

灵武长枣不同冠层光质组成对光合特性及果实品质的影响

陈丽华, 宋丽华, 高露, 谢云, 姜文倩

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:【目的】研究宁夏灵武长枣不同冠层光质组成对光合特性及果实品质的影响, 筛选出影响光合特性及果实品质的主要波长可见光。可为灵武长枣适宜的光环境选择和从树冠结构与光质调控提高果实品质提供理论和技术支撑。【方法】测定灵武长枣不同冠层光质组成、光合特性及果实品质, 采用方差分析及多元统计分析方法。【结果】灵武长枣不同冠层光质中, 总绝对辐射能表现为上层 > 外部 > 中部 > 中层 > 下层 > 内部; 红光绝对辐射能从上层到下层及内部到外部分别占不同冠层总绝对辐射的 29.85%、20.19%、35.26%、29.90%、17.35 和 44.05%。叶片光合参数均与蓝光绝对辐射能呈正相关, 与绿光绝对辐射能呈负相关; 类胡萝卜素、叶绿素、花色苷及类黄酮与紫光绝对辐射能均呈正相关, 而可滴定酸、可溶性糖和花色苷与蓝光绝对辐射能呈正相关, 叶绿素与绿光绝对辐射能呈正相关, 叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮与红光绝对辐射能呈正相关。【结论】增加波长较长的红光可以提高光质质量, 红光是灵武长枣光合特性及果实品质的主要影响因素, 在生产中补充 370~470 nm 和 600~770 nm 波长的光质, 提高叶片光合作用及果实品质。

关键词:灵武长枣; 光质组成; 光合特性; 果实品质

中图分类号:S665.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4330(2020)10-1811-10

0 引言

【研究意义】光是影响植物生长发育的基本环境因子之一, 是植物进行光合作用的能量来源^[1]。光包括光质、光照强度和光周期。光质是由不同波长的太阳光谱组成, 其中可见光对植物的光合特性及果实品质的形成尤为重要, 不同波长的可见光对植物形态建成、光合作用、果实品质及着色具有重要调节作用^[2-3]。由于太阳光辐射到植物体过程中会受到大气及颗粒物反射、吸收和散射, 致使植物最终吸收的太阳光的能量和分布发生改变^[4]。树冠内光照分布及光合作用强弱是果实品质形成的直接因素^[5], 而光照分布中光照强度外, 光质组成研究报道较少。灵武长枣 (*Zizyphusjuba* Mill. cv. Lingwuchangzao) 是宁夏

地方特色经济林树种, 近年来灵武长枣果实品质下降, 研究灵武长枣不同冠层光质组成对光合特性及果实品质的影响, 对宁夏灵武长枣适宜的光环境选择和从树冠结构与光质调控方面提高果实品质提供参考。【前人研究进展】目前, 利用人为遮光过滤的方法调控光质对植物生长发育、光合特性、果实品质形成过程的影响及调控机制研究较多, 而对于自然光照下研究不同冠层光质组成对光合能力及果实品质的相关研究较少, 且前人的研究中, 把光质、光合特性与果实品质及着色联系起来做较全面研究的报道很少。相关研究在苹果^[5]、梨^[6]、葡萄^[7]、脐橙^[8]等果树已有研究, 但未见对枣的研究相关报道。研究宁夏灵武长枣不同冠层光质组成对光合特性及果实品质的影响。【本研究切入点】以田间灵武长枣为试验对象, 在

收稿日期(Received): 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(31760203); 宁夏大学研究生创新项目(GIP2019009)

作者简介: 陈丽华(1993-), 男, 宁夏人, 硕士研究生, 研究方向为果树栽培生理, (E-mail)1371332583@qq.com

通信作者: 宋丽华(1969-), 女, 宁夏人, 教授, 博/硕士生导师, 研究方向为林木良种繁育和经济林栽培生理, (E-mail)slh382@126.com

自然光照条件下,研究光质、光合特性与果实品质及着色关系及树冠不同冠层部位光质组成对树体光合特性及果实品质的影响规律。【拟解决的关键问题】运用多元统计分析方法,建立不同波长可见光绝对辐射能与光合特性及果实品质的多元关系,分析影响光合特性及果实品质的主要可见光波长组成,为灵武长枣高效栽培实践光质调控方面提供理论和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验于2019年5月至10月在宁夏大学科研教学实习基地进行(N38°47'07", E106°04'00", 海拔高度1 116.8 m),属于半干旱气候区,年平均日照时数3 000 h,日温差13℃,年均≥10℃积温3 300℃,无霜期140~160 d,年均气温8.5℃,年均降水量180~200 mm,土壤为灌淤土壤。

试验于2019年4月中旬至10月初进行。试验前,在田间灵武长枣种植园采用五点取样法随机选取5株生长健壮且树势均一的7年生灵武长枣嫁接苗,挂牌标记设定为试验样树,该种植园为南北行向种植,株行距2 m×3 m,平均树高为2.7 m,平均冠幅(SN×EW)为2.12 m×1.89 m,树形为改良纺锤形,常规栽培管理。利用水肥一体化装置采用滴灌形式保证水肥供应的一致性。在树冠半径的剖面上,按从上到下将树冠均匀划分为上层、中层和下层三层,将已分出的树冠中层从内到外均匀划分为内部、中部和外部三个部分。

1.2 方 法

1.2.1 树冠不同冠层光质

采用ATP2000光纤光谱仪于09:00~11:00分别在选定的5个样株划分的不同冠层内连续随机选取10个代表点,测定其350~770 nm光质成分的绝对辐射能分布。于7月中旬和8月中旬各测定1次。

1.2.2 树冠不同冠层光合特性的测定

于7和8月中旬各测定1次光合指标,选取晴朗的天气于09:00~11:00用TARGAS-1便携式光合测定仪测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)、有效水分利用率(WUE),5个样株各冠层内随机选择10片成熟功能叶片进行测定,每片叶的测定中仪

