

苹果园间伐对叶片光合特性和果实产量、品质影响的整合分析

张俊娜, 王冲*, 张东, 杨晨

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 为探明果园间伐对果树光合特性及产量、品质的影响, 搜集近 20 年(2000—2020 年)来发表的文献, 建立了包含 130 组光合特性和产量、品质等相关内容的数据库, 采用整合分析方法, 定量分析了产区、间伐类型、树龄以及种植密度等条件下间伐对果树叶片光合特性和苹果产量、品质的影响。结果表明, 苹果园间伐可以改善果树冠下透光率, 显著提高叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r), 促进果实单果重、可溶性固形物含量、硬度和着色指数的显著提升。在不同产区、密度、树龄和间伐类型条件下, 叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率增幅范围分别为 25.9%~55.1%、42.0%~80.7%、19.3%~45.0%, 叶片胞间 $CO_2(C_i)$ 浓度在树龄 ≤ 15 年时降低 1.9%, 树龄 > 15 年时显著增加 11.9%; 果实单果重、可溶性固形物含量、硬度及着色指数增幅范围分别为 10.6%~24.6%、9.2%~16.4%、5.6%~16.4%和 7.5%~32.6%, 其中单果重效应值在不同产区和树龄的影响下均有显著差异; 与不间伐(CK)相比, 果园间伐后第 1 年苹果产量显著降低 18.6%, 3 年或者 3 年以上时, 产量显著增加, 达 18.9%。郁闭苹果园间伐能够改善果园的通风透光性, 提高果树光合特性, 进而促进苹果产量和品质的提高, 但因产区、间伐类型、树龄和密度等影响幅度不同。因此, 果园间伐时应综合考虑不同区域和果园条件, 进而合理采取间伐措施。

关键词: 苹果; 郁闭园改造; meta 分析; 透光率; 光合特性

中图分类号: S661.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0569-09

A meta-analysis of effects of thinning on leaf photosynthetic characteristics and fruit yield and quality in apple orchard

ZHANG Junna, WANG Chong, ZHANG Dong, YANG Chen

(College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: To explore the effects of thinning of orchards on the photosynthetic characteristics and apple yield and quality, we collected data from published literature in the last 20 years (2000—2020), established a database containing 130 groups of photosynthetic characteristics, yield and quality and other related content, and used a meta-analysis to quantify the effect of thinning on leaf photosynthetic characteristics and apple yield and quality under different production areas, thinning methods, tree-age and planting density. As results, thinning in apple orchards could increase the light transmittance under the canopy of fruit trees, significantly increased the leaf net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r), and significantly promoted the single fruit mass, soluble solids, fruit firmness and coloring index. Under different production areas, densities, tree ages and thinning types, the increase range of the leaf P_n , G_s and T_r was 25.9% - 55.1%, 42.0% - 80.7% and 19.3% - 45.0%, respectively. The C_i was significantly reduced by 1.9% when the tree-age was ≤ 15 a, and it was significantly increased by 11.9% when the tree-age was > 15 a; the increase range of single fruit mass, soluble solids, fruit firmness and color index was 10.6% - 24.6%, 9.2% - 16.4%, 5.6% - 16.4% and 7.5% - 32.6%, respectively, of which, the single fruit mass was significantly different under the influence of different producing areas and tree ages; compared with no thinning(CK), the apple yield in the first year after thinning in the orchard was significant decreased by 18.6%, and in the third year or more, the output would increase significantly by 18.9%. In conclusion, canopy overcrowd apple orchards thinning can improve the ventilation and light transmittance of the orchard, improve the photosynthetic characteristics of fruit trees,

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201100)资助。

作者简介: 张俊娜, 硕士研究生。E-mail: jnzhang0105@163.com

* 通信作者: 王冲, 博士, 教授。E-mail: wangchong@cau.edu.cn

and promote the apple yield and quality. However, the impact range was different due to the production area, thinning type, tree-age and density, etc.. Therefore, different areas and orchard conditions should be considered comprehensively when thinning orchards, and then reasonable thinning measures should be taken.

Key words: apple; canopy reconstruction; meta-analysis; light transmittance; photosynthetic characteristics

果实品质差、市场竞争力弱是我国果树生产中存在的主要问题^[1]。结构郁闭是造成密植苹果园产能降低、品质下降及效益不高的重要因素^[2]。目前,生产中主要是通过提干、落头、缩冠、疏大枝等整形修剪措施来改善树冠内的光照分布,解决果园郁闭问题。虽然上述措施能在一定程度上降低树冠内的郁闭程度,但无法从根本上解决乔化密植果园树木生长对空间的要求^[3-5]。间伐是成龄郁闭园改造采用的最主要措施之一,合理的间伐措施可以改善果园的通风透光性,促进树木光合能力,提高单株产量及果实品质^[6-7]。近年来,许多学者针对郁闭果园间伐改造对叶片光合特性、果实产量和品质等问题进行了大量研究,结果表明苹果园间伐可使冠内相对光照强度达 45.40%,叶面积指数达 3.26,从根本上改善树冠的光照条件^[8];果园间伐后可改善果园微域环境,提高叶片光合特性,增强光能利用效率,果实单果重、着色指数和可溶性固形物明显提升,果实品质显著提高^[2,9];但间伐过重,容易造成果园总体透光率过高,光合有效面积降低,不利于单位面积光合产物的积累,进而影响果实产量和品质^[10]。目前,我国关于果园间伐处理对光合特性和产量、品质影响的研究多是基于某一个或几个特定试验展开的,其结果会受该区域特定环境、树龄、间伐类型和种植密度的影响,因此,明确不同条件下苹果园间伐对果树叶片光合特性和产量、品质的影响,对苹果园产量和品质提升具有重要意义。本研究通过对国内已发表的有关苹果园间伐对果实产量、品质影响的文章进行数据搜集,采用整合分析的方法,系统分析间伐对叶片光合特性、果实产量和品质的影响及其区域差异,并利用随机森林方法定量不同产区、间伐类型、树龄和种植密度等因素对光合特性、产量、品质差异的效应值,以期为果园的合理间伐、降低郁闭度、提高果实产量和品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究基于中国知网、维普中文文献数据库以及 Web of Science 外文文献数据库收集已发表的文献数据,设定检索时间为“2000—2020”,以“间伐”、“苹果”、“光合特性”、“产量”及“品质”单个

