中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响

谢辉，张雯，韩守安，王敏，阿力木江·奥布力，潘明启，艾尔买克·才卡斯木，张平

引用本文:
谢辉, 张雯, 韩守安, 等. 扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 704-715.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200812

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冬小麦光合特性对CO2浓度与土壤含水量的响应机制

Response mechanism of photosynthetic characteristics of winter wheat to CO2 concentration and soil water content

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1034-1041 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161167

遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响

Effects of shading and nitrogen rate on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield of winter wheat

中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1177-1184 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160207

交替灌溉对小麦/蚕豆间作系统作物生理生态特性的影响

Effects of alternative irrigation on eco-physiological characteristics of wheat/faba-bean intercropping

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 883-892 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151313

|冬小麦间作模式下树冠结构对间作区域光环境的影响

Effect of tree canopy structure on light condition in almond-winter wheat intercropping systems

中国生态农业学报. 2016, 24(6): 753-761 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151160

枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究

Canopy light distribution and yield of winter wheat in jujube-wheat strip intercropping system

中国生态农业学报. 2016(2): 183-191 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150885

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 4 月 第 29 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2021, 29(4): 704−715

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200812

谢辉, 张雯, 韩守安, 王敏, 阿力木江·奥布力, 潘明启, 艾尔买克·才卡斯木, 张平. 扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 704−715

XIE H, ZHANG W, HAN S A WANG M, Alimujiang Aubrey, PAN M Q, Aiermaike Caikasimu, ZHANG P. Effect of shading degree on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage in an almond-winter wheat intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 704−715

扁桃-冬小麦间作系统树冠截光程度对小麦产量和灌浆期光合特性的影响*

谢 辉[1], 张 雯[1**], 韩守安[1], 王 敏[1], 阿力木江·奥布力[2], 潘明启[1], 艾尔买克·才卡斯木[1], 张 平[3]

(1. 新疆农业科学院园艺作物研究所/农业部新疆地区果树科学观测试验站 乌鲁木齐 830091; 2. 和田地区林业和草原局 和田 848000; 3. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所 乌鲁木齐 830091)

摘 要: 为探明果粮间作模式下树冠遮阴对间作冬小麦灌浆期光合特性和产量的影响, 为新疆南疆果粮间作模式的选择和优化提供理论依据, 本研究以扁桃-冬小麦间作模式为研究对象, 设置重度遮阴和轻度遮阴 2 个处理, 以单作小麦为对照, 对间作区域光合有效辐射(PAR)、小麦产量及灌浆期叶片光合色素和可溶性蛋白含量、光响应曲线、荧光动力学参数、群体光合速率进行测定。结果表明: 间作区域遮阴程度受树冠结构和间作区域距树体距离共同影响, 主干分层形扁桃(重度遮阴)近冠和远冠间作区域小麦灌浆期 PAR 日均值为自然光强的 18.61%和 25.90%, 小冠圆头形扁桃(轻度遮阴)对应值为 56.00%和 64.53%。与扁桃间作导致小麦旗叶 Chla+b 含量和 Chla/b 比值降低; PAR 日均值≤56.00%自然光时, 小麦旗叶可溶性蛋白质含量显著降低; PAR 日均值≤25.90%自然光时, 旗叶光系统Ⅱ的实际光合效率(ΦSPⅡ)、光化学淬灭系数(qP)、最大净光合速率(P_{max})及群体光合速率日均值均显著降低; PAR 日均值≥64.53%自然光时小麦群体光合速率存在明显的补偿现象。综上, 扁桃-冬小麦间作模式下, 小麦光合能力及产量与遮阴程度密切相关, 重度遮阴导致小麦单叶和群体光合能力及产量显著降低; 轻度遮阴条件下, 小麦旗叶光合能力无显著变化, 群体光合速率存在明显的补偿现象, 对产量无显著影响。

关键词: 扁桃-冬小麦间作; 树形; 遮阴强度; 间作区域; 光合特性; 产量

中图分类号: S512.1; S311 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effect of shading degree on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage in an almond-winter wheat intercropping system*

XIE Hui[1], ZHANG Wen[1**], HAN Shou'an[1], WANG Min[1], Alimujiang Aubrey[2], PAN Mingqi[1], Aiermaike Caikasimu[1], ZHANG Ping[1]

(1. Institute of Horticultural Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences / Scientific Observing and Experimental Station of Pomology (Xinjiang), Urumqi 830091, China; 2. Forestry and Grassland Administration of Hetian Prefecture, Hetian 848000, China;

* 国家自然科学基金地区基金项目(31560138)和新疆维吾尔自治区优秀青年科技人才培养项目(qn2016yx0234)资助

** 通信作者: 张雯, 研究方向为果园生态与果实品质调控。E-mail: zwxilin@126.com
谢辉, 研究方向为果园生态与果品加工。E-mail: xhxjnky@163.com

收稿日期: 2020-10-22 接受日期: 2021-01-19

* This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (31560138) and the Outstanding Young Science and Technology Talent Training Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (qn2016yx0234).

** Corresponding author, E-mail: zwxilin@126.com

Received Oct. 22, 2020; accepted Jan. 19, 2021

3. Institute of Agricultural Product Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Fruit tree-wheat intercropping is practiced in large parts of southern Xinjiang, a region where agroforestry intercropping is the main type of agricultural production. In the present study, a field experiment was conducted to investigate the effects of the shading degree from fruit tree canopies on the grain yield and photosynthetic characteristics of wheat at the grain filling stage. This study aimed to provide information for the selection of management standards and the optimization of the intercropping system in southern Xinjiang. In the experiment, 'Xindong 20' (*Triticum aestivum* L. var. Xindong 20), the main winter wheat cultivar in South Xinjiang, was used as the research object, and two treatments (heavy and light shading) were established by cutting the almond (*Amygdalus communis* L.) canopy of the almond-winter wheat intercropping system; delayed open-central canopy (DC) and a semicircle small-canopy (SC), respectively. Monocultured wheat was used as the control. The yield and yield components, photosynthetic pigments and soluble protein contents, light response curves, chlorophyll fluorescence induction of the flag leaves, and the canopy apparent photosynthetic rate of the intercropped wheat were investigated in three areas: near the canopy west of the almond trees, near the canopy east of the almond trees, and far from the canopy. The results indicated that the shading degree of the tree canopy was closely associated with the canopy size and the distance between the intercropping area and the tree. The daily mean values of photosynthetically active radiation (PAR) in the intercropping areas near and far from the almond canopy were 18.61% and 25.90% with DC, and 56.00% and 64.53% with SC of the natural light intensity during the wheat-filling period, respectively. The content of Chla+b and the Chla/b ratio in the wheat flag leaves were reduced in both shading treatments. When the daily mean strength of PAR was ≤56.00% of the natural light intensity, the soluble protein content in the wheat flag leaves was significantly reduced. When the daily average intensity of PAR was reduced to 25.90% and 18.61% of the natural light, the indices of optical system Ⅱ actual photosynthetic efficiency (ΦSPⅡ), photochemical quenching coefficient (qP), and maximum net photosynthetic rate (P_{max}) of the flag leaves, as well as the daily mean canopy photosynthetic rate (CAP) value, were significantly reduced. Under the light shading intercropping condition, when the daily mean intensity of PAR reached ≥ 64.53% of the natural light intensity, the CAP value exhibited an obvious increased (compensation phenomenon). In the almond-winter wheat intercropping system, the influence of a weak light environment caused by the tree canopy on wheat photosynthetic capacity and yield was closely related to the degree of shading. Heavy shading resulted in a significant decrease in single-leaf P_n and CAP and caused a significant decrease in yield. Under light shading conditions, the photosynthetic capacity of wheat flag leaves did not change, while CAP had a significant compensation phenomenon and no significant influence on grain yield.