器自动重复5组数据。

1.2.3 树冠不同冠层叶绿素荧光特性

采用OS5P型便携式脉冲调制叶绿素荧光仪(Opti-science, USA)在Yield和Kinetic模式下,分别对灵武长枣成熟叶片的叶绿素荧光参数进行测定。Kinetic模式下测定前,叶片暗处理15~20 min。5个样株各冠层内随机选择10片成熟功能叶片测定,每片叶的测定中仪器自动重复5组数据。

1.2.4 树冠不同冠层果实品质

于果实成熟期(9月28日)对每样株分别从每个冠层的东、西、南、北及上、中、下、里、外9个方向采取枣吊基部第2节处同一批开花结果的无病虫害果实(约20个)。各冠层果实混合后放入4℃冰箱保存用来测定果实品质各指标。

果肉总糖含量:参照邹琦^[9]的方法,采用蒽酮-硫酸比色法测定。

果肉可滴定酸含量:采用酸碱中和法测定。

果皮花青素含量:采用pH值示差法测定。

果皮叶绿素、类胡萝卜素含量:采用分光光度法测定。

1.3 数 据 处 理

采用Excel 2016对原始数据进行整理,采用SPSS 25.0进行方差分析与各处理间差异显著检验(Duncan新复极差法),采用Origin 2018进行相关性(Pearson)及多元统计分析。

2 结 果 与 分 析

2.1 灵武长枣不同冠层的光质分布

研究表明,灵武长枣不同冠层可见光绝对辐射能呈极显著差异($P_{\text{紫光}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{蓝光}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{绿光}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{黄光}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{橙光}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{红光}} = 0.000 < 0.01$),可见光绝对辐射能均在树冠上层表现最大,灵武长枣树冠上层可截获更多的可见光绝对辐射能。不同冠层间紫光、蓝光和绿光的绝对辐射能均表现为:上层>中层>下层,下层比上层分别减少88.13%、85.78%和27.58%,波长较短的可见光绝对辐射能在不同冠层间由上到下逐渐减小;黄光、橙光和红光的绝对辐射能均表现为上层>下层>中层,中层比上层分别减少73.06%、75.44%和70.15%,表明波长较长的可见光绝对辐射

射能在树冠下层比中层截获更多。不同部位紫光、蓝光和红光的绝对辐射能均在外部最大,且蓝光和红光的绝对辐射能均表现为外部 > 中部 > 内部,内部比外部分别减少 79.22% 和 79.15%;黄

光和橙光的绝对辐射能在中部最大,绿光的绝对辐射能在内部最大,表明波长较短的蓝光和波长较长的红光的绝对辐射能在不同部位由外到内逐渐减小,而绿光的绝对辐射能恰恰相反。表 1

表 1 灵武长枣不同冠层可见光(350 ~ 770 nm) 绝对辐射能比较

Table 1 The comparison of 400 – 750 nm spectrum difference in different parts of the tree canopy in Lingwu Long jujube ($\mu\text{m}^2 / (\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$)

指标 Index	紫光 (350 ~ 455 nm) Purple	蓝光 (455 ~ 492 nm) Blue	绿光 (492 ~ 577 nm) Green	黄光 (577 ~ 597 nm) Yellow	橙光 (597 ~ 622 nm) Orange	红光 (622 ~ 770 nm) Red
上层 Top	79.41 ± 4.269 0 ^A	77.15 ± 10.172 0 ^A	21.50 ± 3.724 0 ^A	53.57 ± 4.172 2 ^A	59.65 ± 5.141 8 ^A	123.94 ± 35.040 8 ^A
中层 Middle – leve	48.09 ± 5.300 9 ^B	32.47 ± 3.953 7 ^B	16.94 ± 4.445 3 ^{AB}	14.43 ± 4.279 0 ^C	14.65 ± 2.460 9 ^B	32.02 ± 4.773 6 ^C
下层 Substrate	9.42 ± 1.841 2 ^C	10.97 ± 2.959 2 ^C	15.57 ± 4.173 4 ^{AB}	17.31 ± 3.228 3 ^C	14.71 ± 3.451 7 ^B	37.02 ± 3.914 3 ^C
内部 Inner	14.80 ± 2.535 2 ^C	8.61 ± 1.788 6 ^C	17.07 ± 2.489 2 ^{AB}	7.46 ± 2.012 0 ^C	11.27 ± 2.839 4 ^B	25.26 ± 4.088 8 ^C
中部 Middle part	10.73 ± 3.298 8 ^C	11.86 ± 3.261 3 ^C	16.42 ± 4.010 5 ^{AB}	49.42 ± 8.600 0 ^A	57.12 ± 7.327 2 ^A	30.56 ± 5.666 7 ^C
外部 Outer	54.28 ± 5.548 7 ^B	41.44 ± 5.529 9 ^B	14.24 ± 3.157 8 ^C	30.89 ± 4.216 2 ^B	13.01 ± 4.485 4 ^B	121.16 ± 18.078 0 ^B

注:所有数据均为平均值 ± 标准误差;数据后不同大写字母代表各处理间差异显著($P < 0.01$)

Note: All data are average ± standard errors; different uppercase letters represent very significant differences in the interaction between the treatments ($P < 0.01$)

2.2 灵武长枣不同冠层叶片光合参数差异性比较

研究表明,灵武长枣不同冠层叶片光合参数均呈显著差异($P_{Tr} = 0.044 < 0.05$, $P_{Gs} = 0.036 < 0.05$, $P_{Pn} = 0.025 < 0.05$, $P_{Ci} = 0.017 < 0.05$, $P_{WUE} = 0.039 < 0.05$),其中叶片 Tr 、 Gs 和 Pn 均在上层表现最大,内部表现最小,上层是内部的 1.9 ~ 3.3 倍,而叶片 Ci 和 WUE 在外部表现最大。不同层间叶片 Tr 和 Gs 均表现为上层 > 中层 > 下层,下层比上层分别减少

