7%(图 7-C~E)。修剪第 2 年(2024 年),未修剪核桃树的核仁粗脂肪、粗蛋白及可溶性糖含量仍然较低,而修剪后的核桃树保持较高水平,其中机械+人工辅助修剪和人工修剪的粗脂肪、粗蛋白、可溶性糖含量变化显著,分别比未修剪增加 18.5%和 17.7%、29.6%和 28.2%、24.3%和 24.5%(图 7-C~E)。

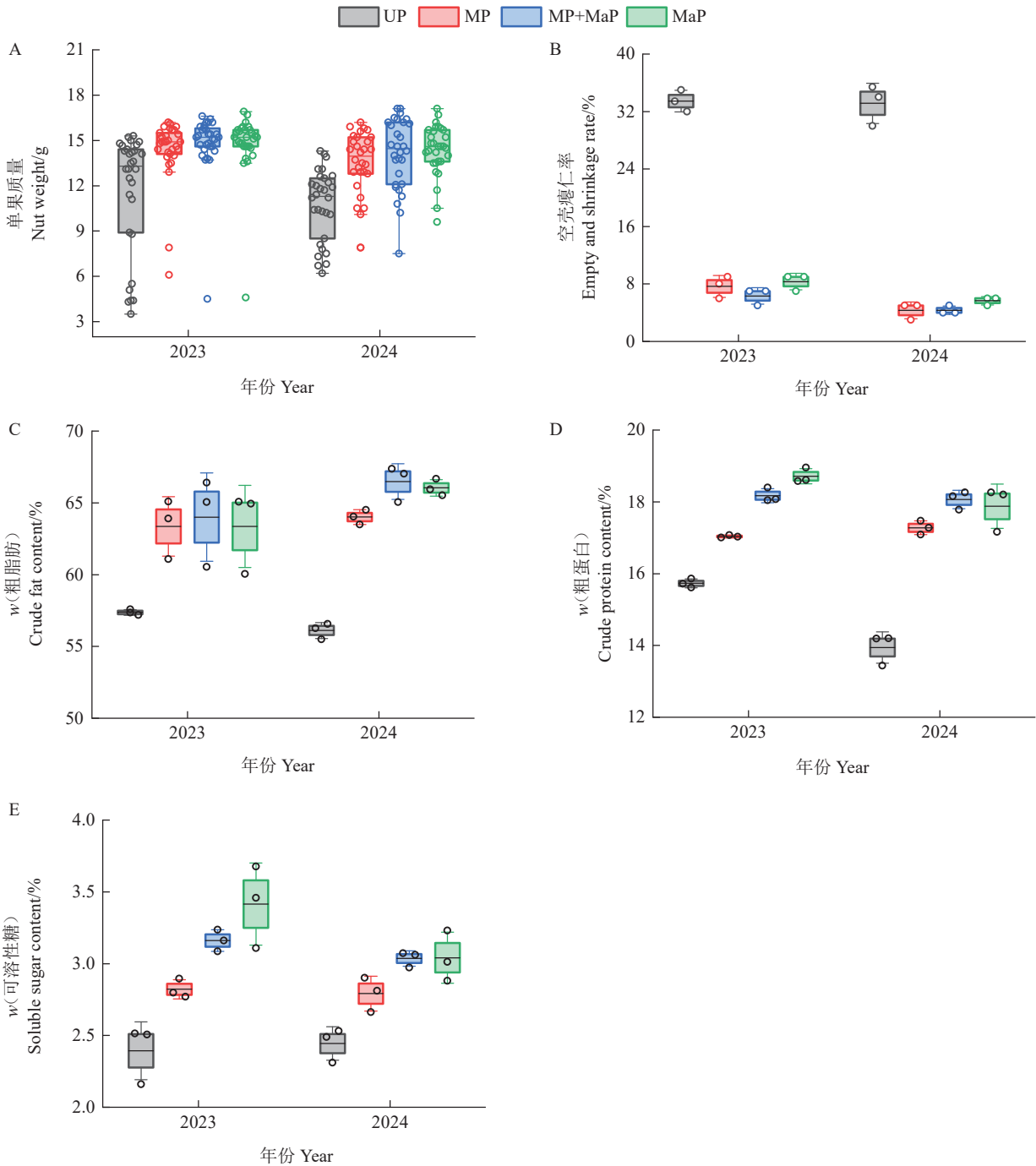
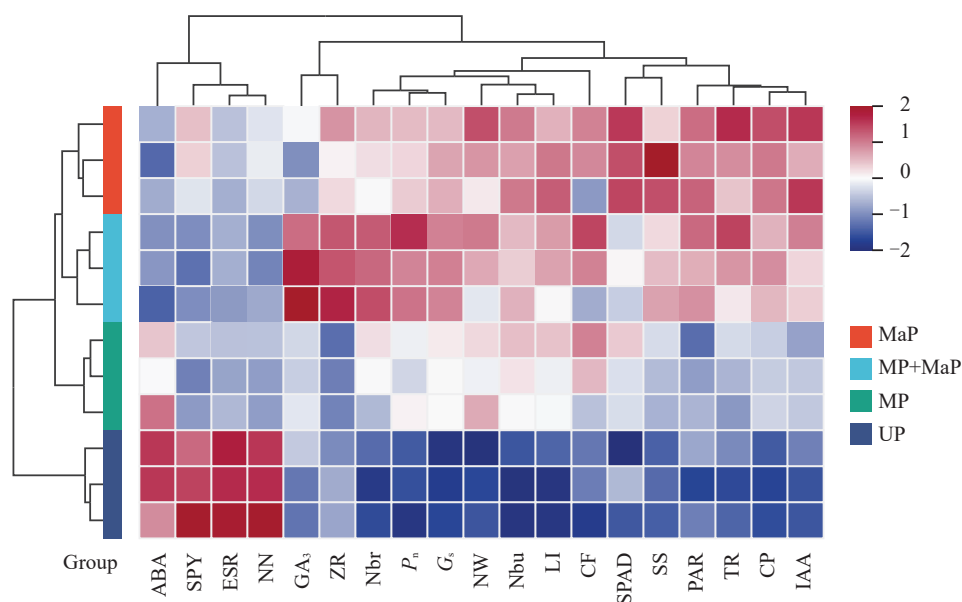