或组合关键词进行检索,并根据以下条件进行文献筛选:(1)中国范围内进行的田间试验,且研究对象为苹果;(2)同一文献中必须包含不间伐(CK)处理、间伐(Thinning)处理,且其他试验条件全部一致;(3)同一试验中必须包含有苹果光合特性或者产量、品质数据;(4)试验中不同处理最少 3 次重复。对于每个独立试验还要能够获得以下相关信息:试验点的地理位置(经度和纬度)、间伐类型、树龄、种植密度及果园冠下透光率等。经筛选后,符合条件的文献共 35 篇^[1-10,17-42],有效数据 130 组。

1.2 研究方法

本研究中的数据均来自检索文献。在进行文献数据收集时,如果文献中的数据是用图的形式表示,则用 GetData Graph Digitizer 2.26^[11]软件来提取,若文献中提供的数据为标准误(SE),则标准差(SD)可通过公式(1)进行转换:

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

式(1)中, n 是重复次数。统计学指标采用响应比(response ratio, RR)表示,其中 RR 计算公式为:

$$RR = X_t / X_c \quad (2)$$

式(2)中: X_t 代表处理组平均值, X_c 代表对照组平均值。在分析过程中,将 RR 进行对数化,采用自然对数响应比($\ln RR$)来反映间伐对叶片光合特性和苹果产量、品质影响的效应值^[12],计算公式为:

$$\ln RR = \ln(X_t / X_c) = \ln(X_t) - \ln(X_c) \quad (3)$$

通过计算得到每一组数据的效应值,利用数据标准差计算权重加权平均后得到 95%置信区间(95%CI)。若置信区间包含 0,则说明间伐对叶片光合特性和苹果产量、品质无显著影响;若置信区间全部大于 0,则说明间伐对叶片光合特性和苹果产量、品质具有显著正效应;若置信区间全部小于 0,则说明间伐对叶片光合特性和苹果产量、品质具有显著负效应,即间伐能够显著降低果树叶片光合特性和果实产量、品质($P < 0.05$)^[13]。为便于理解和描述,笔者通过式(4)计算得到叶片光合特性和苹果产量、品质的变化百分数^[14]:

$$m = (\exp(\ln RR) - 1) \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, m 为间伐条件下相对于不间伐叶片光合特性和苹果产量、品质变化(增加或下降百分比)。

1.3 数据分析

整合分析合并计数资料的响应比得出加权平均响应前, 需明确试验处理间及各试验结果是否存在异质性(偏倚性)^[15], 运用 SPSS 软件 19.0 进行数据统计分析和显著性检验, 如果 $P < 0.05$, 则认为样本不同处理结果间有异质性, 采用随机效应模型^[16]。如图 1 所示, 所收集的光合特性、产量、品质数据经对数 (ln) 转换后响应比的频数分布, 其中光合特性样本数为 216 组, 产量、品质样本数为 406 组, 均符合高斯分布 ($P < 0.05$), 满足整合分析的必需要求, 并针对不同产区、间伐类型、树龄和种植密度等因素, 使用效应值来评估间伐对叶片光合特性和苹果产量、品质的影响。采用 SigmaPlot 14.0、Origin 2018 软件进行相关作图。

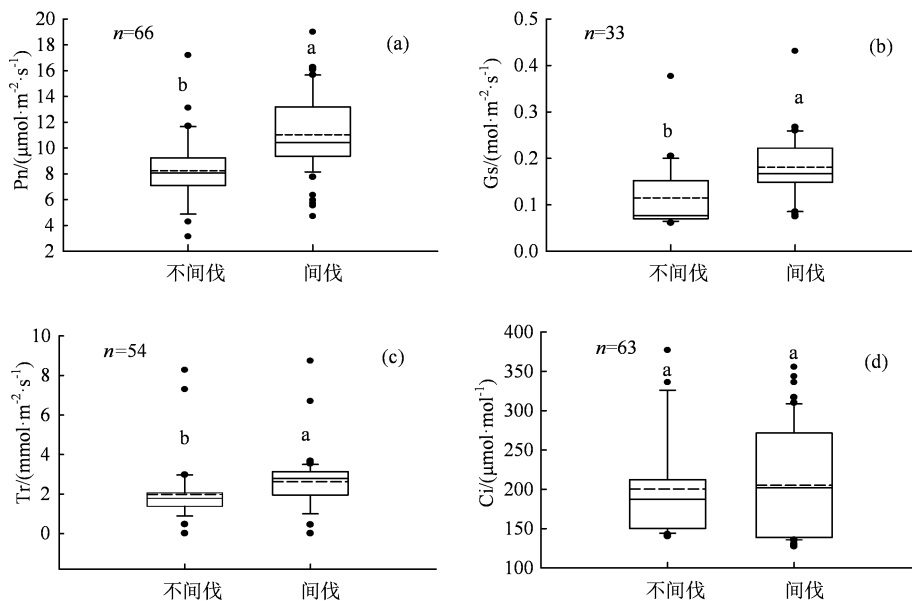
2 结果与分析

2.1 间伐对苹果光合特性和产量、品质指标的影响

2.1.1 间伐对苹果树光合特性的影响 如图 1(a)–(d) 所示, 苹果园不间伐和间伐处理条件下, 叶片平均净光合速率分别为 8.24 和 $11.04 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均气孔导度分别为 0.11 和 $0.18 \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均蒸腾速率分别为 1.98 和 $2.62 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均胞