了 30.00% 和 54.45%;叶片 Pn 和 WUE 均表现为上层 > 下层 > 中层,中层比上层分别减少了 47.83% 和 42.41%,中层叶片 Ci 比下层减少 18.32,叶片 Tr 和 Gs 在不同冠层间由上到下逐渐减小,而叶片 Pn 和 WUE 在中层最小。不同部位叶片 Tr 、 Gs 、 Pn 、 Ci 和 WUE 均表现为外部 > 中部 > 内部,内部比外部分别减少了 33.32%、36.87%、62.55%、36.21%、44.12%,叶片 Tr 、 Gs 、 Pn 、 Ci 和 WUE 在不同部位由外到内逐渐减小。表 2

表 2 灵武长枣不同冠层叶片光合参数比较

Table 2 The comparison of photosynthetic parameters of different parts of the tree canopy leaves in Lingwu long jujube

指标 Index	蒸腾速率 Tr $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	气孔导度 Gs $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	净光合速率 Pn $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	细胞间 CO_2 浓度 Ci ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	有效水分利用率 WUE $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
上层 Top	4.00 ± 1.364 ^a	286.01 ± 68.121 ^a	8.97 ± 4.010 ^a	344.14 ± 41.794 ^{bc}	2.24 ± 1.148 ^a
中层 Middle – leve	3.63 ± 1.348 ^{ab}	230.63 ± 91.571 ^{ab}	4.68 ± 2.542 ^{cd}	294.11 ± 54.835 ^d	1.29 ± 1.565 ^b
下层 Substrate	2.80 ± 1.187 ^{bc}	130.29 ± 86.839 ^c	6.18 ± 3.718 ^b	359.92 ± 40.766 ^{ab}	2.21 ± 1.876 ^a
内部 Inner	2.09 ± 1.122 ^c	113.58 ± 84.120 ^c	2.79 ± 1.567 ^d	257.22 ± 59.489 ^d	1.33 ± 1.618 ^b
中部 Middle part	2.38 ± 1.172 ^c	163.74 ± 62.527 ^{bc}	3.32 ± 1.490 ^d	324.47 ± 46.239 ^c	1.35 ± 1.249 ^b
外部 Outer	3.13 ± 1.251 ^{ab}	179.91 ± 66.335 ^{bc}	7.45 ± 3.999 ^{ab}	403.25 ± 71.707 ^a	2.38 ± 1.497 ^a

注:所有数据均为平均值 ± 标准误差;数据后不同小写字母代表各处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: All data are average ± standard error; different lowercase letters after the data represent significant differences between treatments ($P < 0.05$)

2.3 灵武长枣不同冠层叶片叶绿素荧光参数差异性比较

研究表明,灵武长枣不同冠层叶片叶绿素荧光参数 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 、qP 均无差异。不同层间叶片 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Yield 均表现为上层 > 中层 > 下层,下层比上层分别降低了 14.42%、11.36%、55.50% 和 62.50%;叶片 qP 和 NPQ 表现为下层 > 上层 > 中层,中层比下层降低了 6.25% 和 21.33%,叶片 F_m 、 F_v/F_m 、ETR 和 Yield

在不同冠层间由上到下逐渐减小,而叶片 qP 和 NPQ 均在中层最小。不同部位叶片 F_v/F_m 、qP 和 ETR 均表现为内部 > 中部 > 外部,外部比中部分别降低了 8.98%、14.12%、40.54%;而叶片 F_o 和 Yield 表现为中部 > 外部 > 内部,中部比内部分别降低了 11.92%、40.91%,叶片 F_v/F_m 、qP 和 ETR 在不同部位由内到外逐渐减小,而 F_o 和 Yield 均在外部最小。表 3

表 3 灵武长枣不同冠层叶片的叶绿素荧光参数比较

Table 3 The comparison of chlorophyll fluorescence parameters of different parts of the tree canopy leaves in Lingwu long jujube

指标 Index	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	最大光能转换效率 F_v/F_m	光化学猝灭系数 qP	非光化学猝灭系数 NPQ	表观电子传递速率 ETR	光合量子产额 Yield
上层 Top	150 ± 21.289 ^a	534 ± 82.034 ^a	2.73 ± 0.355 2 ^a	0.79 ± 0.056 5 ^a	1.81 ± 0.359 6 ^{bc}	3.91 ± 0.432 ^a	0.16 ± 0.022 8 ^b
中层 Middle - leve	153 ± 26.192 ^a	525 ± 73.182 ^a	2.72 ± 0.443 3 ^a	0.75 ± 0.135 6 ^a	1.66 ± 0.640 ^{bc}	2.03 ± 0.670 2 ^{cd}	0.07 ± 0.019 1 ^c
下层 Substrate	139 ± 12.967 ^a	457 ± 52.067 ^a	2.42 ± 0.350 7 ^a	0.80 ± 0.011 4 ^a	2.11 ± 0.119 7 ^{ab}	1.74 ± 0.141 4 ^d	0.06 ± 0.031 2 ^c
内部 Inner	133 ± 10.473 ^a	438 ± 34.740 ^a	2.45 ± 0.338 6 ^a	0.85 ± 0.025 8 ^a	2.51 ± 0.282 a	3.33 ± 0.928 7 ^{ab}	0.13 ± 0.045 8 ^b
中部 Middle part	151 ± 11.456 ^a	429 ± 90.324 ^a	2.29 ± 0.150 6 ^a	0.76 ± 0.074 8 ^a	0.55 ± 0.090 3 ^d	2.75 ± 0.544 7 ^{bc}	0.22 ± 0.045 6 ^a
外部 Outer	141 ± 14.272 ^a	440 ± 60.654 ^a	2.23 ± 0.425 8 ^a	0.73 ± 0.134 1 ^a	1.36 ± 0.509 0 ^e	1.98 ± 0.607 6 ^{cd}	0.16 ± 0.017 9 ^b