图 7 不同修剪模式下坚果品质的差异
Fig. 7 Differences of nut qualities with different pruning models



ABA. 脱落酸含量;SPY. 单株产量;ESR. 空壳瘪仁率;NN. 单株果数;GA₃. 赤霉素含量;ZR. 玉米素含量;Nbr. 新发1年生枝;P_n. 净光合速率;G_s. 气孔导度;NW. 单果质量;Nbu. 新发混合芽;LI. 光照度;CF. 粗脂肪含量;SPAD. 相对叶绿素含量;SS. 可溶性糖含量;PAR. 光合有效辐射;TR. 总辐射;CP. 粗蛋白含量;IAA. 生长素含量。下同。

ABA. Absciscic acid content; SPY. Single plant yield; ESR. Empty and shrinkage rate; NN. Nut number; GA₃. Gibberellin 3 content; ZR. Zeatin content; Nbr. New annual branch; P_n. Net photosynthetic rate; G_s. Stomatal conductance; NW. Nut weight; Nbu. New mixed buds; LI. Light intensity; CF. Crude fat content; SPAD. Chlorophyll content; SS. Soluble sugar content; PAR. Photosynthetically active radiation; TR. Total radiation; CP. Crude protein content; IAA. Ndole-3-acetic acid content. The same below.

图8 不同修剪模式下参数指标的聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of parameter indicators with different pruning models

2.4 不同修剪模式冠层微环境、1年生枝重构及产量和品质指标的综合分析

对测定的参数指标进行了聚类,如图8所示,各修剪模式整体上聚为两大类,未修剪为一类,修剪为一类,修剪又根据不同修剪模式分别聚为一类。各参数指标比较,混合芽的脱落酸(ABA)含量、单株产量(SPY)、单株果数(NN)和空壳瘪仁率(ESR)聚为一类,其他指标聚为一类。修剪后由于结果枝量的减少,当年单株产量和单株果数降低,但空壳率也大幅下降。与未修剪相比,修剪提高了冠层光照度、增强了光合辐射,单枝新萌发的结果枝及混合芽数量增加,单果质量及核仁粗脂肪、粗蛋白和可溶性糖含量也有较大提高。

各修剪参数相关性比较发现(图9),冠层微环境指标[光照度(LI)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、总辐射(TR)、光合有效辐射(PAR)、叶片相对叶绿素含量(SPAD)]均与单株产量(SPY)、单株果数(NN)呈负相关,这种相关性主要由修剪降低了树冠的大小、减少了枝条和花芽量所致;冠层微环境与坚果的