Keywords: Almond-winter wheat crop intercropping; Tree form; Shading degree; Intercropping area; Photosynthetic characteristics; Grain yield

小麦(*Triticum aestivum* L.)是新疆主要粮食作物, 其产量和品质与粮食安全生产密切相关。特色林果是农民经济收入的重要来源, 担负着农民脱贫致富的重要使命[1]。新疆南疆地区是典型的绿洲农业生态系统, 人均耕地面积有限, 果树以间作种入农田, 形成果粮间作, 新疆南疆地区至少 50%的耕地种植果树, 70%左右的粮食、棉花(*Gossypium hirsutum* L.)等大田作物长期与果树间作[2], 小麦与各类果树间作种植面积达 3.33×10^5 hm^2[3]。果粮间作模式已成为新疆南疆地区主要农业生产模式之一。然而随着树龄的增加, 树冠体积不断扩大, 对间作区域的遮阴程度也不断加剧, 树冠截光造成的遮阴胁迫逐渐成为间作小麦减产的主要原因[4]。光合作用是小麦籽粒形成的基础, 籽粒产量 90%以上直接或间接地来源于光合作用[5]。灌浆期是决定小麦产量和籽粒品质的关键时期, 灌浆期叶片光合产物对籽粒的贡献可达 80%左右[6-7]。扁桃(*Amygdalus communis* L.)、红枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)、杏(*Armeniaca vulgaris* Lam.)、核桃(*Juglans mandshurica* Maxim.)等新疆南疆地区主栽树种长期与小麦间作, 树冠截光及对间作小麦影响程度于小麦灌浆期达到最大水平[4,8]。因此探明果粮间作模式下树冠截光程度对小麦光合特性和籽粒产量的影响, 对于间作模式优化和小麦高产栽培技术选择具有重要意义。

弱光导致单叶净光合速率下降。Burkey 和 Wells[9]研究认为, 弱光导致叶片净光合速率降低主要与单位叶面积内叶绿体数目降低、叶绿体功能改变有关。Zhao 等[10]和 Huang 等[11]研究进一步证实弱光导致光系统Ⅱ(PSⅡ)的光化学效率提高、电子传递效率下降。牟会荣等[12]关于拔节至成熟期遮光对小麦光合特性影响的研究结果表明, 遮光导致小麦旗叶可溶性蛋白含量显著降低。Xu 等[13]通过不同人工遮阴强度对冬小麦光合作用影响的研究结果表明, 重度遮阴下小麦光合能力显著降低, 而轻度遮阴条

件下小麦净光合速率(P_n)升高。张元帅等[14]研究认为遮阴导致开花期至灌浆小麦旗叶 P_n 降低，灌浆后期 P_n 维持较高水平。目前有关弱光对小麦光合影响的研究，主要通过人工遮阴进行模拟，研究也多停留在单叶水平。难以准确反映出果粮间作模式下树冠截光造成的遮阴光照交替出现的实际状况，及小麦群体的光合性能。

因此针对以上问题，本研究以新疆南疆扁桃-冬小麦间作模式为研究对象，通过树形结构及间作区域距树冠距离共同营造树冠截光梯度，研究树冠截光程度对间作冬小麦旗叶和群体光合性能及产量的影响，以期为果粮间作模式优化和间作小麦高产栽培技术的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016—2017年在新疆喀什地区莎车县阿热勒乡十四村扁桃-冬小麦间作园内进行。研究区属暖温带大陆性干旱气候，年平均气温 11.4 ℃，年日照时数为 2965 h，年平均降水量 56.6 mm，无霜期 192 d；土壤类型为沙壤土，土壤有机质含量 1.524 g·kg^{-1}，全氮含量 0.519 g·kg^{-1}，全磷含量 0.775 g·kg^{-1}，全钾含量 19.584 g·kg^{-1}，速效氮 39.067 mg·kg^{-1}，速效磷 10.129 mg·kg^{-1}，速效钾 110.333 mg·kg^{-1}。

扁桃-冬小麦间作种植模式的扁桃品种为‘晚丰’，2007年定植，株行距 6 m×7 m，南北行向；冬小麦品种为‘新冬 20’，10 月 2 日播种，采用宽窄行种植，窄行 10 cm，宽行 20 cm，播种密度 525 万粒·hm^{-2}。间作小麦种植行宽度 6 m，小麦沿果树行向种植，南北行向，边行距树干垂直距离 50 cm。

1.2 试验设置

以大田种植冬小麦为对照(CK)。通过树形修剪营造扁桃-冬小麦间作种植模式下，间作区域不同树冠遮光强度梯度。其中，以扁桃小冠圆头形树形对应间作区域为轻度遮阴处理(SC)，扁桃主干分层形树形对应间作区域为重度遮阴处理(DC)。树形特征详见图 1，树体结构指标详见表 1。同一树形连续 5 株及其东西两侧间作小麦区域为一个小区，小区面积为 168 m^2。3 次重复，2 个树形处理共设 6 个小区。

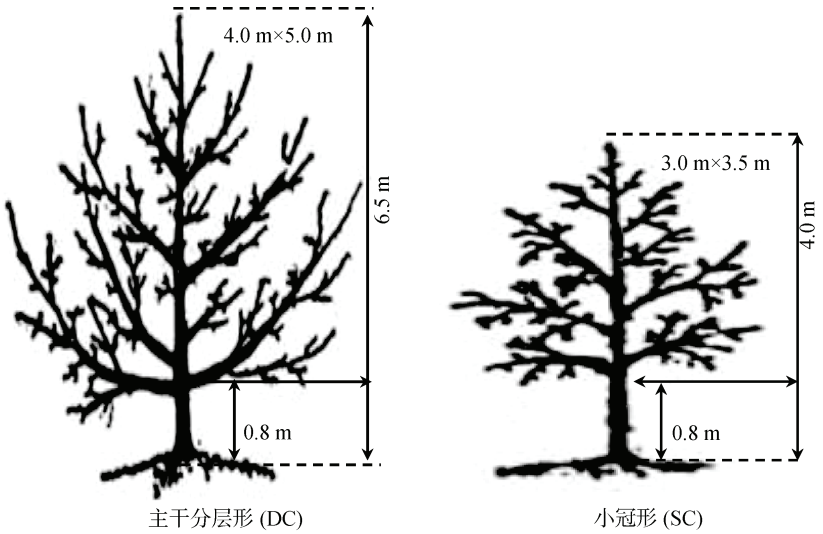

图 1 主干分层形重度遮阴(DC)和小冠形轻度遮阴(SC)扁桃树形结构示意图

Fig. 1 Sketch maps of delayed open-central canopy (DC, heavy shading) and semicircle small-canopy (SC, light shading) of almond

表 1 主干分层形重度遮阴(DC)和小冠形轻度遮阴(SC)扁桃盛果期树形结构指标

Table 1 Canopy structure indexes of delayed open-central canopy (DC) and semicircle small-canopy (SC) of almond at full bearing period

树形结构 Canopy structure	单株主枝数 Number of main branch	一年生枝量 Number of annual branch	树冠体积 Crown volume (m^3)	单位体积枝量 Number of shoot (shoots·m^{-3})	一年生枝数量区域分布比例 Annual branch distribution ratio (%)		
					外围 Outside canopy	中部 Middle canopy	内堂 Inner canopy
DC	8.4	5590.0	55.96	99.89	60	30	10
SC	7.3	1276.8	20.36	62.70	60	40	0

1.3　测点布置和测定方法

1.3.1　测点布置

根据间作区距树干的距离对间作区域进行划分，其中距树干 2~3 m 区域为近冠区，3~4 m 为远冠区域。每个区域设置 3 个测点，一个小区共设 12 个测点，具体种植模式及测点布置情况详见图 2。对环境光合有效辐射强度(PAR)、小麦旗叶对光响应曲线和荧光动力学参数及群体光合参数进行测定。

