

不同间作模式对田间小气候特征及 凤丹光合特性和种实性状的影响

杨玉珍^{1,①}, 徐艳花¹, 刘瑞霞¹, 李娟², 杨绯绯²

(1. 郑州师范学院生命科学学院, 河南 郑州 450044; 2. 郑州大学生命科学学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以凤丹(*Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang)单作模式为对照,对凤丹与女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)、木瓜[*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne]、香椿[*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.]和胡桃(*Juglans regia* Linn.)间作模式下4月份至8月份田间小气候特征以及凤丹叶片叶绿素含量、光合特征参数和种实性状的变化进行了研究,并对影响凤丹叶片净光合速率的主要因子进行了分析。结果显示:不同间作模式下田间空气温度(T_a)、空气相对湿度(RH)和光合有效辐射(PAR)以及凤丹叶片的叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)的变化趋势总体上均存在差异。与凤丹单作模式相比,间作模式下田间 T_a 和PAR值均不同程度降低,但RH值变化不明显,其中,凤丹-女贞间作模式对田间 T_a 值的调节作用更明显,而在凤丹-木瓜间作模式下田间PAR值的降幅最大。在不同间作模式下,凤丹叶片叶绿素含量总体上显著高于凤丹单作模式,以凤丹-木瓜间作模式下叶绿素含量最高;总体上看,凤丹叶片的 P_n 、 G_s 和 T_r 值以及单株果荚数、单果种子数、果实直径、种子千粒质量和种子产量在凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式下均高于凤丹单作模式,但在凤丹-木瓜间作模式下则整体较低,而 C_i 值则明显波动。相关性分析及多元逐步回归分析结果显示:在不同间作模式下,凤丹叶片 P_n 值与气体交换参数和田间环境参数呈现不同程度的相关性,且影响 P_n 值的主要因子存在差异。其中,在凤丹-女贞间作模式下凤丹叶片 P_n 值随PAR值的升高而减小;在凤丹-木瓜间作模式下凤丹叶片 P_n 值随 C_i 、 T_a 和PAR值的升高而减小;在凤丹-香椿间作模式下凤丹叶片 P_n 值随 G_s 和 T_r 值的升高而增大,随 C_i 值的升高而减小;在凤丹-胡桃间作模式下凤丹叶片 P_n 值随RH值的升高而增大。综合分析结果表明:与凤丹单作相比,凤丹与其他树种间作可有效调节田间小气候,降低田间空气温度和光合有效辐射,且可不同程度影响凤丹叶片净光合速率和种实发育,其中,凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式对田间小气候的调节效应更强,可使凤丹叶片净光合速率增大,种子产量提高。

关键词: 凤丹; 间作模式; 光合特性; 种子产量; 田间小气候

中图分类号: Q944; S565.9; S685.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)04-0036-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.04.05

Effect of different intercropping patterns on field microclimate characteristics and photosynthetic characteristics and seed and fruit traits of *Paeonia ostii* YANG Yuzhen^{1,①}, XU Yanhua¹, LIU Ruixia¹, LI Juan², YANG Feifei² (1. College of Life Science, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China; 2. College of Life Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(4): 36-44

Abstract: Taking monoculture pattern of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang as the control, change in field microclimate characteristics and leaf chlorophyll content, photosynthetic characteristic parameters and seed and fruit traits of *P. ostii* under intercropping patterns of *P. ostii* with *Ligustrum lucidum* Ait., *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne, *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. and *Juglans regia* Linn. from

收稿日期: 2019-06-21

基金项目: 河南省科技攻关项目(182102310655); 河南省高等学校重点研究项目(20B220006); 郑州师范学院定向研究招标课题资助
作者简介: 杨玉珍(1965—),女,河南罗山人,博士,教授,主要从事植物生理生态方面的研究。