空壳瘪仁率也呈显著负相关,修剪明显降低了坚果的空壳瘪仁比例。冠层微环境与单果质量(NW)、核仁粗脂肪(CF)、粗蛋白(CP)和可溶性糖(SS)含量均呈正相关,表明修剪后,冠层微环境的改变,提高了单果质量,提高了核仁粗蛋白、可溶性糖以及粗脂肪含量,改善了品质。另外,还分析了冠层微环境与1年生枝及混合芽激素含量的关系。微环境指标均与修剪后新发枝数(Nbr)、新形成的混合芽数(Nbu)以及GA₃、IAA和ZR含量呈正相关,其中与光合速率呈显著正相关。冠层环境条件的变化,提高了1年生枝条混合芽的质量,促进了新枝萌发及花芽形成。

结合修剪人工成本和修剪效率(表4),对不同修剪模式下的参数指标,进行了归一化处理,其中ABA含量、空壳瘪仁率、修剪成本为负向指标,其余参数为正向指标。采用层次分析法(AHP)主观赋权重和CRITIC权重法客观赋权重,计算了各指标的组合同权重值,各项指标的权重大小值如表5所示。进一步通过TOPSIS法对核桃不同修剪模式进行了定量评价,机械+人工辅助修剪综合评分最高(图10)。

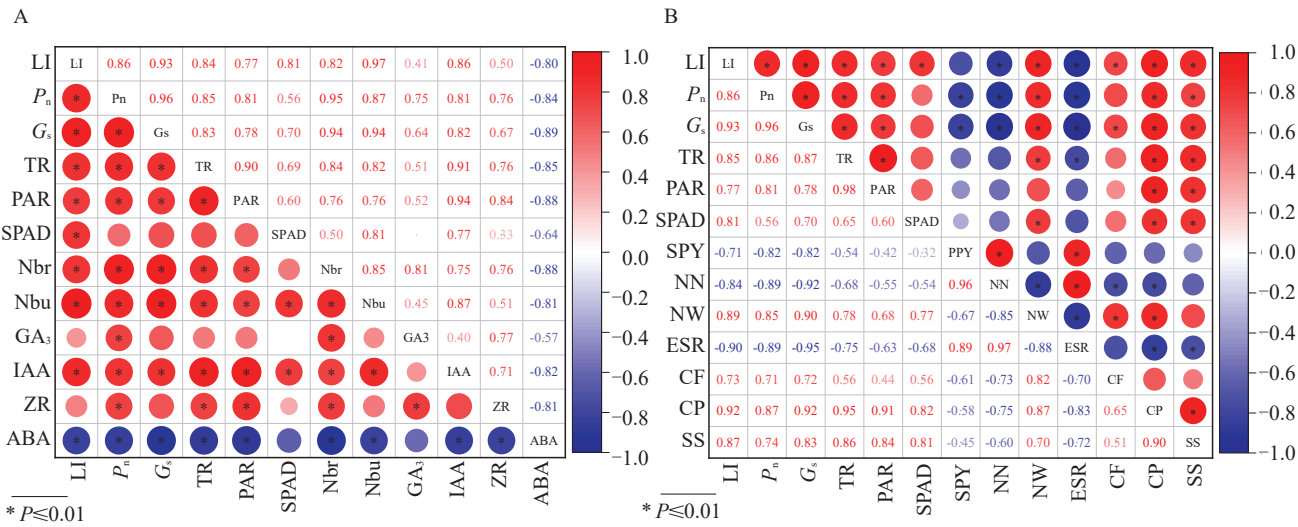


图9 不同修剪模式下冠层微环境与1年生枝重构及坚果产量品质指标的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between canopy microenvironment with annual branch reconstruction, yield and quality of nut with different pruning models

表4 不同修剪模式的人工成本比较

Table 4 Comparison of labor costs with different pruning models

修剪模式 Pruning model	作业量 Workload per 666.7 m ²	修剪效率 Pruning efficiency/ (666.7 m ² ·day ⁻¹ ·person ⁻¹)	用工量 Labor amount/ person	单价 Wages/ (Yuan·day ⁻¹ ·person ⁻¹)	总人工成本 Total labor cost/ten thousand yuan	节约人工成本 Cost savings/ (yuan·666.7 m ²)
机械修剪 Mechanical pruning	100	50	2	400	0.08	92
机械+人工辅助修剪 Mechanical and manual assisted pruning	100	50+10	2+10	400+100	0.18	82
人工修剪 Manual pruning	100	1	100	100	1.00	/