间 CO_2 浓度为 200.39 和 $205.20 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 除叶片胞间 CO_2 浓度无显著性差异外, 果园间伐处理均能显著提高果树叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。

2.1.2 间伐对苹果产量、品质指标的影响 如图 2(e) 所示, 苹果园在不间伐和间伐处理条件下, 平均产量分别为 45.37 和 $45.88 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 处理间无显著差异; 从间伐后苹果产量变化情况来看(图 2(f)), 不间伐果园产量变化整体呈现降低趋势, 间伐果园产量整体呈现上升趋势, 且间伐后随着年限变化有显著差异; 果园间伐后 1 年平均产量为 $39.23 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 低于不间伐果园产量 $48.18 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 间伐后 3 年产量最高为 $51.14 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 是不间伐苹果园 ($44.86 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 产量的 1.14 倍。从图 2(g)–(j) 可以看出, 苹果品质在不间伐和间伐处理条件下, 平均单果重分别为 202.08 和 235.42g , 平均可溶性固形物分别为 12.69% 和 14.30% , 平均硬度分别为 7.49 和 $8.47 \text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, 平均着色指数分别为 78.90% 和 92.34% , 且均有显著性差异。综上可以看出, 苹果园间伐对果实产量无显著影响, 且能显著提高果实单果重、可溶性固形物、硬度和着色指数。



图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 中间实线代表中位数, 虚线代表平均值, 上下两条线分别代表 95% 和 5% 的置信区间。下同。

图 1 不同处理下叶片光合特性差异变化

Figure 1 Changes in leaf photosynthetic characteristics under different treatments

2.2 不同条件下苹果园间伐后对叶片光合特性和苹果产量、品质的响应

2.2.1 不同条件下苹果园间伐后对叶片光合特性的响应分析 整合分析结果表明, 苹果园间伐处理在

不同解释变量条件下均能够显著提高叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率 ($P < 0.05$, 下同), 增幅范围分别为 $25.9\% \sim 55.1\%$ 、 $42.0\% \sim 80.7\%$ 和 $19.3\% \sim 45.0\%$ 。从图 3(a)–(c) 可以看出, 除叶片净光合速

率(图 3(a))在黄土高原产区增幅效应值(55.1%)显著高于环渤海湾产区(28.1%)外,在不同密度、树龄、间伐类型条件下,果树叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率增幅效应值均没有显著差异,且表现为隔行去行、隔株去株间伐类型增幅效应值均大于其他间伐类型,其中隔行去行、隔株去株的叶片气孔

导度(图 3(b))增幅效应值分别是其他间伐类型的 1.92 和 1.84 倍;间伐果园叶片胞间 CO_2 (图 3(d))效应值的显著性和强度因产区、间伐类型、密度的不同有所差别,但无显著差异,其中树龄 ≤ 15 年果树经间伐处理后胞间 CO_2 浓度效应值显著降低 1.9%,树龄 >15 年时显著增加 11.9%。

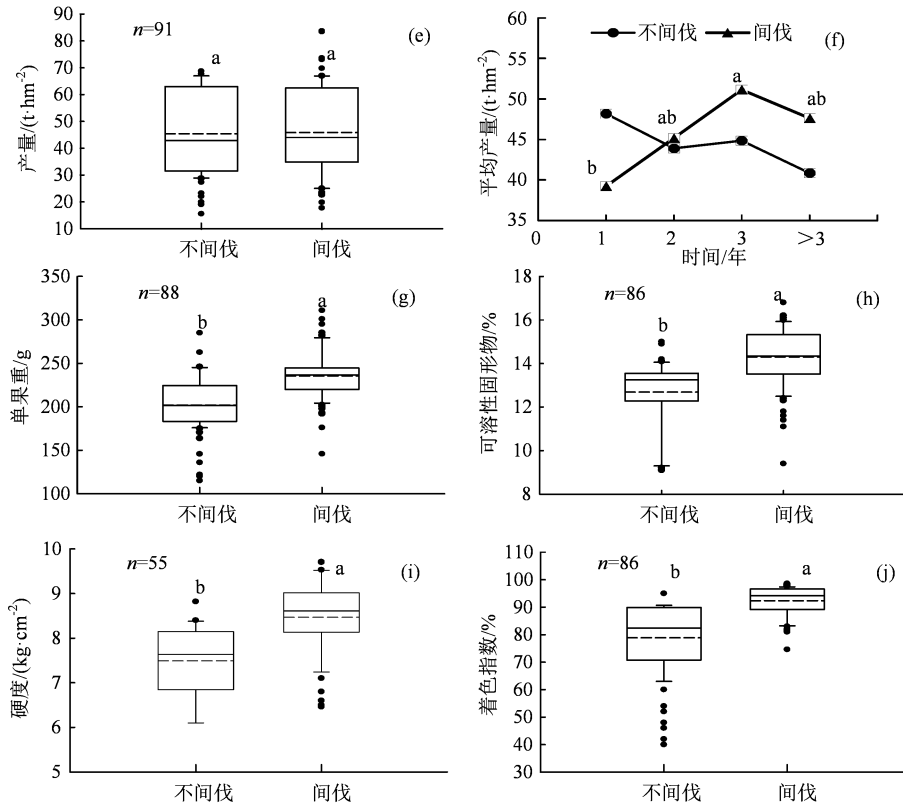


图 2 不同处理下苹果产量、品质差异变化

Figure 2 Changes in apple yield and quality differences under different treatments