①通信作者 E-mail: yzhyang@163.com

April to August were studied, and the main factors affecting net photosynthetic rate in leaf of *P. ostii* were analyzed. The results showed that under different intercropping patterns, variation trends of air temperature (Ta), air relative humidity (RH) and photosynthetic active radiation (PAR) in field, and chlorophyll content, net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO₂ concentration (Ci) and transpiration rate (Tr) in leaf of *P. ostia* are different in general. Compared with monoculture pattern of *P. ostii*, field Ta and PAR values under intercropping pattern decrease in different degrees, but change in RH value is not obvious, in which, regulation effect of intercropping pattern of *P. ostii-L. lucidum* on field Ta value is more obvious, and the decreasing amplitude of field PAR value under intercropping pattern of *P. ostii-C. sinensis* is the largest. Under different intercropping patterns, chlorophyll content in leaf of *P. ostii* is significantly higher than that under monoculture pattern of *P. ostii*, and that under intercropping pattern of *P. ostii-C. sinensis* is the highest; on the whole, Pn, Gs and Tr values in leaf, and pod number per plant, seed number per fruit, fruit diameter, 1 000-grain mass and seed yield of *P. ostii* under intercropping patterns of *P. ostii-L. lucidum* and *P. ostii-T. sinensis* are higher than those under monoculture pattern of *P. ostii*, but those under intercropping pattern of *P. ostii-C. sinensis* are generally lower, while Ci value fluctuates obviously. The results of correlation analysis and multiple stepwise regression analysis show that under different intercropping patterns, Pn value in leaf of *P. ostii* shows different degrees of correlations with gas exchange parameters and field environmental parameters, and the main factors affecting Pn value are different. In which, Pn value in leaf of *P. ostii* under intercropping pattern affecting of *P. ostii-L. lucidum* decreases with the increase of PAR value; that under intercropping pattern of *P. ostii-C. sinensis* decreases with the increases of Ci, Ta and PAR values; that under intercropping pattern of *P. ostii-T. sinensis* increases with the increases of Gs and Tr values, and decreases with the increase of Ci value; that under intercropping pattern of *P. ostii-J. regia* increases with the increase of RH value. Comprehensive analysis result shows that compared with monoculture of *P. ostii*, intercropping of *P. ostii* with other tree species can effectively regulate field microclimate, reduce air temperature and photosynthetic effective radiation of field, and affect net photosynthetic rate in leaf and development of seed and fruit of *P. ostii* in different degrees, in which, intercropping patterns of *P. ostii-L. lucidum* and *P. ostii-T. sinensis* have stronger regulation effects on field microclimate, which can increase net photosynthetic rate in leaf of *P. ostii*, and increase seed yield.

Key words: *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang; intercropping pattern; photosynthetic characteristics; seed yield; field microclimate

作为新兴木本油料作物,油用牡丹具有结实率和出油率高、适应性强的特点,在干旱以及土壤贫瘠地区均能生长^[1-2];适当荫蔽的林下环境是油用牡丹最适宜的生长环境^[3-6]。凤丹(*Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang)是油用牡丹主栽种类之一,喜好温湿气候,适合在安徽、山东和河南等温暖平原地区种植。目前,对凤丹的研究主要集中在栽培措施^[1]、籽油成分^[7]、提取工艺^[8-9]及组织培养^[10-11]等方面,且对单作条件下凤丹的部分生长特性也有少量研究^[12-14]。间作模式能改善田间通风透光条件、提高光合效率,可通过合理配置种植种类达到增产的目的,因而,对凤丹间作模式进行研究,了解单作和间作模式下凤丹生长发育和产量的差异,有助于凤丹栽培措施改进和产业化发展,提高土地资源利用率,增加单位面积收益。

鉴于此,作者以凤丹单作模式为对照,利用植物生长特性的不同,选取有经济价值和观赏价值且适宜

在河南种植的女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)、木瓜〔*Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne〕、香椿〔*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.〕和胡桃(*Juglans regia* Linn.)4个树种,设置4种凤丹间作模式,通过对田间小气候特征以及凤丹叶片的叶绿素含量和光合特征参数以及种实性状等指标的变化,分析影响凤丹叶片净光合速率和种子产量的主要因子,以期探索凤丹与经济树种的合理间作模式,从而为油用牡丹的推广栽培提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 材料