3 讨 论

3.1 高效轻简化是新疆核桃修剪的发展趋势

建立核桃树高效修剪管理体系,是维持高产优质的的重要手段^[21]。核桃树进入结果期后,树冠迅速扩大,若修剪不到位,容易造成树冠郁闭、枝条紊乱、果实产量和品质下降等问题,需通过修剪改善冠层通风透光条件,更新结果枝组,以保持优质高产稳产。核桃是多年生高大乔木,传统的人工修剪措施劳动强度大、成本高,已成为新疆核桃产业高质量发展的主要瓶颈。机械可以实现果树的大规模和标准化修剪,美国等国家核桃的整形修剪多采用此模式^[22-23],而新疆核桃的农田栽培模式也非常适合机械化、标准化管理,然而目前主要采用的人工修剪模式与栽培全程机械化管理的发展趋势不符,迫切需要研发实施以机械化为主要的高效轻简化修剪模式^[24]。

3.2 修剪对核桃冠层微环境的影响

修剪可使果树拥有适宜的树形结构,提高树体的通风透光性,有利于光合作用能力的增强、光能利用率的提升,使营养生长和生殖生长更加均衡,从而提升产量和果实品质^[25-26]。在本研究中,通过修剪降低了核桃树高、减小了冠幅,改善了冠层的通风透光条件,冠层的温度、光照度提高,相对湿度降低,叶片的SPAD值增大,净光合速率和光合有效辐射显著提高。另外,各修剪模式的冠层上部区域光照度差异不显著,因此重点测定了冠层下部区域的光合作用等参数指标,结果表明,修剪后冠层净光合速率均呈现出自内膛到外围递升的趋势,且不同区域显著高于未修剪,其中机械+人工辅助修剪最高,人工修剪次之。陈虹等^[27]研究表明,光合作用是核桃生长的基础,修剪能更有效地利用光能,影响叶片、枝条的生长发育,最终影响到果实品质的形成。本研究

表 5 不同修剪模式的参数指标权重计算结果

Table 5 Weight calculation result of indexs with different pruning models

指标 Index	主观权重值 Subjective weighting values	客观权重值 Objective weight values	组合权重值 Combined weight values
光照度 Light intensity (LI)	0.022 1	0.029 2	0.008 9
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	0.018 0	0.028 5	0.007 1
气孔导度 Stomatal conductance (G_s)	0.025 1	0.037 6	0.013 0
总辐射 Total radiation (TR)	0.022 1	0.054 1	0.016 5
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation (PAR)	0.025 1	0.030 6	0.010 6
相对叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD)	0.022 1	0.028 9	0.008 8
新发 1 年生枝 New annual branch (Nbr)	0.021 1	0.030 4	0.008 9
新发混合芽 New mixed buds (Nbu)	0.026 7	0.069 4	0.025 6
赤霉素 Gibberellin 3 (GA_3)	0.033 7	0.034 2	0.015 9
生长素 Ndole-3-acetic acid (IAA)	0.042 5	0.060 5	0.035 5
玉米素 Zeatin (ZR)	0.029 4	0.036 6	0.014 9
脱落酸 Absciscic acid (ABA)	0.014 7	0.057 1	0.011 6
单株产量 Single plant yield (SPY)	0.019 4	0.043 4	0.011 6
单株果数 Nut number (NN)	0.017 1	0.032 1	0.007 6
单果质量 Nut weight (NW)	0.047 7	0.040 5	0.026 6
空壳瘪仁率 Empty and shrinkage rates (ESR)	0.004 5	0.035 9	0.002 3
粗脂肪 Crude fat (CF)	0.037 9	0.030 1	0.015 7
粗蛋白 Crude protein (CP)	0.042 7	0.026 6	0.015 7
可溶性糖 Soluble sugar (SS)	0.066 8	0.060 5	0.055 8
修剪成本 Cost	0.065 9	0.128 9	0.117 1
修剪效率 Efficiency	0.395 2	0.104 6	0.570 3