2.2.2 不同条件下苹果园间伐后对苹果产量、品质的响应分析 整合分析结果表明(图 4(e)),苹果产量效应值在不同产区、间伐类型和密度条件下均无显著差异,树龄 ≤ 15 年时间伐果园产量效应值显著增加 12.5%,树龄 >15 年时显著降低 7.3%。从不同年限产量变化来看,间伐后第 1 年果园产量显著降低 18.6%,间伐后第 2 年增产效应不显著(产量效应值大于 0,但 95% 置信区间包含 0),间伐后第 3 年或者 3 年以上时,能够显著增产达 18.9% (13.4% ~ 18.9%)。如图 4(g)—(j)所示,在不同产区、间伐类型、树龄和密度条件下,间伐处理均能够显著提高苹果单果重、可溶性固形物、硬度及着色指数,增幅范围分别为 10.6%~24.6%、9.2%~16.4%、5.6%~16.4%和 7.5%~32.6%,其中单果重效应值变化(图 4(g))在不同产区和树龄的影响下其增幅效应值均有显著差异。果实着色指数(图 4(j))是判断其外观品质的基本

指标,树龄 ≤ 15 年的果园间伐后果实着色指数效应值增幅最高(32.6%),显著高于树龄 >15 年的间伐果园(10.9%),从不同间伐类型来看,果实着色指数增幅变化表现为隔株去株 $>$ 隔行去行 $>$ 其他。

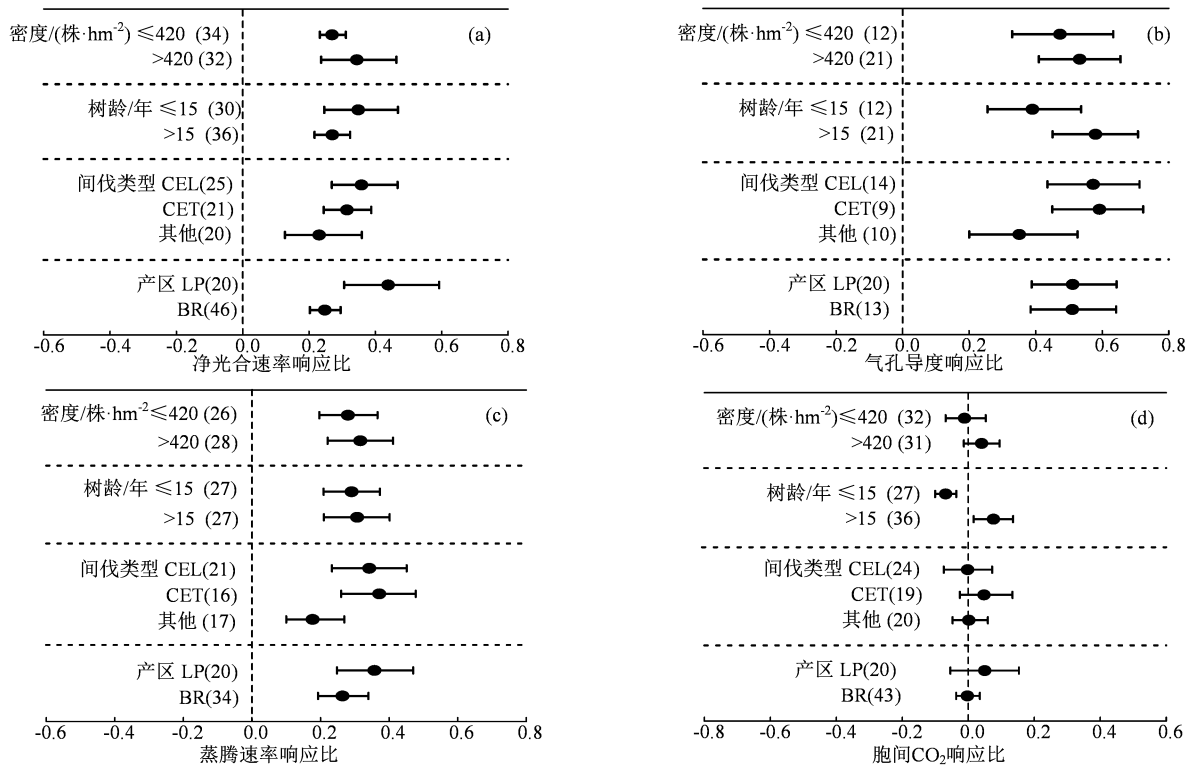
3 讨论

3.1 间伐对苹果叶片光合特性的影响

光是光合作用的能量来源,苹果 95%的干物质是由光合作用合成的,光照可以为光合作用提供同化力所需能量、促使气孔开放、活化光合作用酶类、调节光合机构发育^[17-19]。刘殿红等^[20]研究指出,通过对果园间伐处理能够显著提高叶片净光合速率,降低胞间 CO_2 浓度;李丙智等^[21]研究表明间伐果园叶片气孔导度和蒸腾速率的均随净光合速率的增大而增大,胞间 CO_2 浓度则随净光合速率增大而减小;聂佩显等^[2]研究则指出,不同间伐处理条件下,苹果园净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度和蒸腾

速率均呈现增加趋势。冠下透光率的改善是提高果园通风透光和光合速率最直接的措施, 采用边界线分析方法对间伐果园冠下透光率与叶片光合特性拟合分析发现(图 5), 果树叶片光合特性与果园冠下透光率呈显著相关关系, 即随透光率增加, 叶片光合特性逐渐提高, 当冠下透光率分别为 40.40%、42.5% 和 37.34% 时, 叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率达到最大值; 当透光率增加到一定值后又随变量增加而减少, 这可能是因为间伐后透风透光条件的改善, 提高了叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量, 改善了叶片质量, 进而促进果树光合特性的提高^[3, 22]; 当果园透光率过高, 光合有效面积降低, 对单位面积光合产物的积累存在不利影响, 进而又会影响叶片的光合特性^[10]。因此, 在不同研