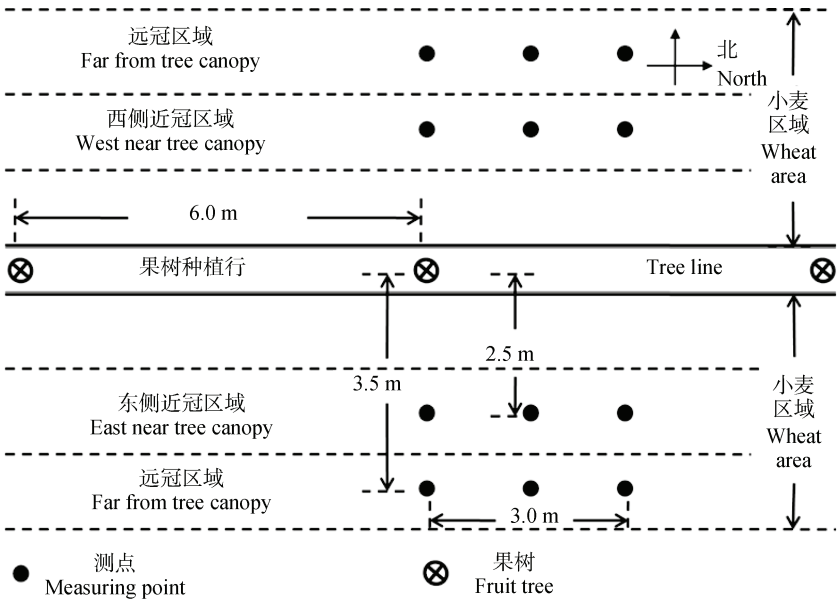

图 2　扁桃-冬小麦间作模式及测点位置示意图

Fig. 2　Sketch map of almond-winter wheat intercropping system and positions of measuring points

1.3.2　测定方法

1) PAR 日变化动态。使用 U30-NRC 小型气象站(ONESET HOBO 公司)连接的光合有效辐射探头进行测定。于一天中在太阳真时 8:00—18:00 进行连续测定，每 10 min 自动记录一次，探头高度与小麦株高保持一致。

2)旗叶光响应曲线测定。使用 Li6400 便携式光合测定系统(LICOR)，于当地太阳真时 7:00—10:00 测定。采用开放式气路，测定旗叶的光响应曲线，选取各处理 Zone1 和 Zone2 区生育进程一致的健康植株测定，采用巡回测定，各测点重复 3 次。光强($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)由高至低依次设置 2000、1700、1400、1100、900、700、500、300、200、100、50、25 和 0 等 13 个梯度。参照叶子飘等[15]方法，采用非直角双曲线模型(non-rectangular hyperbola equation)对光响应曲线进行拟合，并对表观量子效率、最大净光合速率、光饱和点、光补偿点、暗呼吸速率等指标进行求导。

3)荧光动力学参数测定。使用 FMS-2 调制式荧光测定仪，选择晴朗天气，于当地太阳真时 8:00—10:00 测定，将叶片在自然光状态下用叶夹夹上，给以一个饱和脉冲光(1800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)测定光下最大荧光($F_m'$)；叶片暗适应 30 min，给一个饱和脉冲光，测定最大荧光(F_m)，计算 PSⅡ量子效率(ΦPSⅡ)、电子传递速率(ETR)、光化学碎灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(NPQ)等参数。测定时取生长一致的叶片，由于间作导致的遮阴，不同处理和区域小麦旗叶受光状态存在一定差异，取 3 次重复平均值。

4)群体光合指标测定。使用 TPS-2 光合测定系统和同化箱(1 m×1 m×1 m)，于当地太阳真时 8:00—16:00 进行测定，每隔 2 h 测定一次。具体测定方法参照马富裕等[16]。

5)光合色素和可溶性蛋白质含量测定方法。在各采样点随机采集小麦旗叶 10 片，采用丙酮浸提法对旗叶光合色素含量进行测定，采用考马斯亮蓝比色法对旗叶可溶性蛋白含量进行测定。

6)产量及构成指标测定。于冬小麦蜡熟期(6 月 10 日)，各小区每个测点收获 0.5 m×0.5 m 的小麦全部植株，测定籽粒产量、单位面积有效穗数；同时从每小区各测点随机选取 20 株进行室内拷种，分别测穗粒数、千粒重。

1.4　数据处理方法

使用 Excle 2010 和 SAS 数理统计软件进行数据处理和统计分析，使用 OriginPro 作图。

2 结果与分析

2.1 树冠截光程度对间作区域 PAR 日变化动态的影响

不同树形处理对间作区域 PAR 峰值强度和持续时间均有较大影响。从图 3 中可以看出，轻度遮阴(小冠形，SC)处理与单作对照的差异主要表现在清晨和傍晚，受树冠截光影响 PAR 强度明显降低，其中轻度遮阴小冠形处理 Zone1、Zone2 区域 PAR 日均值分别为 938.98 μmol·m^{-2}·s^{-1} 和 1070.50 μmol·m^{-2}·s^{-1}，分别达到单作对照 PAR 日均值强度的 56.60%和 64.53%。树行两侧间作区域 PAR 峰值出现时间不同，西侧近冠区域峰值出现在 12:00 左右，东侧近冠区峰值出现在 14:00，12:00 之前东侧近冠区域处于遮阴状态，17:00 之后西侧区域处于遮阴状态。西侧近冠区域 PAR 日均值较东侧近冠区域高 8.44%。

重度遮阴(主干分层形，DC)处理近冠区、远冠区 PAR 日均值强度为 308.69 μmol·m^{-2}·s^{-1} 和 446.28 μmol·m^{-2}·s^{-1}，分别为单作对照的 18.61%和 26.90%。西侧近冠区域 PAR 日均值较东侧近冠区域高 8.22%。东侧近冠区域峰值出现在 13:00 左右，西侧近冠区域峰值出现在 17:00 左右，但两个区域峰值强度均显著低于 CK。通过树形和间作区域共同营造出果粮间作模式下的树冠截光不同遮阴强度梯度处理。

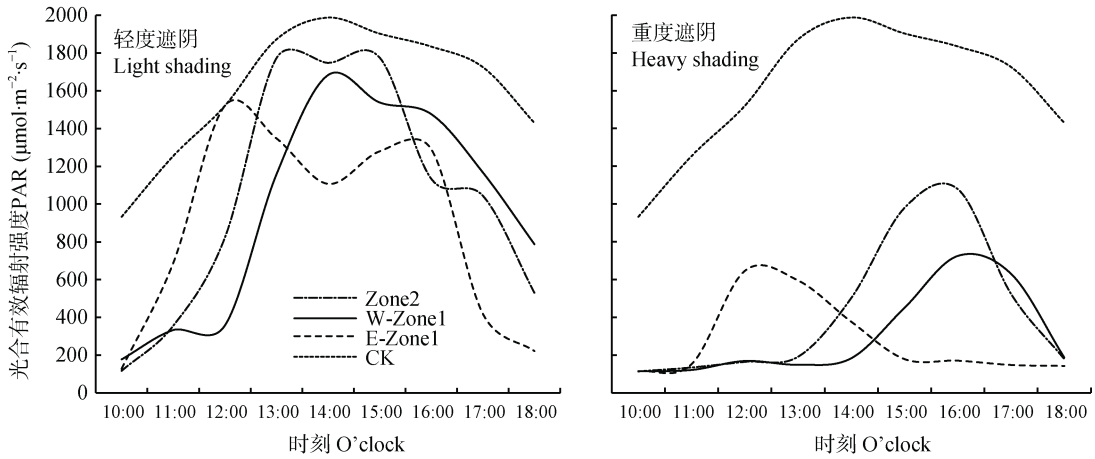

图 3 扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域小麦灌浆期光合有效辐射(PAR)的日变化

Fig. 3 Diurnal variation trends of photosynthetic active radiation (PAR) at grain-filling stage of wheat in different intercropping areas under different canopy-shading degrees (different canopy structures of almond) of almond-winter wheat intercropping system

CK 为单作; W-Zone1 为树行西侧近冠区域, E-Zone1 为树行东侧近冠区域, Zone2 为西侧远冠区域。CK is the monoculture wheat. W-Zone1 is the intercropping area near canopy on the west side of tree line, E-Zone1 is the intercropping area near canopy on the east side of tree line, Zone2 is the intercropping area far from tree canopy on the west side of tree line.