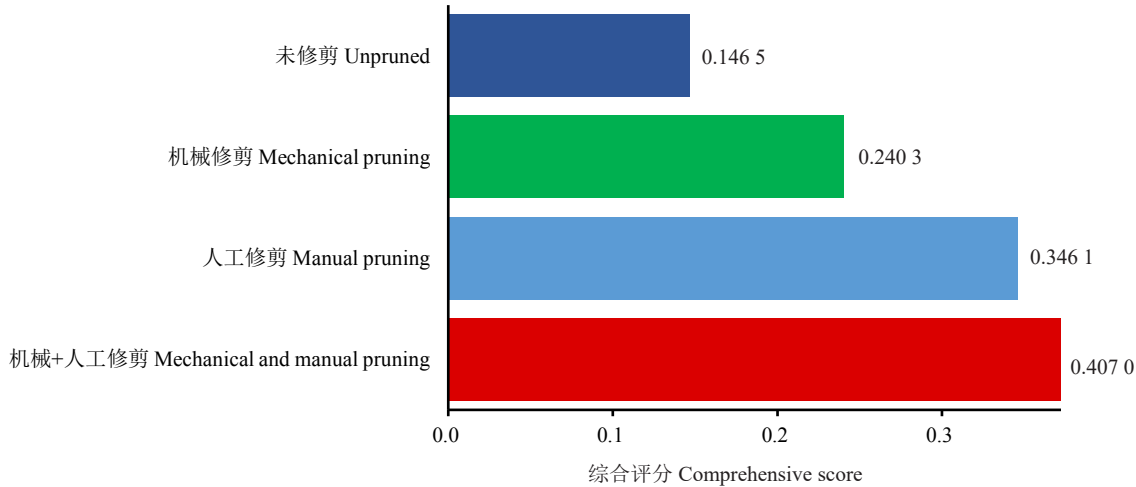


图 10 不同修剪模式的综合评价

Fig. 10 Comprehensive evaluation of different pruning models

结果也表明,修剪提高了核桃叶片光照度、光合作用能力、光合辐射等微环境指标,促进了枝条及果实的发育。

3.3 修剪对核桃 1 年生结果枝枝组重构的影响

1 年生结果枝和花芽的生长发育对果树产量和品质的形成至关重要。修剪减少了多余的枝条和花

量,使冠层枝条分布均匀,营养更多地集中于芽、花、果实,从而促进结果枝重构及改善果实品质^[28-29]。本研究结果表明,修剪后 1 年生结果枝的总芽、混合芽及雌花数量差异不明显,但坐果数、新发枝数及新形成的混合芽数量明显增加,其中机械+人工辅助修剪新发 1 年生枝数量最多,人工修剪新形成的混合

芽数量最多。修剪还可以调节树体的枝组结构,改变内源激素含量的积累,促进芽的萌发和成花,提高坐果率^[30-31]。本研究结果表明,修剪促进了生长促进激素 GA₃ 和 IAA 的积累,分别在机械+人工辅助修剪和人工修剪的混合芽中含量最高;而生长抑制激素 ABA 含量则在修剪后降低,其中人工修剪的顶芽和机械+人工辅助修剪的侧芽中显著降低,这与苏曼琳等^[30]在文冠果、罗雪梦等^[32]在紫叶紫薇中研究结果一致,修剪改变了内源激素在核桃混合芽中的分布,促进结果枝组的形成。

3.4 修剪对核桃坚果品质的影响

果实品质是衡量果树整形修剪是否合理的最重要指标,修剪能在果树营养生长与结果能力之间建立生理平衡,保持树体的结构状态,提升果实品质^[33-34]。本研究结果也显示,修剪虽然降低了当年的单株产量,但显著提高了单果质量、降低了空壳瘪仁率,而且次年单株产量和果数明显增加,机械+人工辅助修剪的空壳瘪仁率降低到4.3%,这与沈晓贺等对核桃机械修剪设备的研究结果一致;另外,修剪也显著增加了核仁的粗脂肪、粗蛋白和可溶性糖含量,这与修剪后冠层微环境的变化、树势增强密切相关^[10]。

3.5 修剪后参数指标的综合分析

测定的参数指标聚类分析表明,对指标按照修剪模式不同分别聚类,ABA 含量、单株产量、单株果数和空壳率等作为负向指标聚为一类,其他指标聚为一类。相关性分析也发现,微环境指标与1年生结果枝、混合芽的形成数量以及坚果品质指标均呈正相关,由于修剪减少了树冠外围的枝组量,而使单株产量及单株果数下降,与微环境指标呈负相关,但由于冠层环境条件的改善,单株产量能较快恢复。周罕觅等^[20]研究认为,应用 AHP-CRITIC-TOPSIS 法构建的多目标综合评价体系,是解决果树生产问题的理想方案。因此,基于 AHP 和 CRITIC 权重分析,结合 TOPSIS 算法,对修剪后的参数指标及修剪的成本和效率综合评价表明机械+人工辅助修剪是成龄核桃树的最优修剪模式。