注:所有数据均为平均值 ± 标准误差;数据后不同小写字母代表各处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: All data are average ± standard error; different lowercase letters after the data represent significant differences between treatments ($P < 0.05$)

2.4 灵武长枣不同冠层果实品质差异性比较

研究表明,灵武长枣不同冠层果实品质均存在显著差异 ($P_{\text{可滴定酸}} = 0.048 < 0.05$, $P_{\text{可溶性糖}} = 0.031 < 0.05$, $P_{\text{叶绿素}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{类胡萝卜素}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{花色素苷}} = 0.000 < 0.01$, $P_{\text{类黄酮}} = 0.000 < 0.01$),其中可滴定酸、可溶性糖、类胡萝卜素均在外部表现最大,而花色素苷和类黄酮均在中部表现最大,叶绿素在内部表现最大。不同层间叶绿素和类黄酮均表现为下层 > 中层 > 上层,上层比下层分别减少了 11.04% 和 11.90%;类胡萝卜素和花色素苷均表现为中层 > 下层 > 上层,上层比中层分别减少了 2.25% 和 10.71%;而可滴定酸和可溶性糖均在上层达到最大;叶绿素、类黄酮、类胡萝卜素和花色素苷均在上层最小。不同部位可滴定酸和可溶性糖均表现为外部 > 中部 > 内部,内部比外部分别减少了 20.34% 和 25.73%;而叶绿素和类胡萝卜素均表现为内部 > 外部 > 中部,中部比内部分别减少了 39.04% 和

4.14%;花色素苷和类黄酮均在中部表现最大。

表 4

2.5 灵武长枣不同冠层光质与光合特性及果实品质的相关性

研究表明,除绿光外,红光与其他可见光均呈显著或极显著正相关,其中相关系数较高的有紫光(相关系数为 0.852)、蓝光(相关系数为 0.936)和红光(相关系数为 0.624);紫光与蓝光呈极显著正相关(相关系数为 0.952);蓝光和橙光呈显著正相关(相关系数为 0.562);黄光和橙光呈极显著正相关(相关系数为 0.915)。Tr 与蓝光和紫光均呈极显著正相关;Gs 与紫光、蓝光、橙光和红光呈显著或极显著正相关;Pn 与紫光、蓝光、黄光、橙光和红光呈显著或极显著正相关;Ci 与蓝光、橙光和红光呈显著或极显著正相关;WUE 与紫光、蓝光、橙光和红光呈显著或极显著正相关。 F_o 与蓝光和红光均呈极显著正相关; F_m 与紫光、蓝光、橙光和红光呈显著或极显著正相关; F_v/F_m 紫光、蓝光和红光

呈显著或极显著正相关;qP 与蓝光呈显著正相关,与红光呈极显著正相关;NPQ 与紫光、蓝光、红光呈显著或极显著正相关;ETR 与紫光、蓝光、黄光、橙光和红光呈显著或极显著正相关;Yield 与紫光和红光均呈显著正相关。可滴定酸与紫光、蓝光、绿光和红光均呈显著正相关;可溶性糖与紫光、蓝光、橙光和红光呈显著或极显著正相关,与绿光呈极显

著负相关;类胡萝卜素与紫光、蓝光、黄光和红光呈显著或极显著正相关,与绿光呈显著负相关;叶绿素与蓝光、绿光、黄光和红光呈显著或极显著正相关,与橙光呈显著负相关;花色苷与蓝光呈极显著正相关,与绿光呈极显著负相关;类黄酮与紫光、蓝光、黄光和橙光呈显著或极显著正相关,与绿光呈显著负相关。表 5

表 4 灵武长枣树不同冠层果实品质比较

Table 4 The of main quality of different canopy fruits in jujuba

指标 Index	可滴定酸 Titrate acid (%)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	叶绿素 Chlorophyll (mg/100g)	类胡萝卜素 Carotenoid (mg/100g)	花色苷 Anthocyanin (mg/100g)	类黄酮 Flavonoids (mg/100g)
上层 Top	0.58 ± 0.025 5 ^a	27.43 ± 2.804 5 ^{ab}	1.45 ± 0.161 5 ^{bc}	0.304 ± 0.021 7 ^c	0.50 ± 0.074 9 ^{bc}	0.37 ± 0.017 1 ^b
中层 Middle - leve	0.51 ± 0.046 8 ^{ab}	25.50 ± 3.720 ^b	1.55 ± 0.140 8 ^{bc}	0.311 ± 0.038 7 ^{ab}	0.56 ± 0.113 9 ^{abc}	0.38 ± 0.036 4 ^b
下层 Substrate	0.57 ± 0.039 7 ^a	24.72 ± 2.368 8 ^{bc}	1.63 ± 0.157 7 ^b	0.306 ± 0.022 3 ^{bc}	0.52 ± 0.071 5 ^{abc}	0.42 ± 0.028 7 ^{ab}
内部 Inner	0.47 ± 0.051 1 ^b	22.16 ± 2.814 5 ^c	1.87 ± 0.171 6 ^a	0.314 ± 0.031 1 ^a	0.42 ± 0.073 4 ^c	0.45 ± 0.029 4 ^a
中部 Middle part	0.56 ± 0.044 4 ^{ab}	26.09 ± 1.178 6 ^b	1.14 ± 0.121 1 ^c	0.301 ± 0.060 2 ^c	0.69 ± 0.073 4 ^a	0.48 ± 0.037 3 ^a
外部 Outer	0.59 ± 0.020 2 ^a	29.69 ± 1.967 7 ^a	1.62 ± 0.113 4 ^b	0.314 ± 0.057 4 ^a	0.63 ± 0.149 4 ^{ab}	0.44 ± 0.046 5 ^a