究背景条件下, 间伐果园冠下透光率的改变对果树光合特性有显著的影响。此外, 本研究也发现, 叶片胞间 CO_2 浓度在冠下透光率为 22.90% 时达到最大值(图 5), 随透光率进一步增加, 胞间 CO_2 浓度明显降低, 且间伐果园叶片胞间 CO_2 效应值的显著性和强度因产区、树龄等因素的不同有所差别, 其中树龄的不同, 对胞间 CO_2 效应值变化有显著差异(图 3(d)), 这也可能是因为在果树生长的不同阶段, 会形成特定的冠层结构特征, 随树龄增加果树冠层开度不断减小, 平均叶倾角和消光系数不断增加, 果树群体趋于郁闭, 当树龄较大时, 由于其本身冠层内部透光性较差, 群体生产力下降, 净光合速率受到影响的同时, 气孔导度增大, 胞间 CO_2 浓度增加^[23, 43]。



CEL: 隔株去株; CET: 隔行去行; 其他: 隔 2 伐 1、隔 3 伐 1 或隔行去株; LP: 黄土高原产区; BR: 环渤海湾产区。下同。

图 3 果园间伐对叶片光合特性响应比

Figure 3 Response ratio of orchard thinning to leaf photosynthetic characteristics

3.2 间伐对苹果产量、品质的影响

苹果的产量和品质直接决定了果园的经济效益。前人研究指出, 光照条件好的部位果实单果重、可溶性固形物含量以及香气物质种类和相对含量均显著高于光照条件不良的内膛果实^[32, 39], 对果树进行间伐处理, 提高了冠下透光率, 改善了通风透光条件, 光合效能得以增加, 加快了苹果树的营养生长, 促进了叶片的生长发育, 还可以改变光质的组

成成分, 有利于果实生长发育的光质成分的增加, 进而促进果实产量、品质的提升^[2-3]。于道功等^[40]研究指出, 苹果园间伐后单位面积可增产达 26.8%, 阮班录等^[8]则指出, 苹果园间伐当年产量减产 22.7%, 第 2 年产量可增产 13.8%。通过拟合分析可以看出(图 6), 当间伐苹果园冠下透光率为 35.22% 时, 果园产量达到最大, 为 76.67 t·hm⁻², 后随透光率增加而降低, 且苹果产量效应值在不同产区、间

伐类型和种植密度条件下无显著差异，当树龄 ≤ 15 年时，间伐果园产量可显著增加 12.5%，树龄 > 15 年时显著降低 7.3%，主要可能是 ≤ 15 年果树正处于快速生长期，随树龄增长，树体通风条件表现良好，

群体整体长势好且光合能力强，产量可以快速增加，而成龄果树冠层开度、平均叶倾角均明显降低，导致内部透光极差，即使透光率进一步得到改善，由于内部光秃，树势较弱，也会造成产量降低^[43-44]。