2.2 树冠截光程度对灌浆期间作冬小麦旗叶光合色素含量及光合特性的影响

叶绿体是光合作用的场所，叶绿素含量的多少和衰老的快慢对叶片光合能力有直接的影响。从表 2 可知，与对照相比，不同扁桃树冠截光程度下间作小麦旗叶叶绿素 a 含量均不同程度降低，除轻度遮阴远冠区与 CK 的差异未达到显著水平外，其他处理和区域均显著低于 CK (P<0.05)。不同处理和区域间作小麦旗叶叶绿素 b 含量表现出不同的变化趋势，其中重度和轻度遮阴处理 2 个近冠区域均显著高于 CK，轻度遮阴处理远冠区域与 CK 无显著差异，重度远冠区域显著低于 CK (P<0.05)。除轻度遮阴远冠区叶绿素 a+b 含量与 CK 间的差异不显著外，轻度遮阴近冠区和重度遮阴 2 个区域的叶绿素 a+b 含量均显著低于 CK (P<0.05)。与 CK 相比，间作不同遮阴处理小麦旗叶叶绿素 a/b 比值除轻度遮阴远冠区外均不同程度降低，降幅受遮阴程度和区域位置共同影响，各处理均显著低于对照，同时同一处理近冠区均显著低于远冠区(P<0.05)。与 CK 相比不同处理间作小麦旗叶可溶性蛋白含量表现出不同的变化趋势，其中轻度遮阴处理远冠区略高于 CK，但差异未达显著水平，轻度遮阴近冠区和重度遮阴处理 2 个区域均显著低于 CK (P<0.05)。

采用修正后的非直角双曲线模型对单作和不同遮阴强度下小麦旗叶光响应曲线进行拟合，R^2 均大于 0.9854，P 值均小于 0.001，拟合效果均较好(图 4)。与 CK 相比，间作模式下随着 PAR 强度的增加，不同遮阴程度小麦 P_n 值显著降低，反映出间作遮阴导致小麦旗叶对强光的利用能力较差。从表 3 可知，与 CK 相比，不同遮阴处理间作小麦旗叶 P_{max} 均不同程

表 2　扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域冬小麦灌浆期叶片叶绿素和可溶性蛋白含量

Table 2　Contents of chlorophyll and soluble protein in leaves of winter wheat at filling stage in different intercropping areas under different canopy-shading degrees of almond-winter wheat intercropping system

处理 Treatment	间作小麦区域 Area of intercropped wheat	叶绿素含量 Chlorophyll content ($mg \cdot g^{-1}$)			叶绿素 a/b Chla/b	可溶性蛋白含量 Soluble protein content ($mg \cdot g^{-1}$)
		叶绿素 a Chl. a	叶绿素 b Chl. b	叶绿素 a+b Chl. a+b		
轻度遮阴 Light shading	近冠区 Near canopy	2.25±0.21b	0.96±0.08a	3.21±0.27b	2.39±0.14b	14.04±0.76b
	远冠区 Far from canopy	2.42±0.22a	0.85±0.07b	3.27±0.28a	2.90±0.18a	18.44±1.36a
重度遮阴 Heavy shading	近冠区 Near canopy	2.03±0.17c	1.05±0.09a	3.08±0.24c	1.97±0.87c	11.73±0.89c
	远冠区 Far from canopy	1.98±0.12d	0.68±0.06c	2.66±0.21d	2.84±0.12d	12.46±1.03d
单作小麦 Monocultured wheat (CK)		2.52±0.23a	0.84±0.06b	3.36±0.28a	3.04±0.13a	17.06±1.14a

表内数据为平均值±标准误, 同列数据后不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。The data in the table are mean ± standard error. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level.

度降低, 轻度遮阴处理近冠区和远冠区 P_{max} 降幅分别为 23.85%和 15.55%, 与 CK 的差异均未达显著水平; 重度遮阴处理近冠区和远冠区区域 P_{max} 分别较 CK 降低 56.38%和 52.29%, 2 个区域与 CK 的差异均达显著水平($P<0.05$)。与 CK 相比轻度遮阴 2 个区域 LSP 均无显著差异, 重度遮阴 2 个区域均显著降低, 降幅分别达到 21.26%和 15.98%。与 CK 相比不同遮阴条件下小麦旗叶 R_d 均不同程度降低, 其中轻度遮阴近冠区降幅最大, 与其他处理和区域的差异均达显著水平, 远冠区降幅最小, 与 CK 的差异未达显著水平; 重度胁迫下两个区域的 R_d 均显著降低($P<0.05$)。LCP 仅轻度遮阴处理近冠区与 CK 的差异达显著水平($P<0.05$), 其他遮阴处理及区域与 CK 均无显著差异。表观量子效率可以反映植株叶片对弱光的利用能力, 与 CK 相比, 除轻度遮阴处理近冠区无变化外, 其他处理和区域均不同程度提高, 但只有重度遮阴近冠区与 CK 的差异达显著水平($P<0.05$)。

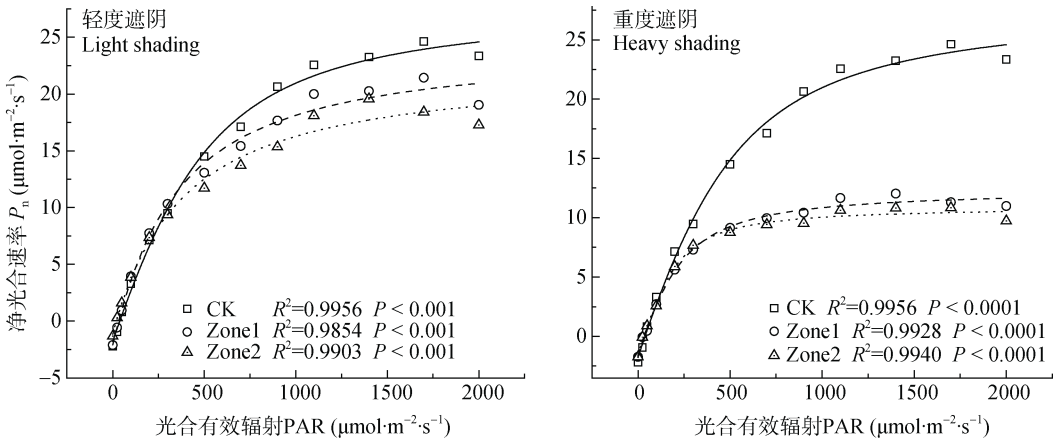

图 4　扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域冬小麦灌浆期旗叶光响应曲线

Fig. 4　Light response curves of net photosynthetic rate (P_n) of flag leaf of winter wheat at filling stage in different intercropping areas under different canopy-shading degrees of almond-winter wheat intercropping system

CK 为单作小麦, Zone1 为近冠区, Zone2 为远冠区。CK is the monocultured winter wheat. Zone1 is the area near canopy, Zone2 is the area far from canopy.

表 3　扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域冬小麦灌浆期旗叶光响应曲线参数

Table 3　Light response curve parameters of flag leaves of winter wheat at filling stages in different intercropping areas under different canopy-shading degrees of almond-winter wheat intercropping system

处理 Treatment	间作小麦区域 Area of intercropped wheat	最大净光合速率 P_{max} ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光饱和点 LSP ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	暗呼吸速率 R_d ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光补偿点 LCP ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	表观量子效率 α
轻度遮阴 Light shading	近冠区 Near canopy	18.26±1.65a	1722.29±153.41a	−1.31±0.12c	15.60±1.46b	0.05b
	远冠区 Far from canopy	20.25±1.96a	1794.60±124.12a	−2.10±0.16a	31.26±2.18a	0.06ab
重度遮阴 Heavy shading	近冠区 Near canopy	10.46±0.77b	1366.30±113.14b	−1.73±0.14b	29.26±2.06a	0.07a
	远冠区 Far from canopy	11.44±1.01b	1474.88±126.89b	−1.73±0.15b	31.98±2.78a	0.06ab
单作小麦 Monocultured wheat (CK)		23.98±2.76a	1755.39±146.21a	−2.21±0.19a	37.51±2.14a	0.05b

表内数据为平均值±标准误, 同列数据后不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。P_{max}: maximum net photosynthetic rate; LSP: light saturation point; R_d: dark respiration rate; LCP: light compensation point; α: initial quantum efficiency. The data in the table are mean ± standard error. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level.