注:所有数据均为平均值 ± 标准误差;数据后不同小写字母代表各处理间差异显著 (P < 0.05)

Note: All data are average ± standard error; different lowercase letters after the data represent significant differences between treatments (P < 0.05)

2.6 影响灵武长枣光合特性及果实品质的不同波长可见光筛选

研究表明,不同波长可见光绝对辐射能和叶片光合特性及果实品质分别为不同的正态总体,灵武长枣树冠可见光绝对辐射能间的相关系数大于 0.6 的有 5 项,不同波长可见光绝对辐射能间存在多重共线性,试验应用多元相关分析,以紫光(X₁)、蓝光(X₂)、绿光(X₃)、橙光(X₄)和红光(X₅)为一个总体,蒸腾速率(Y₁)、气孔导度(Y₂)、净光合速率(Y₃)、细胞间 CO₂ 浓度(Y₄)、水分利用效率(Y₅)、初始荧光(Y₆)、最大荧光(Y₇)、最大光能转换效率(Y₈)、光化学猝灭系数(Y₉)、非光化学猝灭系数(Y₁₀)、表观电子传递速率(Y₁₁)、光合量子产额(Y₁₂)、可滴定酸(Y₁₃)、可溶性糖(Y₁₄)、叶绿素(Y₁₅)、类胡萝卜素(Y₁₆)、花色苷(Y₁₇)和类黄酮(Y₁₈)为一个总体。根据多元相关系数的大小,筛选出有利于灵武长枣叶片光合特性及果实品质的不同波长可见光绝对辐射能,并对筛选出的不同波长可见光绝对辐射能与叶片光合特性及果实品质的指标建立多元线性方程。表 5

灵武长枣叶片光合特性及果实品质主要受紫光、蓝光、绿光、橙光和红光的影响,叶片光合参数

均与蓝光呈正相关,与绿光呈负相关;Gs 与紫光和橙光均呈正相关,其他叶片光合参数均与紫光和橙光呈负相关;WUE 与红光呈正相关,其他叶片光合参数均与红光呈负相关。叶绿素荧光参数中 F_o、ETR 和 Yield 与紫光呈正相关,与蓝光呈负相关,其他叶片叶绿素参数均与紫光呈负相关,与蓝光呈正相关;F_o 和 F_m 与绿光呈负相关,其他叶片叶绿素荧光均与绿光呈正相关;F_o、ETR 和 Yield 与橙光呈正相关,其他叶片叶绿素荧光均与橙光呈正相关;F_o、F_m 和 F_v/F_m 与红光呈正相关,而其他叶片叶绿素荧光均与红光呈正相关。果实品质中可滴定酸和可溶性糖与紫光呈负相关,其他果实品质均与紫光呈正相关,叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮与蓝光呈负相关;其他果实品质均与蓝光呈正相关;叶绿素与绿光呈正相关,其他果实品质均与绿光呈负相关;可滴定酸和叶绿素与橙光呈负相关,其他果实品质均与橙光呈正相关;叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮与红光呈正相关,其他果实品质均与红光呈负相关。应用典型相关分析筛选出的影响叶片光合特性及果实品质的不同波长可见光辐射能与通过简单相关性选择的不同波长可见光辐射能存在较大差异。表 6

表5 灵武长枣不同波长可见光分布与光合特性及果实品质的相关性
Table 5 Correlation of absolute radiation energy with photosynthetic characteristics and fruit quality in jujuba

指标 Index	紫光 (350 ~ 455 nm) Purple	蓝光 (455 ~ 492 nm) Blue	绿光 (492 ~ 577 nm) Green	黄光 (577 ~ 597 nm) Yellow	橙光 (597 ~ 622 nm) Orange	红光 (622 ~ 770 nm) Red
紫光(350 ~ 455 nm) Purple	1					
蓝光(455 ~ 492 nm) Blue	0.952 **	1				
绿光(492 ~ 577 nm) Green	0.291	0.148	1			
黄光(577 ~ 597 nm) Yellow	0.404	0.562 *	-0.231	1		
橙光(597 ~ 622 nm) Orange	0.269	0.436	-0.129	0.915 **	1	
红光(622 ~ 770 nm) Red	0.852 **	0.936 **	-0.164	0.624 **	0.492 *	1
蒸腾速率 T_r	0.473	0.994 **	-0.275	0.579	0.108	1.000 **
气孔导度 G_s	0.969 **	0.867 *	0.129	0.652	0.991 **	0.984 **
净光合速率 P_n	0.911 **	0.941 **	-0.047	0.775 *	0.999 *	1.000 **
细胞间 CO_2 浓度 C_i	0.446	0.943 **	0.667	0.063	0.749 *	0.778 *
水分利用效率 WUE	0.975 **	0.856 *	-0.151	0.634	0.988 **	0.979 **
初始荧光 F_o	0.392	0.992 **	-0.314	0.306	0.139	0.917 **
最大荧光 F_m	0.725 *	-0.862 *	-0.78	0.570	0.879 *	0.986 **
最大光能转换效率 F_v/F_m	0.732 *	0.857 *	0.462	0.666	-0.530	0.705 *
光化学猝灭系数 qP	0.276	0.847 *	0.355	0.363	0.517	0.934 **
非光化学猝灭系数 NPQ	0.947 **	0.785 *	0.500	0.312	-0.831	0.914 **
表观电子传递速率 ETR	0.980 **	0.673 *	0.430	0.958 **	0.895 **	0.960 **
光合量子产额 $Yield$	0.851 *	0.874 *	-0.643	0.227	0.275	-0.746 *
可滴定酸 $Titrant\ acid$	0.773 *	0.775 *	0.891 *	0.063	0.108	0.879 *
可溶性糖 $Soluble\ sugar$	0.969 **	0.867 *	-0.984 **	-0.129	0.991 **	0.852 *
类胡萝卜素 $Carotenoid$	0.911 **	0.941 **	-0.847 *	1.000 **	0.667	0.775 *
叶绿素 $Chlorophyll$	-0.446	0.943 **	0.999 **	0.778 *	-0.749 *	1.000 **
花色素苷 $Anthocyanin$	-0.361	0.994 **	-1.000 **	-0.061	-0.016	-0.675
类黄酮 $Flavonoids$	0.975 **	0.856 *	-0.751 *	0.979 **	0.988 **	0.634