供试凤丹为7年生植株,栽植于郑州师范学院黄河滩基地(地理坐标为东经113°38′、北纬34°51′)。该区域属北温带大陆性季风气候,四季分明;年均气温约14.4℃,年均降水量640.9mm,无霜期220d,年

日照时数约 2 400 h;土壤属于潮土,呈碱性。栽植地原为小麦(*Triticum aestivum* Linn.)种植地,水肥状况良好。

1.2 方法

1.2.1 间作模式设置 以凤丹单作模式为对照(CK),并设置凤丹-女贞、凤丹-木瓜、凤丹-香椿和凤丹-胡桃4种间作模式。每种模式3个小区,共15个小区,小区间隔2 m;每小区长12 m、宽10 m,面积120 m²。胡桃、女贞和香椿株距3 m、行距4 m,每小区栽植15株;木瓜为就地栽培,株距2 m、行距3 m,每小区栽植21株;凤丹株距30 cm、行距80 cm,单作和间作小区内均栽植410株。间作树种以及凤丹的种植方向均为东西走向,种植时间为2014年春季;各小区的田间管理措施一致,定期除草和浇水。

1.2.2 光合特征参数及田间环境参数测定 在2018年的4月份至8月份,在每月中下旬(具体日期视天气而定)选择连续晴朗无风天气,于9:00至11:00,用LI-6400光合仪(美国LI-COR公司)测定叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr),同时测定空气温度(Ta)、空气相对湿度(RH)及光合有效辐射(PAR)等环境参数;测定时使用自然光,叶室温度和叶室内空气相对湿度设置为环境温度和相对湿度,叶室光强为林下光合有效辐射,气体流速500 μmol·s⁻¹,叶室CO₂浓度为环境CO₂浓度(380~420 μmol·mol⁻¹)。

测定时,每小区选择长势基本一致的凤丹5株,在植株中部当年生枝条上选择第2或第3枚健康成熟的叶片供试。每株选3枚叶片,每个指标重复测定3次,每月重复测定3轮,结果取平均值。

1.2.3 叶绿素含量测定 上述指标测量完成后采集凤丹叶片,每小区随机选取3~5枚叶片,去除叶脉后剪碎,用万分之一分析天平称取0.05 g,参照文献[15]的方法测定叶绿素含量。重复测定3次,结果取平均值。

1.2.4 种实性状和产量指标测定 在凤丹种子成熟时(2018年8月上旬),每小区随机选择凤丹15株,统计每个单株的果荚数量和单果种子数,用游标卡尺(精度0.01 mm)测量果实直径(即果荚的长度),用万分之一分析天平称量种子千粒质量。所有指标重复测量3次,结果取平均值。

在每个小区内划分1个面积3 m×3 m的样方,采集样方内所有凤丹的果荚,待种子后熟后脱粒并称

量,根据公式“种子产量=(3个样方种子产量平均值/9)×10 000”计算单位面积凤丹种子产量^[16]。

1.3 数据处理和分析

利用EXCEL 2007和Origin 8.0软件对数据进行处理和作图。采用SPSS 20.0软件进行方差分析及多元逐步回归分析。

2 结果和分析

2.1 不同间作模式下凤丹田间环境参数的变化

以凤丹单作模式为对照,不同间作模式下4月份至8月份凤丹田间空气温度(Ta)、空气相对湿度(RH)和光合有效辐射(PAR)的变化见表1。

2.1.1 Ta值的变化 由表1可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4月份至8月份田间Ta值的变化趋势存在差异。其中,田间Ta值在凤丹单作和凤丹-女贞间作模式下呈逐渐升高的变化趋势;在其他3种间作模式下总体呈先升高后降低的变化趋势。