2.3 树冠截光程度对灌浆期间作冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的影响

F_v/F_m 反映了光合机构 PSⅡ的最大光化学效率，大量研究表明在健康生理状态下，绝大多数高等植物的 F_v/F_m 为 0.8~0.87，当 F_v/F_m 下降时，代表植物受到了胁迫。因此，F_v/F_m 是研究各种环境胁迫对光合作用影响的重要指标。从表 4 可知，CK 及间作模式不同遮阴程度小麦灌浆期旗叶 F_v/F_m 值为 0.831~0.857，单因素方差分析结果表明不同处理间差异均未达显著水平(P<0.05)，表明间作模式下果树遮阴并未对小麦旗叶 PSⅡ造成明显损伤。ΦSPⅡ是光系统Ⅱ的实际光合效率，它能够反映光合机构目前实际的光能转化效率。与 CK 相比，间作模式下不同处理小麦旗叶 ΦSPⅡ均不同程度降低，降幅与遮阴程度一致，其中轻度遮阴处理 2 个区域与 CK 的差异均未达显著水平，但重度遮阴处理 2 个区域 ΦSPⅡ均显著低于 CK 和轻度遮阴处理(P<0.05)，表明果粮间作模式下，果树轻度遮阴对小麦旗叶光系统Ⅱ实际光合效率无显著影响，随着树冠遮阴程度的加剧，小麦旗叶光系统Ⅱ实际光合效率显著降低。叶绿素荧光淬灭包括光化学淬灭(qP)和非光化学淬灭(NPQ)。qP 是由光合作用引起的荧光淬灭，即反映 PSⅡ天线色素吸收的光能用于光合作用的部分，与 CK 相比，间作模式下小麦旗叶 qP 均降低，降幅与遮阴程度一致，且各处理间及与 CK 间的差异均达显著水平(P<0.05)，同一处理不同区域间的差异均未达显著水平；NPQ 代表 PSⅡ天线色素吸收的光能没有用于光合电子传递，而是以热能的形式耗散掉的部分。与 CK 相比，间作模式下各区域小麦旗叶 NPQ 均增加，增幅与遮阴程度一致，且各处理间及与 CK 间的差异均达到显著水平，同时重度遮阴处理不同区域间的差异均也达显著水平(P<0.05)。

表 4 扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域的冬小麦灌浆期旗叶荧光参数

Table 4 Effects of canopy-shading degrees on fluorescence parameters of flag leaves of winter wheat in different intercropping areas of almond-winter wheat intercropping system

处理 Treatment	间作小麦区域 Area of intercropped wheat	PSⅡ最大光化学效率 F_v/F_m	PSⅡ实际光化学效率 ΦSPⅡ	光化学猝灭系数 qP	非光化学猝灭系数 NPQ
轻度遮阴 Light shading	近冠区 Near canopy	0.853±0.04a	0.299±0.02a	0.368±0.02b	0.499±0.02c
	远冠区 Far from canopy	0.836±0.05a	0.307±0.02a	0.384±0.01b	0.482±0.02c
重度遮阴 Sever shading	近冠区 Near canopy	0.848±0.05a	0.245±0.01b	0.295±0.01c	0.633±0.04a
	远冠区 Far from canopy	0.831±0.04a	0.248±0.01b	0.314±0.01c	0.527±0.03b
单作小麦 Monocultured wheat (CK)		0.857±0.03a	0.311±0.02a	0.509±0.03a	0.401±0.02d

表内数据为平均值±标准误，同列数据后不同小写字母表示 P<0.05 水平差异显著。F_v/F_m: maximal efficiency of PSⅡ photochemistry; ΦSPⅡ: effective quantum yield of PSⅡ photochemistry; qP: photochemical quenching; NPQ: non-photochemical quenching. The data in the table are mean ± standard error. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference at P<0.05 level.

2.4 树冠截光程度对灌浆期间作冬小麦群体光合特性的影响

图 5 是扁桃-冬小麦间作系统中灌浆期不同时段小麦群体光合速率(CAP)。从图中可以看出，CK 的日均值 CAP 为 25.6 μmol·m^{-2}·s^{-1}，轻度遮阴处理远冠区和西侧近冠区日均值较 CK 分别提高 19.49%和 4.41%，东侧近冠区较 CK 降低 29.03%；重度遮阴处理远冠区、西侧近冠区和东侧近冠区日均值较 CK 分别降低 65.76%、72.17%和 51.04%。单因素方差分析结果表明，CAP 日均值轻度遮阴处理远冠区显著高于 CK，轻度遮阴处理西侧近冠区与 CK 无显著差异，轻度遮阴处理东侧近冠区及重度遮阴处理的 3 个区域均显著低于 CK (P<0.05)。CK 的 CAP 呈单峰变化曲线，峰值出现在 12:00—14:00，而下午 16:00 之后逐渐降低；轻度遮阴远冠区域呈单峰变化趋势，10:00 受遮阴影响 CAP 显著低于 CK (P<0.05)，恢复光照后 CAP 显著提高，12:00、16:00 和 18:00 显著高于 CK；轻度遮阴西侧近冠区受遮阴影响，10:00 和 12:00 显著低于 CK，恢复光照后 CAP 显著提高，14:00—18:00 均显著高于 CK；东侧近冠区域 CAP 呈单峰曲线，峰值出现在 12:00，峰值时 CAP 显著高于 CK，受遮阴影响 12:00 之后 CAP 快速下降，14:00—18:00 均显著低于 CK。重度遮阴 3 个区域全天各时段 CAP 均显著低于 CK。

图 6 为扁桃-冬小麦间作系统中灌浆期不同时段小麦群体呼吸速率(CRR)。从图中可以看出，CK 的 CRR 日均值强度为 8.96 μmol·m^{-2}·s^{-1}，轻度遮阴处理远冠区日均值较 CK 提高 18.74%，西侧和东侧近冠区较 CK 分别降低 29.17%和 12.32%；重度遮阴处理远冠区和西侧近冠区较 CK 分别降低 30.1%和 41.51%，东侧近冠区较 CK 提高 32.84%。单因素方差分析结果表明，CRR 日均值重度遮阴处理东侧近冠区显著高于 CK，轻度遮阴东侧近冠区和远冠区与 CK 差异不显著，其他区域均显著低于 CK