注: *, ** 分别代表相关性在 0.05、0.01 水平上显著

Note: *, ** Respectively represents the correlation at 0.05, 0.01 levels significantly

3 讨论

太阳辐射透过树冠过程中,不同波长可见光辐射能被吸收、反射和散射的程度不同,导致不同冠层叶片对可见光的吸收具有差异性。由于冠层的上层和外部受到太阳光的直射,而内部和下层主要受到太阳光的散射,太阳直射光中紫光较多,而太阳散射光中黄光较多^[10]。研究表明,灵武长枣树冠上层受到可见光(350 ~ 770 nm)绝对辐射能均比其他冠层多,上层、下层、内部和外部主要受到波长较长的红光绝对辐射能,中层主要受到波长较短的紫光绝对辐射能,中部主要受到橙光

和黄光的绝对辐射能,不同冠层间紫光和蓝光的绝对辐射能均由上层到下层依次减小,不同部位蓝光和红光的绝对辐射能均由外部到内部依次减小。

灵武长枣不同波长可见绝对光辐射能与光合特性及果实品质间的关系非常复杂,不同波长可见光之间呈显著或极显著正相关关系,表明不同波长可见绝对光辐射能之间存在不同程度的协同作用,这可为灵武长枣补光提供一定的理论依据。本研究中除绿光外,红光与其他可见光绝对辐射能均呈显著或极显著正相关,增加波长较长的红光可以提高光质质量。

表6 影响灵武长枣光合特性及果实品质的不同波长可见光的筛选及回归方程建立
Table 6 The selection and regression equation of visible light at different wavelengths affect the photosynthetic characteristics and fruit quality in Lingwu long

指标 Index	影响灵武长枣光合特性及果实品质的 不同波长可见光因子 The visible light factors of different wavelengths affect the photosynthetic characteristics and fruit quality in Lingwu long	回归方程 Regression equation	方程 F 值 F value of equation
Y_1 :蒸腾速率 T_r	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_1 = 7.819 - 0.046X_1 + 0.135X_2 - 0.320X_3 - 0.009X_4 - 0.026X_5$	0.533
Y_2 :气孔导度 G_s	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_2 = 340.110 + 0.201X_1 + 4.865X_2 - 14.183X_3 + 0.738X_4 - 1.489X_5$	4 170.266
Y_3 :净光合速率 P_n	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_3 = 17.904 - 0.280X_1 + 0.480X_2 - 0.813X_3 - 0.056X_4 - 0.023X_5$	5.810
Y_4 :细胞间 CO_2 浓度 C_i	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_4 = 865.664 - 6.089X_1 + 10.001X_2 - 34.649X_3 - 0.226X_4 - 0.413X_5$	2 614.90
Y_5 :水分利用效率 WUE	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_5 = 4.628 - 0.077X_1 + 0.106X_2 - 0.171X_3 - 0.016X_4 + 0.001X_5$	0.276
Y_6 :初始荧光 F_o	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_6 = 213.693 + 0.12X_1 + 0.855X_2 - 4.835X_3 + 0.306X_4 - 0.362X_5$	63.900
Y_7 :最大荧光 F_m	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_7 = 624.236 - 2.237X_1 + 7.355X_2 - 9.407X_3 - 0.837X_4 - 1.839X_5$	2 178.700
Y_8 :最大光能转换效率 F_v/F_m	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_8 = 2.382 - 0.006X_1 + 0.023X_2 + 0.011X_3 - 0.005X_4 - 0.007X_5$	0.045
Y_9 :光化学猝灭系数 qP	X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 :红光	$Y_9 = 0.236 - 0.004X_2 + 0.036X_3 - 0.001X_4 + 0.001X_5$	0.002
Y_{10} :非光化学猝灭 系数 NPQ	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{10} = -3.155 - 0.032X_1 + 0.015X_2 + 0.369X_3 - 0.042X_4 + 0.008X_5$	0.454
Y_{11} :表观电子传递 速率 ETR	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{11} = -10.664 + 0.092X_1 - 0.192X_2 + 0.773X_3 + 0.016X_4 + 0.036X_5$	0.758
Y_{12} :光合量子产额 Yield	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{12} = -0.343 + 0.009X_1 - 0.016X_2 + 0.022X_3 + 0.004X_4 + 0.003X_5$	0.004
Y_{13} :可滴定酸 Titrate acid	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_5 :红光	$Y_{13} = 1.042 - 0.006X_1 + 0.010X_2 - 0.032X_3 - 0.001X_5$	0.002
Y_{14} :可溶性糖 Soluble sugar	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{14} = 43.543 - 0.015X_1 + 0.148X_2 - 1.341X_3 + 0.056X_4 - 0.006X_5$	6.455
Y_{15} :叶绿素 Carotenoid	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{15} = -0.335 + 0.004X_1 - 0.018X_2 + 0.134X_3 - 0.013X_4 + 0.006X_5$	0.058
Y_{16} :类胡萝卜素 Chlorophyll	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光	$Y_{16} = 0.271 + 0.001X_1 - 0.001X_2 + 0.002X_3$	0.000
Y_{17} :花色素苷 Anthocyanin	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{17} = 1.543 + 0.002X_1 + 0.003X_2 - 0.070X_3 + 0.005X_4 - 0.002X_5$	0.009
Y_{18} :类黄酮 Flavonoids	X_1 :紫光; X_2 :蓝光; X_3 :绿光; X_4 :橙光; X_5 : 红光	$Y_{18} = 0.248 + 0.004X_1 - 0.009X_2 + 0.010X_3 + 0.002X_4 + 0.002X_5$	0.002