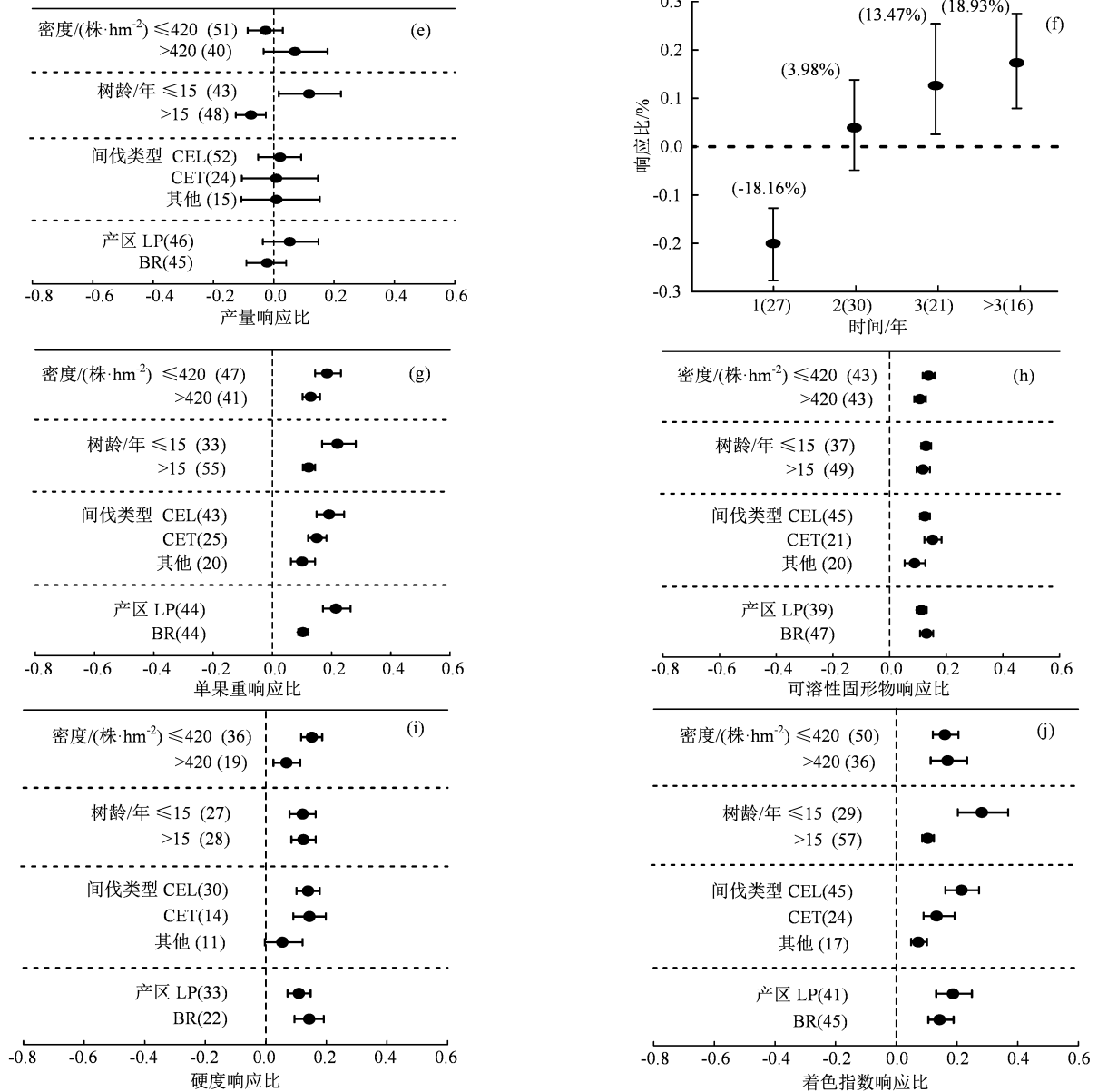


图 4 果园间伐对果实产量、品质响应比

Figure 4 Response ratio of orchard thinning to fruit yield and quality

本研究结果发现，间伐果园果实单果重、可溶性固形物、硬度和着色指数均显著提高，且增幅效应值的显著性和强度因产区、间伐类型、密度、树龄的不同有所差别。通过拟合分析发现(图 6)，当间伐苹果园冠下透光率分别为 37.48%时，果实单果重达到最大值，为 276.03 g，后随透光率持续增加，单果重逐渐降低，这可能与果树单株挂果量以及树势强弱有关；果实可溶性固形物、着色指数与果树冠下透光率呈显著 Sigmoidal 关系，即果实可溶性

固形物、着色指数随冠下透光率的增加而增加，分别在达到 16.25%和 97.14%后基本保持稳定，这与前人研究间伐果园可以有效改善果园透光率，进而显著提高果实单果重、可溶性固形物和着色指数等基本一致^[45-46]。但果实硬度变化与前人所做研究结果不尽相同，张彪等^[30]指出，果园间伐树果实硬度显著低于不间伐树；王锦锋^[42]指出，苹果园间伐后果实去皮硬度提高 5.6%；张露荷等^[3]研究指出果园间伐对果实硬度无显著影响。本研究结果发现间伐

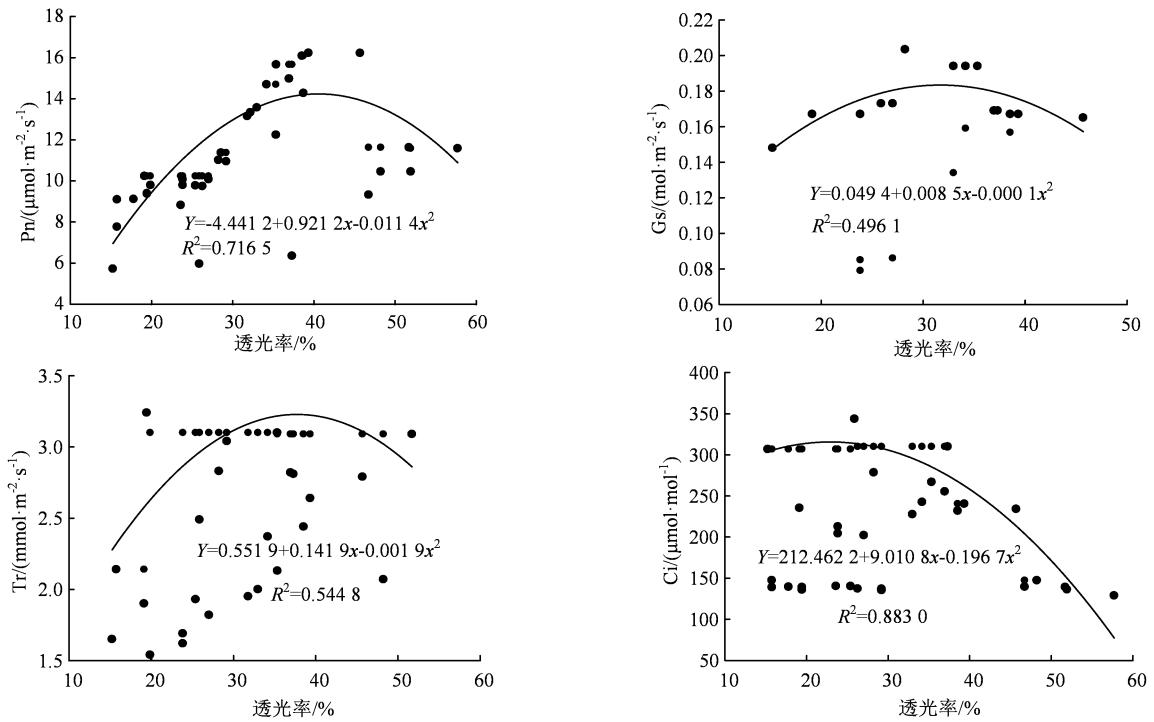


图 5 间伐苹果园冠下透光率与叶片光合特性的关系

Figure 5 The relationship between light transmittance under the canopy and leaf photosynthetic characteristics of thinned apple orchards