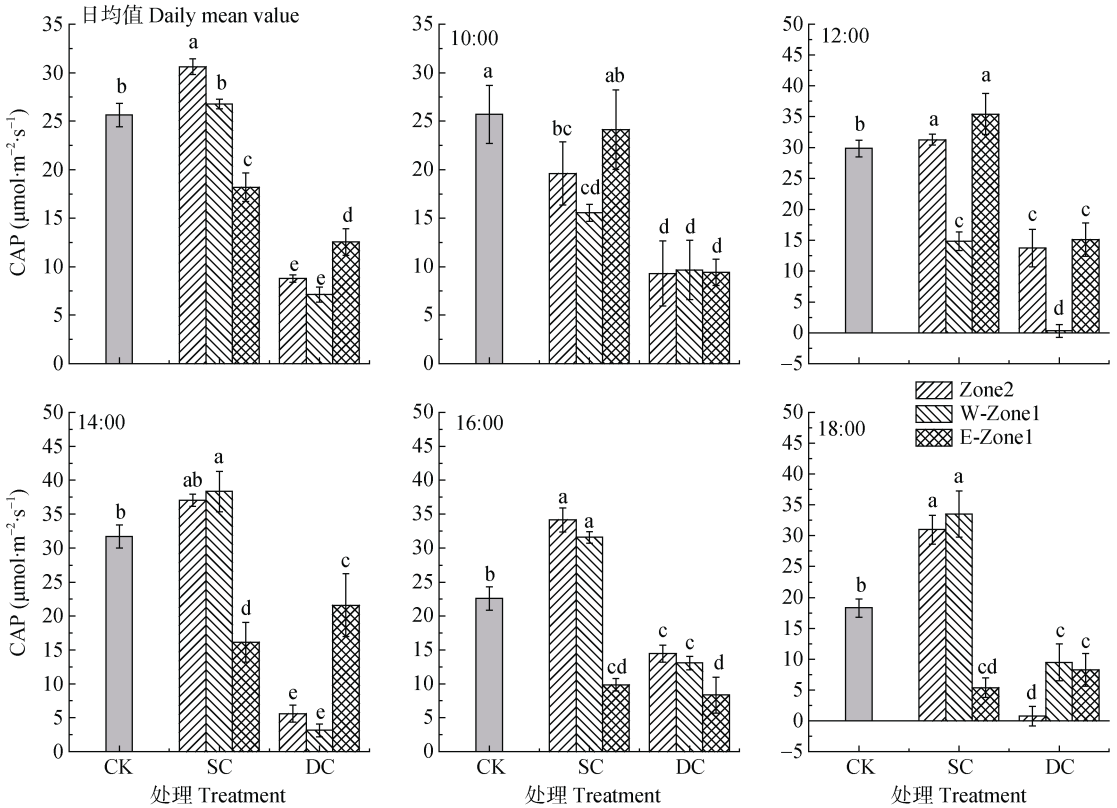

图 5　扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域小麦灌浆期群体光合速率(CAP)的日变化

Fig. 5　Daily dynamics of canopy apparent photosynthetic rate (CAP) of winter wheat population in different intercropping areas under different canopy-shading degrees of almond-winter wheat intercropping system

CK 为单作对照; DC: 主干分层形重度遮阴; SC: 小冠形轻度遮阴; W-Zone1 为树行西侧近冠区域, E-Zone1 为树行东侧近冠区域, Zone2 为西侧远冠区域。不同小写字母表示对照(CK)及不同遮阴强度及间作区域间在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK is the monocultued wheat. DC is the treatment of heavy shading of delayed open-central canopy; SC is the treatment of light shading of semicircle small-canopy. W-Zone1 is the intercropping area near canopy on the west side of tree line, E-Zone1 is the intercropping area near canopy on the east side of tree line, Zone2 is the intercropping area far from tree canopy on the west side of tree line. Different lowercase letters indicate significant difference among control (CK) and different intercropping areas under different shading degrees at $P<0.05$.

($P<0.05$)。CK 的 CRR 呈单峰变化曲线, 峰值出现在 12:00—16:00; 2 个间作处理不同区域间存在较大差异, 主要受光照时间的影响。

2.5　树冠截光程度对间作冬小麦产量和产量构成因素的影响

从表 5 可知, 与 CK 相比, 扁桃-冬小麦间作模式下不同遮阴处理小麦产量除轻度遮阴处理远冠区差异不显著外, 其他处理和区域均显著低于 CK。与 CK 相比, 千粒重表现出不同的变化趋势, 轻度遮阴处理远冠区区域显著高于对照($P<0.05$), 近冠区与 CK 无显著差异, 重度遮阴 2 个区域均显著低于 CK。单位面积有效穗数变化趋势与穗粒数一致。

3　讨论与结论

光合作用是小麦籽粒形成的基础, 籽粒产量 90%以上直接或间接地来源于光合作用[5]。作物产量的高低取决于小麦冠层光能截获率[10,17]和光合系统的效率[18]。叶绿素是光合作用的基础, 在光能的吸收、传递和转换中起着重要作用[19], 直接影响了小麦光合作用的进行。前人关于弱光对叶绿素组份影响的研究结果存在一定的差异, 部分研究证实遮光导致小麦叶片叶绿素含量增加, 但叶绿素 a/b 比值降低, 并指出这种转变有利于叶片对光能的吸收[20-21]。李文阳等[22]认为小麦花后弱光胁迫导致总叶绿素含量和叶绿素 a/b 比值降低。闫素辉等[23]关于花后弱光对小麦旗叶光合影响的相关研究也得到了类似的结果。本文研究结果表明, 扁桃-冬小麦间作模式下, 不同处理间作小麦旗叶叶绿素 a 不同程度降低, 叶绿素 b 随遮阴程度差异表现出不同的变化趋势, 叶绿素总量和叶绿素 a/b 均降低, 与李文阳等[22]、闫素辉等[23]的研究结果一致。小麦旗叶可溶性蛋白 80%以上为 Rubisco 酶[24], Rubisco 是叶片光合作用的最关键酶, 对于叶片光合具有重要意义。牟会荣等[12]关于拔节至成熟期遮光对小麦光合特性影响的研究结果表明, 遮光导致小麦旗叶可溶性蛋白含量显著降低, 有关遮阴对番茄(*Solanum lycopersicum* L.)光

合能力的研究也得到了类似的结果[25]。本文研究结果表明，间作不同遮阴程度叶片可溶性蛋白表现出不同的变化趋势，轻度遮阴条件下(PAR 强度为自然光的 64.53%)小麦旗叶中可溶性蛋白含量无显著变化，随着遮阴强度的提高旗叶中可溶性蛋白含量显著降低，与前人研究结果一致。

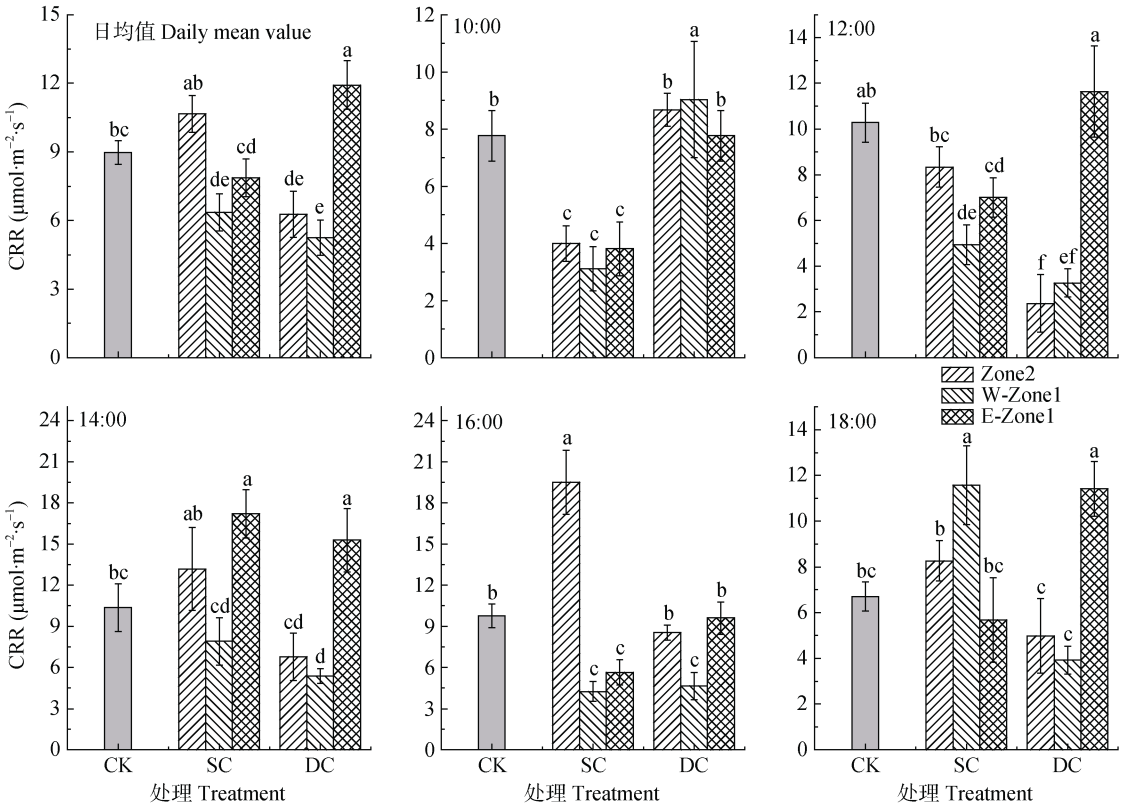

图 6 扁桃-冬小麦间作系统不同树冠截光程度下不同间作区域小麦灌浆期群体呼吸速率(CRR)的日变化

Fig. 6 Daily dynamics of canopy apparent photosynthetic rate (CRR) of winter wheat population in different intercropping areas under different canopy-shading degrees of almond-winter wheat intercropping system