光合作用是植物体内重要的生理过程,而光是光合作用的基础。植物对可见光的吸收中,红、橙光主要是被叶绿素吸收,其次蓝、紫光也能被叶绿素、胡萝卜素吸收^[11]。光质对叶片气孔的结构和特性有影响^[12]。蓝光对植物叶片的气孔导度具有重要诱导作用^[13]。气孔作为植物光合作用过程中 CO_2 的输入和水蒸气的输出通道,因此气孔导度对植物的净光合速率和蒸腾速率具有重大意义,试验发现,灵武长枣叶片的蒸腾速率和气孔

导度从树冠上层到下层及外部到内部依次减小,叶片光合参数均与蓝光绝对辐射能呈正相关,与绿光绝对辐射能呈负相关,蓝光很大程度上可以改变灵武长枣光合作用,而绿光可以抑制灵武长枣光合作用。

叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,与光合的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映植物光合的内在

特征指标,是分析植物光合生理的重要技术手段^[14]。有研究报道,红光照射下 F_o 、 F_m 均显著高于其他光质,表明红光有利于PS II电子传递,增加草莓的荧光产量^[15]。 F_v/F_m 反应PS II反应中心的最大光能转化效率,可作为光抑制的指标。红蓝混合光处理能显著提高叶用莴苣^[16]和葡萄试管苗^[17]的 F_v/F_m 值。试验发现,灵武长枣叶片荧光参数 F_m 、 F_v/F_m 、ETR和Yield从树冠上层到下层依次减小,这与红光和蓝光的绝对辐射能变化一致。

不同冠层光质组成与果实品质及着色有着密切的关系,不同光质组成可以调节糖和酸的代谢。陈田甜^[18]研究发现,红光能提高番茄的糖酸含量。宋哲等^[19]研究表明,蓝紫光对果实着色最为有效,本研究中灵武长枣果实可滴定酸和可溶性糖从树冠上层到下层依次减小,采用多元相关分析表明紫光绝对辐射能与类胡萝卜素、叶绿素、花色素苷及类黄酮均呈正相关,而可滴定酸、可溶性糖和花色素苷与蓝光绝对辐射能呈正相关,叶绿素与绿光绝对辐射能呈正相关,叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮与红光绝对辐射能呈正相关。进一步分析表明增加紫光和红有利于果实着色,减少绿光可减少叶绿素。灵武长枣光合特性及果实品质与不同光质组成之间的关系复杂,试验进一步表明应用简单的相关性分析无法解释灵武长枣光合特性及果实品质与不同光质组成之间的关系,不同光合特性指标和果实品质受不同光质组成的影响各异,不同光合特性指标和果实品质受不同波长可见光的共同作用。

4 结论

灵武长枣不同冠层光质分布存在极显著差异。波长较短的可见光绝对辐射能由上到下逐渐减小,蓝光和红光的绝对辐射能由外到内逐渐减小。叶片光合参数由外到内逐渐减小。叶绿素荧光参数 F_m 、 F_v/F_m 、ETR和Yield由上到下逐渐减小, F_v/F_m 、qP和ETR由内到外逐渐减小,滴定酸、可溶性糖、类胡萝卜素均在树冠外部表现最大,而花色素苷和类黄酮在树冠中部表现最大,叶绿素在树冠内部表现最大。不同波长可见光绝对辐射能对灵武长枣叶片光合参数、叶绿素荧光参数、果实品质等方面都有一定的影响,增加波长较

长的红光可以提高光质质量,红光是灵武长枣光合特性及果实品质的主要影响因子,在生产中补充370~470 nm和600~770 nm波长的光质,以提高叶片光合作用及果实品质。

参考文献 (References)

- [1] 张现征. 光质调控番茄植株生长及果实品质的机理研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
ZHANG Xianzheng. Study on the mechanism of light quality regulating tomato plant growth and fruit quality [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [2] 孔云, 王绍辉, 沈红香, 等. 不同光质补光对温室葡萄新梢生长的影响 [J]. 北京农学院学报, 2006, (3): 23-25.
KONG Yun, WANG Shahui, SHEN Hongxiang, et al. The effect of different light quality on the growth of greenhouse grape shoots [J]. Journal of Beijing Agricultural College, 2006, (3): 23-25.
- [3] 苏天星. 光质对温室甜椒生长的影响机理及模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
SU Tianxing. Mechanism and Simulation of the effect of light quality on the growth of sweet pepper in greenhouse [D]. Nanjing: University of Information Engineering, 2011.
- [4] 姜仲书, 张光伦, 江国良, 等. 金冠苹果树冠内光质构成及其与果实品质的相关性 [J]. 果树学报, 2008, (5): 625-629.
JIANG Zhongshu, ZHANG Guanglun, JIANG Guoliang, et al. Composition of light quality in crown of golden crown apple and its correlation with fruit quality [J]. Journal of Fruit Trees, 2008, (5): 625-629.
- [5] 姜仲书. 金冠苹果树冠内光质构成与果实品质、光合特性的相关性研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
JIANG Zhongshu. Study on the correlation between the composition of light quality in the crown of golden crown apple and its fruit quality and photosynthetic characteristics [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [6] Li Dan, Zhao Jinghua, et al. Study on the relationship between light distribution characteristics of pear canopy and leaf area index [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26 (3): 227-230.
- [7] 王海波, 王帅, 王孝娣, 等. 葡萄叶片衰老过程中不同光质对其光合和叶绿体超微结构的影响 [J]. 园艺学报, 2019, 46 (2): 205-214.
WANG Haibo, WANG Shuai, WANG Xiaodi, et al. Effect of different light quality on Photosynthesis and chloroplast ultrastructure of grape leaves during senescence [J]. Journal of Horticulture, 2019, 46 (2): 205-214.
- [8] Liu Guoqin, fan Weiguo, long Linglu. Photosynthetic characteristics of navel orange and the influence of canopy light energy distribution on leaf photosynthetic rate [J]. Journal of Mountain Agricultural Biology, 2006, (2): 124-127.