4月份和5月份,田间Ta值在凤丹-女贞间作模式下显著低于凤丹单作和其他间作模式;6月份,田间Ta值在凤丹单作和各间作模式间无显著差异;7月份和8月份,田间Ta值在4种间作模式下显著低于凤丹单作模式。总体上看,除4月份外,田间Ta值在各间作模式下均低于凤丹单作模式,说明间作模式能有效降低田间Ta值。在4种间作模式中,凤丹-女贞间作模式下田间Ta值在4月份至6月份均最低,且在7月份和8月份与其他间作模式无显著差异,表明与其他间作模式相比,凤丹-女贞间作模式对田间Ta值的调节作用更明显。

2.1.2 RH值的变化 由表1可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4月份至8月份田间RH值的变化趋势存在差异。其中,田间RH值在凤丹单作和凤丹-女贞间作模式下呈“降低—升高—降低”的变化趋势,在凤丹-木瓜间作模式下呈先降低后升高的变化趋势,在凤丹-香椿和凤丹-胡桃间作模式下呈波动的变化趋势。

4月份,田间RH值在4种间作模式下低于凤丹单作模式;5月份,田间RH值仅在凤丹-木瓜间作模式下显著低于凤丹单作模式,而在其他3种间作模式下均显著高于凤丹单作模式;6月份和8月份,6月份田间RH值在凤丹-女贞和凤丹-木瓜间作模式下显著低于凤丹单作模式,而8月份田间RH值则显著高

于凤丹单作模式,但在其他2种间作模式下这2个月份与凤丹单作模式无显著差异;7月份,田间RH值仅在凤丹-女贞间作模式下显著高于凤丹单作模式,而在其他3种间作模式下与凤丹单作模式均无显著差异。总体上看,与凤丹单作模式相比,间作模式对田间RH值的调节作用不强。另外,在4种间作模式中,凤丹-木瓜间作模式下田间RH值在4月份至7月份总体上较低,仅在8月份略高于其他间作模式,表明与其他间作模式相比,凤丹-木瓜间作模式对田间RH值的调节作用更小。

2.1.3 PAR值的变化 由表1可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4月份至8月份田间PAR值的变化趋势存在差异。其中,田间PAR值在凤丹单作模式下呈逐渐增大的趋势,而在4种间作模式下则呈“升高—降低—升高”的变化趋势。

4月份至8月份,田间PAR值在4种间作模式下总体上均显著低于凤丹单作模式,其中,在凤丹-木瓜间作模式下均最低且均显著低于其他间作模式。总体上看,间作模式可导致田间PAR值降低,且以凤丹-木瓜间作模式下田间PAR值的降幅最大。

表1 不同间作模式下凤丹田间环境参数的变化($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Change in field environmental parameters of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang under different intercropping patterns ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

模式 Pattern	不同月份空气温度/°C Air temperature in different months				
	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	24.6±0.6a	31.3±2.0a	34.8±2.3a	36.3±2.4a	38.0±1.8a
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	22.7±0.7b	28.1±2.8b	31.8±1.6a	33.3±3.5b	35.5±2.0b
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	25.5±1.2a	31.0±1.5a	32.6±1.7a	33.4±2.8b	32.4±1.4b
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	26.4±0.7a	31.0±1.0a	32.5±2.9a	34.1±2.0b	34.1±3.7b
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	27.3±1.2a	31.2±0.9a	33.3±1.5a	32.9±1.7b	33.1±2.8b
模式 Pattern	不同月份空气相对湿度/% Relative air humidity in different months				
	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	58.57±5.16a	50.90±4.12b	54.33±7.23a	62.63±4.21bc	59.55±7.21b
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	54.65±2.52ab	54.21±5.36a	48.14±7.32b	73.18±5.23a	61.99±7.34a
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	47.90±4.48c	44.76±4.65c	48.90±4.23b	59.93±5.21c	63.57±6.21a
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	52.63±5.86b	55.31±6.65a	53.98±5.32a	62.24±4.23b	59.86±4.21b
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	44.98±2.96c	54.26±5.34a	53.75±3.45a	63.25±7.43b	60.29±5.78ab
模式 Pattern	不同月份光合有效辐射/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Photosynthetically active radiation in different months				
	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	991.09±39.35a	1 346.32±20.24a	1 521.02±43.65a	1 605.81±54.23a	1 730.00±56.32a
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	938.45±29.91b	1 181.09±53.32b	1 126.04±54.12b	1 103.54±34.67b	1 280.17±46.64b
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	891.30±42.70c	900.37±42.34c	729.35±34.32c	749.30±56.45d	957.67±45.34c
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	975.03±44.17a	1 116.05±34.67b	1 118.35±54.23b	1 063.68±60.43bc	1 335.60±67.32b
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	939.55±34.08b	1 158.20±45.23b	1 133.52±89.54b	1 026.97±60.33c	1 316.56±57.32b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