CK 为单作对照; DC: 主干分层形重度遮阴; SC: 小冠形轻度遮阴; W-Zone1 为树行西侧近冠区域, E-Zone1 为树行东侧近冠区域, Zone2 为西侧远冠区域。不同小写字母表示对照(CK)及不同遮阴强度及间作区域间在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK is the monocultued wheat. DC is the treatment of heavy shading of delayed open-central canopy; SC is the treatment of light shading of semicircle small-canopy. W-Zone1 is the intercropping area near canopy on the west side of tree line, E-Zone1 is the intercropping area near canopy on the east side of tree line, Zone2 is the intercropping area far from tree canopy on the west side of tree line. Different lowercase letters indicate significant difference among control (CK) and different intercropping areas under different shading degrees at $P<0.05$.

表 5 不同树冠截光程度对扁桃-冬小麦间作系统不同间作区域小麦产量及组成成分的影响

Table 5 Effect of shading degree on yield and its' components of winter wheat in different intercropping area of almond-winter wheat intercropping

处理 Treatment	间作小麦区域 Area of intercropped wheat	产量 Yield ($t\cdot hm^{-2}$)	千粒重 1000-grain weight (g)	穗粒数 Grains number per spike	有效穗数 Effective panicle number ($\times10^4$ panicles$\cdot hm^{-2}$)
轻度遮阴 Light shading	近冠区 Near canopy	5.05±0.41b	37.73±2.67b	25.78±1.43a	610.5±45.21ab
	远冠区 Far from canopy	5.63±0.34a	43.04±2.35a	24.27±1.67a	609.0±34.27ab
重度遮阴 Sever shading	近冠区 Near canopy	1.98±0.13c	33.46±3.01c	18.44±1.24b	368.5±32.12c
	远冠区 Far from canopy	2.26±0.15c	33.45±3.12c	14.96±1.11c	509.0±35.67b
单作小麦 Monocultured wheat (CK)		5.91±0.24a	39.01±2.97b	25.87±2.45a	663.21±52.34a

表内数据为平均值±标准误，同列数据后不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。The data in the table are mean ± standard error. Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant difference at $P<0.05$.

弱光导致了小麦光合色素含量和比例的变化，进而对叶片的光合能力造成影响，导致净光合速率降低和荧光动力学参数变化[26]。相关研究普遍认为弱光会导致小麦净光合速率的下降。Xu 等[13]通过遮阴程度对冬小麦光合作用影响的研究结果表明，重度遮阴条件下植株光合能力显著降低，而轻度遮阴条件下小麦净光合速率升高。郭峰等[21]研究指出，遮阴导致小麦旗叶净光合速率、光补偿点、光饱和

点出现不同程度的下降。本文研究结果表明, 扁桃-小麦间作模式下, 遮阴程度较轻的区域小麦旗叶光合速率轻微降低, 且与对照无显著差异, 但遮阴较重的区域旗叶光合能力显著降低, 研究结果与前人一致。但光饱和点、补偿点、暗呼吸速率、表观量子效率等指标因遮阴强度不同表现出不同的变化趋势, 分析认为造成这一差异的原因主要与树体遮阴光阴交替的实际情况相关。

叶绿素 a 受到光激发产生的荧光信号包含了与光合作用相关的丰富信息, 且对外界胁迫响应敏感, 能够有效反映光合作用中光能的利用情况[27]。一般认为, 叶绿体中的激发能主要通过热耗散、光合作用和荧光 3 种途径耗散, 其中热耗散变化较小, 因此荧光的变化可以反映出光合机构的状况[26]。牟会荣等[12]研究认为长期弱光条件下(PAR 强度为自然光强度的 78%和 67%), 小麦旗叶光系统Ⅱ的实际光合效率(ΦPSⅡ)和光化学荧光淬灭系数(qP)降低, 进而导致 P_n 下降。眭晓蕾等[28]在研究弱光对辣椒(*Capsicum annuum* L.)幼苗光合过程中也获得了相似的结论。同时张黎萍等[29]关于小麦的研究结果也指出, 弱光情况下植株叶片 ΦPSⅡ显著降低。本文研究结果表明, 扁桃-冬小麦间作模式中, 重度遮阴条件下小麦旗叶 ΦPSⅡ和 qP 均显著降低, 与前人[29]研究结果一致; 但轻度遮阴条件下, PAR 强度分别为自然光强度的 64.53%和 56.0%时, 小麦旗叶 ΦPSⅡ降幅较小, 与单作对照的差异均未达显著水平, 与前人长期遮阴模拟试验的结果不一致, 分析认为造成这一现象的原因是, 间作遮阴与模拟遮阴存在较大差别, 模拟遮阴小麦始终处于相同的遮阴水平, 间作模式下树冠截光造成的遮阴存在明显的光照、遮阴交替出现的日变化动态, 特别是树体较小的情况下, 间作区域小麦冠层能够达到全光照强度的时间较长。

群体光合速率(CAP)能够更好地反映环境条件对作物产量的影响[30]。董树亭[31]指出由于无法体现对光合产量有极大影响的叶面积因素, 因此单叶光合速率的测定结果无法完全代表冠层的光合作用状况, 群体光合速率与籽粒产量相关性更高, 更具代表性。Mu 等[30]研究认为, CAP 随遮光增强而降低, 并最终导致籽粒产量的显著降低。李芳东等[32]关于油桐[*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw]-小麦间作系统的研究结果表明, 系统内外各点小麦 CAP 的日变化与其接收的光合有效辐射量的变化规律基本上是一致的。灌浆期不同间作区域 CAP 差异明显, 均显著低于对照。灌浆期 CAP 与小麦产量关系密切。本文研究结果表明, 扁桃-冬小麦间作模式重度遮阴下, 小麦 CAP 显著降低, 与前人研究结果类似。值得指出的是, 轻度遮阴水平下(PAR 日均值强度为自然光的 64.53%)由遮阴转为全光照后, 群体光合表现出存在明显的补偿现象, 群体光合速率日均值显著高于单作, 对该区域小麦千粒重显著高于 CK、产量无显著降低的现象从光合水平提出了合理的解释。小麦群体对间作遮阴造成的弱光环境表现出明显的补偿效应, 有待于进一步深入研究。

小麦籽粒产量的形成与源光合产物供应能力密切相关, 源光合产物的供应能力取决于小麦冠层光能截获量[10,17]和光合系统的效率[18]。前人通过遮阴模拟试验研究弱光对小麦产量的影响, 研究结果表明花后弱光均导致小麦千粒重、穗粒数等产量构成指标及产量的显著降低[22,32]。有关枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)-小麦间作系统的研究结果表明, 随间作区域距树体距离的增加果树对小麦产量的影响逐渐减小[33], 甚至能够显著提高籽粒产量和产量构成指标[34], 并认为造成这一现象的原因可能与光合补偿作用有关。

本研究结果表明, 扁桃-小麦间作模式下, 扁桃树冠遮阴造成小麦产量降低, 但轻度遮阴小麦产量无显著差异, 并且千粒重显著提高。轻度遮阴条件下, 小麦群体光合存在补偿效应, 进一步证实了前人的研究结果, 同时对果树-小麦间作种植模式的优化具有一定意义。根据果树树冠大小, 适时通过间伐对果树行距进行调整, 优化间作配置模式, 对于间作小麦产量的提高具有重要意义。本研究可对当前果粮间作模式下, 果粮间作种植模式的优化和小麦高产栽培技术的研发提供一定的理论依据。

参考文献 References

[1] 郑秋芬. 南疆三地州粮棉果间作经济效益评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015
ZHENG Q F. The economic benefit evaluation on the planting patterns of grain, cotton and fruit in the three regions of Southern Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015

[2] 李婷. 南疆粮食安全及供需状况分析[J]. 新疆社科论坛, 2014, (4): 51–56
LI T. Analysis of food security and supply and demand in Southern Xinjiang[J]. Tribune of Social Sciences in Xinjiang, 2014, (4): 51–56

[3] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴-2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017: 397–398
Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region.