3.6 新疆成龄核桃树机械+人工辅助修剪技术模式分析

核桃成龄树树体高大,传统的人工修剪模式费时费工、效率低。在轻简高效修剪模式的研究过程中,团队总结了10年生及以上新疆核桃树机械+人

工辅助修剪的技术方法^[35]。机械修剪的定干高度为5.0~5.5 m,根据栽培株行距确定修剪冠幅,使冠幅之间至少有1.0 m以上的通风带。如株距为6.0 m、行距为8.0 m时,定干高度为5.0 m,种植行向冠幅为5.0 m,垂直于种植行向冠幅为5.5 m;如株距为6.0 m、行距为10.0 m时,定干高度为5.5 m,种植行向冠幅为5.0 m,垂直于种植行向冠幅为6.5 m。树冠外围机械修剪完成后,再采用电动剪刀(锯)对内部枝条进行回缩、疏除的人工辅助修剪。疏除冠内密度过大、交叉生长、基部光秃的枝条;对4年生以上结果枝组重回缩,刺激萌发培养新的结果枝组,达到更新结果枝组的目的,以保持树体紧凑,结果部位不外移;轻度回缩大、中型辅养枝(剪除枝条长度的1/4~1/3),各类结果枝组间的距离保持50~80 cm,并均匀分布在各级主、侧枝上。另外,应在幼树整形过程中培养宜机化树形,将不会使修剪后的产量大幅降低,更有利于推动新疆核桃生产的标准化、机械化。

4 结 论

经过机械修剪、机械+人工辅助修剪和人工修剪后,核桃冠层下部的光照度、光合作用能力、光合有效辐射得到提升,显著改善了微环境。修剪后坐果率、新发1年生结果枝和混合芽数量增加,混合芽中的 GA₃、IAA 等内源激素含量也得到提高,促进了冠层枝组的优化重构。冠层微环境的改善,也提升了坚果质量,单果质量提高、空壳瘪仁率显著降低,核仁主要内在品质指标的含量增加。另外,机械+人工辅助的机艺融合修剪模式可显著节省劳动力、降低生产成本,解决修剪机械对树冠内膛修剪不到位的问题,适宜于核桃轻简化、标准化生产,栽培中针对新疆成龄核桃树采用机械修剪并辅助简约的人工工艺措施是经济高效的修剪方法。

参考文献 References:

- [1] 张翰生, 吕秦湘, 康建忠, 梁宗锁. 核桃的营养价值及其开发利用研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 905-919.
ZHANG Hansheng, CHANG Qinxian, KANG Jianzhong, LIANG Zongsuo. Research progress on nutritional value and utilization of walnut[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(4): 905-919.
- [2] 胡东宇, 高健, 黄力平, 杨丽萍, 王建英. 新疆四地州核桃产业现状与发展思路[J]. 北方园艺, 2021(13): 148-154.
HU Dongyu, GAO Jian, HUANG Liping, YANG Liping, WANG Jianying. Current situation and development idea of wal-