- [9] 邹琦. 植物生理学实验指导书[M]. 北京:中国农业出版社, 2007.
- ZOU Qi. *Experimental instruction of plant physiology* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007.
- [10] Zhang Guanglun. Study on the effect of fruit quality formation and ecological factors [a]. China Association of science and technology, Jilin Provincial People's government. New opportunities and challenges in the new century - knowledge innovation and development of high and new technology industry (Volume II) [C]. China Association of science and technology, Jilin Provincial People's Government; Academic Department of China Association of science and technology, 2001;1
- [11] 杨世杰. 植物生物学[M]. 北京:科学出版社,2000,403.
- YANG Shijie. *Plant biology* [M]. Beijing: Science Press, 2000403
- [12] 江明艳,潘远智. 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响[J]. 园艺学报,2006,(2):338-343.
- JIANG Mingyan, PAN Yuanzhi. The effect of different light quality on the photosynthetic characteristics and growth of potted primary red [J]. *Journal of Horticulture*, 2006,(2): 338-343.
- [13] 陈倩倩,范阳阳,郝影宾,等. 不同土壤水分含量对玉米气孔发育过程和蒸腾耗水量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011,29(3):75-79,95.
- CHEN Qianqian, FAN Yangyang, HAO Yingbin, et al. Effect of different soil moisture content on stomatal development and transpiration water consumption of maize [J]. *Agricultural in Arid Areas*, 2011,29(3): 75-79,95.
- [14] 张松勇. 不同光质对紫苏光合特性的影响[J]. 热带作物学报,2017,38(3):444-449.
- ZHANG Songyong. Effect of different light quality on Photosynthetic Characteristics of Perilla [J]. *Journal of Tropical Crops*, 2017(3): 444-449
- [15] 刘庆. 不同光周期及光质对草莓生理特性及品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
- LIU Qing. *Effects of different light periods and light quality on physiological characteristics and quality of strawberry* [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015
- [16] 李雯琳,郁继华,张国斌,等. LED光源不同光质对叶用莴苣幼苗叶片气体参数和叶绿素荧光参数的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2010,45(1):47-51.
- LI Wenlin, YU Jihua, ZHANG Guobin, et al. The influence of LED light source on the gas parameters and chlorophyll fluorescence parameters of lettuce seedlings. [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010,45(1): 47-51.
- [17] 马绍英,李胜,张真,等. LED光源不同光质下葡萄试管苗增殖和叶绿素荧光动力学特征[J]. 甘肃农业大学学报,2013,48(1):56-62.
- MA Shaoying, LI Sheng, ZHANG Zhen, et al. Growth and chlorophyll fluorescence kinetics of Grape Plantlets in vitro under different light quality with LED light source [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013,48(1): 56-62.
- [18] 陈田甜. 不同光质对番茄果实品质形成的影响[D]. 广州:华南农业大学,2016.
- CHEN Tiantian. *Effect of different light quality on the formation of tomato fruit quality* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [19] Song Zhe, Li Tianzhong, Xu guixuan, GuDajun, he Mingli, Zhang Chunbo. The effect of light quality on the fruit coloring of Red Fuji apple [J]. *Journal of Ecology*, 2009,29(5): 2304-2311.

Effects of Different Canopy Light Quality Composition on Photosynthetic Characteristics and Fruit quality of Lingwu Long Jujube

CHEN Lihua, SONG Lihua, GAO Lu, XIE Yun, JIANG Wenqian

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: **[Objective]** In order to explore the effects of different canopy light quality components on photosynthetic characteristics and fruit quality of jujube, the main wavelengths of visible light that affect photosynthetic characteristics and fruit quality were selected. **[Method]** The composition of light quality, photosynthetic characteristics and fruit quality of different canopy of jujube were determined by variance analysis and multivariate statistical analysis. **[Result]** The total absolute radiant energy of different canopy of jujube was as follows: upper layer > outer layer > middle layer > middle layer > lower layer > inner layer; the red absolute radiant energy accounted for the total of different canopy respectively from upper layer to lower layer and from inner to outer layer 29.85%, 20.19%, 35.26%, 29.90%, 17.35 and 44.05% of absolute radiation. The photosynthetic parameters of leaves were positively correlated with the absolute of blue light, negatively correlated with the absolute radiation energy of green light; the carotenoids, chlorophyll, anthocyanins and flavonoids were positively correlated with the absolute radiation energy of violet light, while the titratable acids, soluble sugars and anthocyanins were positively correlated with the absolute radiation energy of blue light, the chlorophyll was positively correlated with the absolute radiation energy of green light, and the chlorophyll and carotenoids were positively correlated with the absolute radiation energy of blue light. There was a positive correlation between auxin and flavonoids and the absolute radiant energy of red light. **[Conclusion]** Increasing longer wavelength of red light can improve the quality of light. Red light is the main factor affecting the photosynthetic characteristics and fruit quality of jujube. It is suggested to supplement 370–470 nm and 600–770 nm wavelength of light quality in production to improve leaf photosynthesis and fruit quality.

Key words: Lingwu long; Jujube light quality composition; photosynthetic characteristics; fruit quality

Fund project: National Natural Science Foundation Project (31760203); Graduate Innovation Project of Ningxia University (gip2019009).

Correspondence author: Song Lihua (1969 –), female, Ningxia, Professor, master's supervisor, mainly engaged in the teaching and research work of forest breeding and economic forest cultivation physiology, (E-mail) slh382@126.com