Xinjiang Statistical Yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017: 397–398

[4] QIAO X, SAI L H, CHEN X W, et al. Impact of fruit-tree shade intensity on the growth, yield, and quality of intercropped wheat[J]. PLoS One, 2019, 14(4): e0203238

[5] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
JIN S B. Wheat in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996

[6] 于振文. 小麦产量与品质生理及栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
YU Z W. Physiology and Cultivation Techniques of Wheat Yield and Quality[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006

[7] 王丽芳, 徐宣斌, 王德轩, 等. 大穗型小麦产量形成过程中光合特性的动态变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1846–1852
WANG L F, XU X B, WANG D X, et al. Dynamic changes of photosynthetic characteristics in big-spike wheat yield formation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1846–1852

[8] 张雯, 谢辉, 张平, 等. 扁桃||冬小麦间作模式下树冠结构对间作区域光环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 753–761
ZHANG W, XIE H, ZHANG P, et al. Effect of tree canopy structure on light condition in almond-winter wheat intercropping systems[J] Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 753–761

[9] BURKEY K O, WELLS R. Effects of natural shade on soybean thylakoid membrane composition[J]. Photosynthesis Research, 1996, 50(2): 149–158

[10] ZHAO D D, SHEN J Y, LANG K, et al. Effects of irrigation and wide-precision planting on water use, radiation interception, and grain yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2013, 118: 87–98

[11] HUANG Q, LIU H, CHEN R. Effects of shade on photosynthetic characteristics in Chieh-qua[J]. Acta Horticulturae, 2004, 659: 799–804

[12] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 等. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 599–606
MU H R, JIANG D, DAI T B, et al. Effect of shading on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characters in wheat flag leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 599–606

[13] XU C L, TAO H B, WANG P, et al. Slight shading after anthesis increases photosynthetic productivity and grain yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) due to the delaying of leaf senescence[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(1): 63–75

[14] 张元帅, 冯伟, 张海艳, 等. 遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1177–1184
ZHANG Y S, FENG W, ZHANG H Y, et al. Effects of shading and nitrogen rate on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1177–1184

[15] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 38–44
YE Z P, LI J S. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola[J]. Journal of Jinggangshan University: Natural Science, 2010, 31(3): 38–44

[16] 马富裕, 李蒙春, 杨建荣, 等. 花铃期不同时段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1467–1472
MA F Y, LI M C, YANG J R, et al. A study of effect of water deficit of three period during cotton anthesis on canopy apparent photosynthesis and WUE[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1467–1472

[17] 梁鹏, 石玉, 赵俊晔, 等. 不同产量潜力小麦品种冠层光截获特性及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1189–1194
LIANG P, SHI Y, ZHAO J Y, et al. Differences of canopy light interception characteristics and yield in different yield potential wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(10): 1189–1194

[18] WANG D, YU Z W, WHITE P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat[J]. Field Crops Research, 2013, 151: 35–44

[19] 李德全, 赵会杰, 高辉远. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
LI D Q, ZHAO H J, GAO H Y. Plant Physiology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999

[20] 张元燕, 季永华, 贾恒, 等. 遮光处理对不同生育期小麦生物量分配和叶片叶绿素含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(4): 39–45
ZHANG Y Y, JI Y H, JIA H, et al. Effect of shading on biomass allocation and chlorophyll content in leaf of Triticum aestivum at different developmental stages[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2009, 18(4): 39–45

[21] 郭峰, 曲妍妍, 信长朋, 等. 弱光下生长的高产小麦品系PH01-35 旗叶光合机构对不同光强的响应[J]. 作物学报, 2009, 35(1): 179–184
GUO F, QU Y Y, XIN C P, et al. Response of photosynthetic apparatus to different irradianee in flag leaves of high-yielding winter wheat PH01-35 grown under low light conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 179–184

[22] 李文阳, 闫素辉, 尹燕枰, 等. 小麦花后弱光引起籽粒淀粉的粒度分布及组分含量的变化[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 298–306
LI W Y, YAN S H, YIN Y P, et al. Starch granule size distribution and starch component content in wheat grain in relation to shading stress after anthesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 298–306

[23] 闫素辉, 李文阳, 杨安中, 等. 弱光对小麦花后旗叶光合及籽粒灌浆的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(1): 77–81
YAN S H, LI W Y, YANG A Z, et al. Effects of weak light at grain filling stage on photosynthetic characteristics and grain filling of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(1): 77–81

[24] ALPI A, PERATA P, BEEVERS H. Physiological responses of

cereal seedlings to ethanol[J]. Journal of Plant Physiology, 1985, 119(1): 77–85

[25] BRÜGGEMANN W, LINGER P. Long-term chilling of young tomato plants under low light. IV. Differential responses of chlorophyll fluorescence quenching coefficients in *Lycopersicon* species of different chilling sensitivity[J]. Plant and Cell Physiology, 1994, 35(4): 585–591

[26] 张玉春, 张敏, 刘希伟, 等. 花后持续弱光对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1038–1046
ZHANG Y C, ZHANG M, LIU X W, et al. Effect of weak light after anthesis on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(8): 1038–1046

[27] 林世青, 许春辉, 张其德, 等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. 植物学通报, 1992, 9(1): 1–16
LIN S Q, XU C H, ZHANG Q D, et al. Some application of chlorophyll fluorescence kinetics to plant stress physiology-phy toecology and agricultural modernization[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1992, 9(1): 1–16

[28] 眭晓蕾, 毛胜利, 王立浩, 等. 弱光条件下辣椒幼苗叶片的气体交换和叶绿素荧光特性[J]. 园艺学报, 2007, 34(3): 615–622
SUI X L, MAO S L, WANG L H, et al. Effects of low light intensity on gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of *Capsicum* seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(3): 615–622

[29] 张黎萍, 荆奇, 戴廷波, 等. 温度和光照强度对不同品质类型小麦旗叶光合特性和衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 311–316
ZHANG L P, JING Q, DAI T B, et al. Effects of temperature and illumination on flag leaf photosynthetic characteristics and senescence of wheat cultivars with different grain quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 311–316

[30] MU H R, LAN X Q. Effects of shading on photosynthetic properties of canopy and single leaf of winter wheat[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(5): 979–983

[31] 董树亭. 高产冬小麦群体光合能力与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1991, 17(6): 461–469
DONG S T. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis and grain yield in high-yielding winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1991, 17(6): 461–469

[32] 李芳东, 王保平, 傅大立. 桐麦间作系统内光量分布及其对小麦产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 101–107
LI F D, WANG B P, FU D L. Light distribution within the inter cropping system of paulownia wheat and its influences on wheat yield[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(3): 101–107

[33] YANG T, DUAN Z P, ZHU Y, et al. Effects of distance from a tree line on photosynthetic characteristics and yield of wheat in a jujube tree/wheat agroforestry system[J]. Agroforestry Systems, 2019, 93(4): 1545–1555

[34] YANG L L, DING X Q, LIU X J, et al. Impacts of long-term jujube tree/winter wheat-summer maize intercropping on soil fertility and economic efficiency-a case study in the lower North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75: 105–117