- nut industry in four prefectures of southern Xinjiang[J]. Northern Horticulture, 2021(13): 148-154.
- [3] 赵向豪,杨景淳. 新疆核桃产业集群发展策略研究[J/OL]. 中国油脂, 2024: 1-11. (2024-04-17). <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240162>.
ZHAO Xianghao, YANG Jingchun. Research on the development strategy of walnut industrial cluster in Xinjiang[J/OL]. China Oils and Fats, 2024: 1-11. (2024-04-17). <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240162>.
- [4] 相昆,周桂花,阿不力米提·阿不都热西提,孙芝梅. 喀什地区核桃产业发展现状与建议[J]. 落叶果树, 2019, 51(1): 24-25.
XIANG Kun, HOU Guihua, Abulimiti · Abudurexiti, SUN Zhi-mei. Current situation and suggestions for the development of walnut industry in Kashgar[J]. Deciduous Fruits, 2019, 51(1): 24-25.
- [5] 邓秀山,艾则孜·吐尔逊. 阿克苏核桃产业发展现状及对策[J]. 新疆林业, 2021(2): 27-30.
DENG Xiushan, Aizezi · Tuerxun. Current situation and strategies for Aksu walnut industry[J]. Forestry of Xinjiang, 2021(2): 27-30.
- [6] 胡安鸿,宋彬. 间伐和修剪对新疆核桃主栽品种光合及荧光特性的影响[J]. 中国果树, 2021(4): 41-45.
HU Anhong, SONG Bin. Effects of thinning and pruning on photosynthetic and fluorescence characteristics of main cultivar of walnut in Xinjiang[J]. China Fruits, 2021(4): 41-45.
- [7] DOS SANTOS A S, PEREIRA G A, FONSECA W L, ZUFFO A M, DA CUNHA J G, SOARES N P, MORAIS E M, DO NASCIMENTO A A S, SANTOS D P, DE SOUSA ALMEIDA M, AGUILERA J G, MORALES-ARANIBAR L, SALCEDO E P, CHURA R M M, CONTRERAS W C, ALEJO R C. Photosynthetic assimilation of the guava (*Psidium guajava*) cv. Paluma under different pruning and fruit thinning intensities[J]. Agronomy, 2023, 13(6): 1610.
- [8] 张翔,翟敏,徐迎春,李永荣. 不同修剪措施对薄壳山核桃枝条生长及枝条和叶片碳氮代谢物积累的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 86-93.
ZHANG Xiang, ZHAI Min, XU Yingchun, LI Yongrong. Effect of different pruning measures on branch growth and carbon-nitrogen metabolite accumulation in branch and leaf of *Carya illinoensis*[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014, 23(3): 86-93.
- [9] 苗雅坤. 拉枝与修剪对核桃生长与果实发育的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
MIAO Yakun. Effects of pruning and pruning on growth and fruit development of walnut[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [10] 张鑫荣. 修剪与施肥对林核一号核桃生长和坚果品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
ZHANG Xinrong. Effects of pruning and fertilization on growth and nut quality of Linhe No. 1 walnut[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [11] ZENG H S, YANG J, YANG N, HUANG J W, LONG H, CHEN Y. A review of the research progress of pruning robots[C]. 2022 IEEE 2nd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA). October 28-30, 2022. Dalian, China. IEEE, 2022: 1069-1073.
- [12] LI X J, LIU B, SHI Y G, XIONG M M, REN D Y, WU L T, ZOU X J. Efficient three-dimensional reconstruction and skeleton extraction for intelligent pruning of fruit trees[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109554.
- [13] 刘佳,杨莉玲,马文强,买合木江·巴吐尔,沈晓贺. 果树修剪机械装备的发展现状与趋势[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 262-268.
LIU Jia, YANG Liling, MA Wenqiang, Maihemujiang · Batuer, SHEN Xiaohu. Current situation and trend of fruit tree pruning machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 262-268.
- [14] MOORE P W. Mechanical pruning for citrus[J]. California Agriculture, 1958: 7-10.
- [15] SPAGNOLO F. Rotary blade pruning machine: US19990349464[P]. 2001-06-26.
- [16] MARTÍ B V, GONZÁLEZ E F. The influence of mechanical pruning in cost reduction, production of fruit, and biomass waste in citrus orchards[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(4): 531-540.
- [17] 沈晓贺,刘佳,杨莉玲,祝兆帅,李忠友. 圆盘式核桃树修剪机的设计[J]. 新疆农机化, 2019(4): 8-11.
SHEN Xiaohu, LIU Jia, YANG Liling, ZHU Zhaoshuai, LI Zhongyou. Design and study of disc walnut tree pruning machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2019(4): 8-11.
- [18] 谢辉,韩守安,王敏,张雯. 扁桃-冬小麦间作模式下不同树形对冬小麦产量和叶片光合能力的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(9): 1610-1623.
XIE Hui, HAN Shouan, WANG Min, ZHANG Wen. Effect of trees from on grain yield and photosynthetic characteristics at different growth stage of wheat under almond wheat intercropping[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(9): 1610-1623.
- [19] 刘庆忠. 核桃种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
LIU Qingzhong. Descriptors and data standard for walnut[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [20] 周罕觅,马林爽,孙旗立,陈佳庚,李纪琛,苏裕民,陈诚,吴奇. 基于多目标综合评价的苹果水氮综合调控[J]. 中国农业科学, 2024, 57(18): 3654-3670.
ZHOU Hanmi, MA Linshuang, SUN Qili, CHEN Jiageng, LI Jichen, SU Yumin, CHEN Cheng, WU Qi. Optimization of integrated water and nitrogen regulation system in apple based on multi-objective comprehensive evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(18): 3654-3670.
- [21] 魏海斌. 修剪方式对核桃树树体生长及结果的影响[J]. 东北