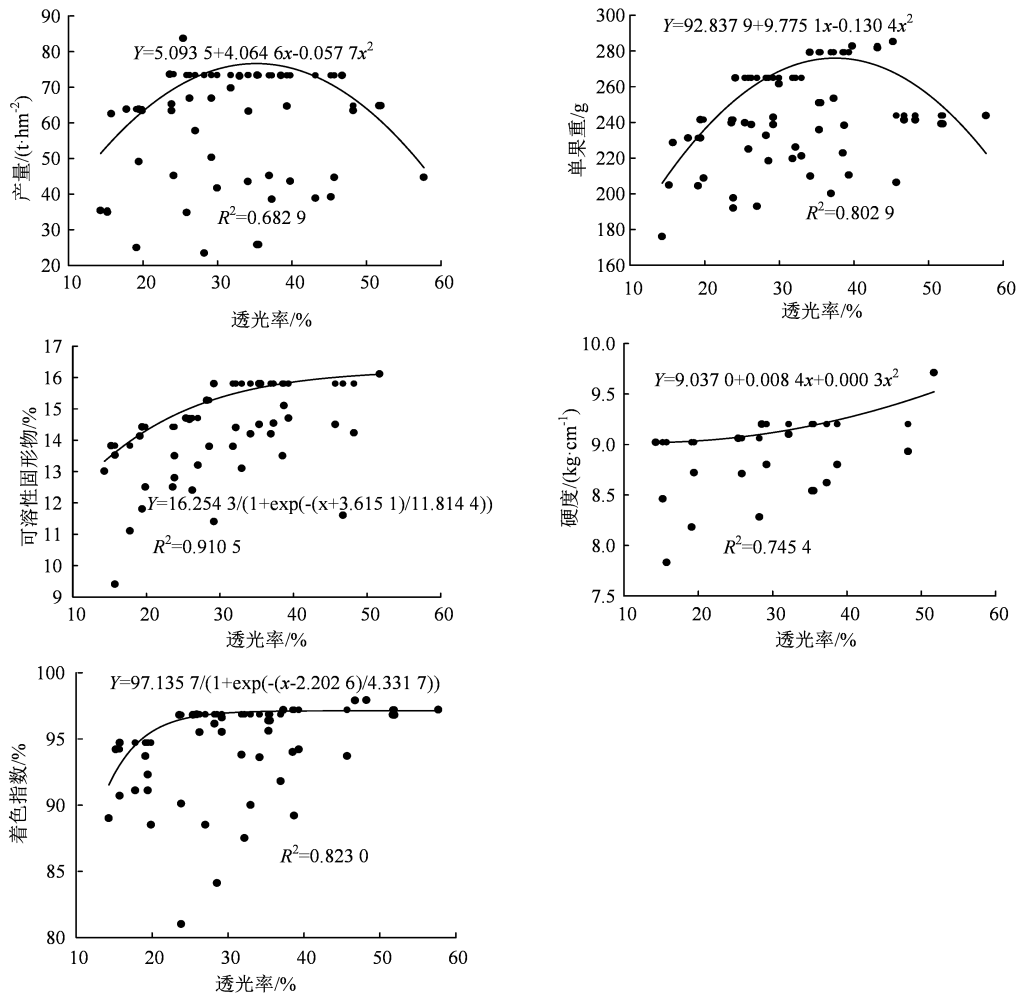


图 6 间伐苹果园冠下透光率与果实产量、品质的关系

Figure 6 The relationship between light transmittance under the canopy of thinned apple orchards and fruit yield and quality

可以显著提高果实硬度,且在不同产区,间伐类型、树龄及种植密度条件下无显著差异。根据冠下透光率和果实硬度拟合关系来看,随着冠下透光率的增加,果实硬度也逐渐增加,可能是因为在不同种植产区,受种植品种、果农管理措施等影响,如套袋果的硬度小于同时期采收的对照果硬度,随去袋时期的推迟,同时期采收的果实其硬度也会相应降低^[47];此外由于受试验数据的限制,通过整合分析获得的数据变化量也可能存在一定的不确定性,各影响因素之间并非完全相互独立的,可能存在一定的交互作用;没有深入分析果树品种、土壤养分管理状况及树木管理水平等差异,也会对结果产生一定的影响。

4 结论

整合分析结果表明,间伐能够显著提高叶片光合特性和苹果产量、品质,但不同产区、气候类型、间伐类型、树龄以及种植密度对果树光合特性和果实产量、品质的影响显著性和强度会有所差别。与不间伐相比,果园间伐能够提高果树冠下透光率,改善通风透光条件,进而显著提高叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,增加果树光合利用效能;间伐处理能够显著提高果实单果重、可溶性固形物、果实硬度和着色指数,其中单果重变化受产区、树龄的不同有显著差异。综上,郁闭苹果园间伐能够改善果园的通风透光性,提高树木光合能力,增强果树光合利用效能,进而促进果实产量及品质的提升,对提高果品市场竞争力有重要意义。

参考文献:

- [1] 田海成, 韩明玉, 李丙智, 等. 3种管理措施对红富士苹果生长发育及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 132-136.
- [2] 聂佩显, 薛晓敏, 王来平, 等. ‘红富士’苹果郁闭园间伐处理对果园结构、光能利用以及产量品质的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(4): 438-446.
- [3] 张露荷, 陈佰鸿, 王延秀, 等. 不同间伐方式对密植苹果园生理生态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1394-1403.
- [4] 田海成. 几种改形措施对密闭红富士苹果园光合和生长结果的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [5] 袁景军, 赵政阳, 万怡震, 等. 间伐改形对成龄密植红富士苹果园产量与品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 133-137, 142.
- [6] 何树松, 董晓颖, 李培环. 不同改造方式对“红富士”苹果郁闭园结果习性、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2013(24): 35-37.
- [7] 张露荷, 陈佰鸿, 王延秀, 等. 不同间伐方式对‘红富士’苹果枝类组成及内含物的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(2): 73-78.
- [8] 阮班录, 刘建海, 李雪薇, 等. 乔砧苹果郁闭园不同改造方法对冠层光照和叶片状况及产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3805-3811.
- [9] 吴军帅, 董晓颖, 段艳欣, 等. 苹果郁闭园不同间伐方式对果树群体结构和果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(19): 135-140.
- [10] 李培环, 吴军帅, 董晓颖, 等. 苹果密闭园不同间伐方式对光照、光合和生长结果的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2217-2223.
- [11] TAOVA S. Get data digitizing program code: Description, testing, training[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, International Nuclear Data Committee, 2013.
- [12] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [13] JOHNSON D W, CURTIS P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis[J]. For Ecol Manag, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [14] 姜玲玲, 刘静, 赵同科, 等. 有机无机配施对番茄产量和品质影响的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 601-610.
- [15] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- [16] 李寒冰, 金晓斌, 杨绪红, 等. 不同农田管理措施对土壤碳排放强度影响的 Meta 分析[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1630-1640.
- [17] 努尔妮萨·托合体如则, 李建贵, 陈辉煌, 等. 3种补光措施对阿克苏红富士苹果色泽及品质的影响[J]. 经济林研究, 2013, 31(3): 126-129.
- [18] 陈汝, 薛晓敏, 王来平, 等. 郁闭苹果园不同降密方式对冠层微环境以及树木生长和果实品质的影响[J]. 河北农业科学, 2019, 23(2): 47-52.
- [19] 孙文泰, 牛军强, 董铁, 等. 间伐改形对陇东旱塬密闭苹果园树木冠层结构和发育后期叶片质量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3008-3016.
- [20] 刘殿红, 刘国娟, 王闯, 等. 不同间伐方式对苹果光合指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(9): 39-40.
- [21] 李丙智, 阮班录, 君广仁, 等. 改形对红富士苹果树木光合能力及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 119-122.
- [22] 张继祥, 魏钦平, 张静, 等. 苹果密植园与间伐园树冠层内叶片光合潜力比较[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2898-2904.
- [23] 王亮, 郭小平, 毕华兴, 等. 晋西地区不同树龄富士苹果树群体冠层结构特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 115-120.
- [24] 冉庆凤. 改形对寒富苹果产量的影响[J]. 河北果树,

- 2014(1): 6-7.
- [25] 刘新江, 王明涛, 陈玉玲, 等. 红富士苹果郁闭园间伐试验[J]. 北方园艺, 2011(4): 65-66.
- [26] 李宗德, 杨聚德. 间伐和树形改造对红富士苹果郁闭园产量和品质的影响[J]. 中国果树, 2007(2): 39-41.
- [27] 蒋瑞山. 昌平区苹果乔砧郁闭园结构分析和改造技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [28] 魏周会. 甘肃皋兰县富士苹果密闭园改造技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- [29] 牛军强, 孙文泰, 尹晓宁, 等. 间伐对乔化红富士苹果光合特性和果实产量品质的影响[J]. 林业科技通讯, 2018(10): 67-70.
- [30] 张彪, 曹亚凤. 乔化密闭富士苹果园不同间伐效果研究[J]. 山西果树, 2018(3): 1-7.
- [31] 刘兴禄, 孙文泰, 牛军强, 等. 陇东密闭苹果园间伐后群体冠层结构与生育后期叶片生理特性研究[J]. 甘肃农业科技, 2018(1): 21-24.
- [32] 牛军强, 曹永华, 孙文泰, 等. 陇东早塬苹果树冠不同部位叶片光合及荧光特性对间伐方式的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(6): 44-50.
- [33] 侯雨辰. 郁闭红富士苹果园间伐后综合效益的调查研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [34] 张露荷. 乔化密植苹果园不同间伐效应的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [35] 聂佩显, 薛晓敏, 王金政, 等. 苹果密闭园间伐效应研究[J]. 山东农业科学, 2011, 43(5): 37-39.
- [36] 牛军强, 马明, 尹晓宁, 等. 乔化密植红富士苹果园改造试验[J]. 中国果树, 2010(6): 23-25.
- [37] 李永伟. 苹果园不同树形改造方法比较试验[J]. 山西果树, 2009(4): 9-10.
- [38] 王桂华, 陈浪波, 于晓峰. 密植苹果园改造对果品产量、质量的影响[J]. 烟台果树, 2005(1): 7-8.
- [39] 李卓阳. 间伐对苹果郁闭园果树光合和生长结果的影响[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2011.
- [40] 于道功, 刘学才, 宫明波, 等. 矮化苹果不同栽植密度方式及整形模式[J]. 北方园艺, 2000(1): 31-32.
- [41] 宋哲, 王宏, 于年文, 等. 间伐、控冠处理对乔化凉香苹果树光合速率和果实产质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 290-291, 372.
- [42] 王锦锋. 陇东早塬“红富士”苹果郁闭园 4 种改造方法比较[J]. 中国果树, 2019(3): 93-96, 117.
- [43] 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.
- [44] 张雲慧, 李文胜, 周文静, 等. 不同树龄的短枝“红富士”分层纺锤形对树冠结构、果实产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(4): 45-52.
- [45] BARRITT B, ROM C, GUELICH K, et al. Canopy position and light effects on spur, leaf, and fruit characteristics of delicious apple[J]. HortScience, 1987, 22(3): 402-405.
- [46] 张秀美, 王宏, 刘志, 等. “岳帅”苹果不同负载量光照分布与果实品质的关系[J]. 果树学报, 2017, 34(11): 1408-1414.
- [47] 刘彦珍, 毛光志. 不同去袋时期对红富士苹果果实硬度及色素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20340-20341.