- 林业大学学报, 2021, 49(9): 25-27.
- WEI Haibin. Effects of pruning on walnut tree growth and fruit setting[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 25-27.
- [22] NINOT A, ROVIRA M, ALETÀ N. Mechanical pruning in walnut hedgerow orchard[J]. Acta Horticulturae, 2005, 705: 559-562.
- [23] 王锐, 王根宪, 封斌奎, 董兆斌, 乔如柏. 美国加利福尼亚州核桃栽植与加工考察报告[J]. 陕西林业科技, 2019, 47(1): 109-112.
- WANG Rui, WANG Genxian, FENG Binkui, DONG Zhaobin, QIAO Rubai. Inspection report on walnut cultivation and processing in California of the United States of America[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2019, 47(1): 109-112.
- [24] 吴泊辉. 新疆林果业生产机械化现状及对策分析[J]. 农机市场, 2022(10): 57-59.
- WU Bohui. Analysis of the current situation and countermeasures of mechanization in forestry and fruit industry production in Xinjiang[J]. Agricultural Machinery Market, 2022(10): 57-59.
- [25] 张抗萍, 李荣飞, 常耀栋, 梁国鲁, 陆智明, 易佑文, 胡涛, 鲁振华, 郭启高. 果树树形的形成机制与调控技术研究进展[J]. 果树学报, 2017, 34(4): 495-506.
- ZHANG Kangping, LI Rongfei, CHANG Yaodong, LIANG Guolu, LU Zhiming, YI Youwen, HU Tao, LU Zhenhua, GUO Qigao. A review of the canopy architecture formation mechanism and regulation technology in fruit trees[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(4): 495-506.
- [26] 林琚, 蔚露, 王红宁, 牛自勉, 谢鹏. 冠层结构对梨叶片光合特性及果实品质的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(7): 1180-1191.
- LIN Lu, YU Lu, WANG Hongning, NIU Zimian, XIE Peng. Effect of canopy structure on foliar photosynthetic characteristics and fruit quality of pears[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(7): 1180-1191.
- [27] 陈虹, 孙守霞, 张述斌, 吕威, 周光辉, 杨丽, 潘存德. 叶果比对‘新新2号’核桃叶片光合特征的影响[J]. 分子植物育种, 2024, 22(16): 5444-5451.
- CHEN Hong, SUN Shouxia, ZHANG Shubin, LÜ Wei, ZHOU Guanghui, YANG Li, PAN Cunde. Effects of leaf-to-fruit ratio on photosynthetic characteristics of ‘Xinxin 2’ walnut leaves[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(16): 5444-5451.
- [28] 蔡新玲, 周米生, 王陆军, 肖正东. 冬季修剪措施对薄壳山核桃‘威奇塔’幼树萌芽数、成枝量和果枝量的影响[J]. 山东林业科技, 2021, 51(3): 38-42.
- CAI Xinling, ZHOU Misheng, WANG Lujun, XIAO Zhengdong. Effect of dormant pruning measure on bud sprouting number, branching number and fruit branch number of *Carya illinoensis* ‘Wichita’[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2021, 51(3): 38-42.
- [29] 王静, 黄欣欣, 郭栋梁, 黄石连, 韩冬梅, 李建光. 模拟机械修剪方式对桂味荔枝树体生长及坐果的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(8): 1450-1458.
- WANG Jing, HUANG Xinxin, GUO Dongliang, HUANG Shilian, HAN Dongmei, LI Jianguang. Effects of simulated mechanical pruning models on shoot growth and fruit setting of Guiwei litchi[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(8): 1450-1458.
- [30] 苏曼琳, 吴尚, 马履一, 段劼, 荣贵纯, 苏淑钗, 敖妍. 3种修剪方法对文冠果芽内源激素含量和萌芽成枝的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 101-108.
- SU Manlin, WU Shang, MA Lüyi, DUAN Jie, RONG Guichun, SU Shuchai, AO Yan. Effects of three pruning methods on endogenous hormone and shoot growth of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge buds[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 101-108.
- [31] MARIN R P, SHERIF S M, SMITH A H. Physiology of pruning fruit trees[J]. Virginia Cooperative Extension, 2020: 1-8.
- [32] 罗雪梦, 王小明, 曾慧杰, 李永欣, 唐丽. 修剪措施对紫叶紫薇花蕾中内源激素和碳氮营养含量的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(11): 1876-1883.
- LUO Xueming, WANG Xiaoming, ZENG Huijie, LI Yongxin, TANG Li. Effects of pruning measures on endogenous hormones, carbon and nitrogen nutrition in flower buds of purple-leaf *Lagerstroemia indica*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(11): 1876-1883.
- [33] SARAGINOVSKI N, KIPRIJANOVSKI M. The effect of the short pruning on the yield and quality of the fruits at the peach tree[J]. Horticultural Science, 2021, 48(2): 73-79.
- [34] 岳海, 何双凌, 陈宇春, 宁娅, 贺熙勇. 不同整形方式对澳洲坚果植株冠层生理特性、产量及品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(6): 1382-1389.
- YUE Hai, HE Shuangling, CHEN Yuchun, NING Ya, HE Xiyong. Effects of different pruning methods on canopy physiological characteristics, yield, and quality of *Macadamia*[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(6): 1382-1389.
- [35] 马凯, 韩立群, 赵国庆, 赵钰. 一种核桃树降高瘦身的方法: CN202310025554.6[P]. 2024-12-06.
- MA Kai, HAN Liqun, ZHAO Guoqing, ZHAO Yu. A method for walnut tree height reduction and weight loss: CN202310025554.6[P]. 2024-12-06.