2.2 不同间作模式下凤丹叶片叶绿素含量和光合特征参数的变化

以凤丹单作模式为对照,不同间作模式下4月份至8月份凤丹叶片的叶绿素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)的变化见表2。

2.2.1 叶绿素含量的变化 由表2可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4月份至8月份凤丹叶片叶绿素含量的变化趋势存在差异。其中,凤丹叶片叶绿素含量在凤丹单作模式下呈逐渐降低的变化趋势,在凤丹-女贞、凤丹-香椿和凤丹-胡桃间作模式下呈“降

低—升高—降低”的变化趋势,在凤丹-木瓜间作模式下呈波动的变化趋势。

4月份和5月份,凤丹叶片叶绿素含量在凤丹-木瓜、凤丹-香椿和凤丹-胡桃间作模式下总体显著高于凤丹单作模式;6月份至8月份,凤丹叶片叶绿素含量在4种间作模式下均显著高于凤丹单作模式。在4种间作模式中,凤丹-木瓜间作模式下凤丹叶片叶绿素含量在4月份至8月份均最高,且显著高于凤丹单作模式,且除4月份外,其他月份还显著高于其他间作模式。总体上看,间作模式可显著提高凤丹叶片叶绿素含量,且以凤丹-木瓜间作模式的增幅最大。

表 2 不同间作模式下凤丹叶片的叶绿素含量和光合特征参数的变化 ($\bar{x}\pm SD$)¹⁾Table 2 Change in chlorophyll content and photosynthetic characteristic parameters in leaf of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang under different intercropping patterns ($\bar{x}\pm SD$)¹⁾

模式 Pattern	不同月份叶片叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) Total chlorophyll content in leaf in different months				
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	1.88±0.18b	1.63±0.11c	0.86±0.12c	0.80±0.14c	0.76±0.10d
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	1.82±0.20b	1.68±0.08c	1.09±0.02b	1.86±0.19b	1.07±0.11c
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	2.21±0.19a	3.00±0.06a	2.38±0.10a	2.60±0.14a	1.99±0.30a
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	1.94±0.02a	1.60±0.02c	1.05±0.08b	1.70±0.10b	0.92±0.19c
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	2.16±0.27a	1.91±0.19b	1.17±0.11b	1.77±0.12b	1.26±0.25b
模式 Pattern	不同月份叶片净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate in leaf in different months				
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	11.33±0.23b	13.36±1.34a	12.47±2.03b	10.86±1.23b	8.36±1.03b
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	13.69±2.45a	14.60±0.95a	14.20±3.01a	13.78±1.78a	9.58±0.85a
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	9.65±0.62c	8.05±1.54c	7.88±2.98c	6.17±0.83c	6.06±1.34c
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	11.49±1.31b	13.90±1.57a	14.46±1.95a	11.26±1.35b	10.19±0.61a
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	9.65±1.41c	11.93±3.20b	12.09±3.46b	10.60±2.64b	9.64±0.74a
模式 Pattern	不同月份叶片气孔导度/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Stomatal conductance in leaf in different months				
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	0.15±0.02ab	0.19±0.01bc	0.15±0.02b	0.17±0.03a	0.18±0.03b
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	0.21±0.01a	0.22±0.03a	0.23±0.01a	0.18±0.03a	0.20±0.02a
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	0.15±0.03ab	0.12±0.02d	0.08±0.02c	0.12±0.01b	0.14±0.03c
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	0.16±0.02a	0.19±0.01bc	0.22±0.02a	0.19±0.03a	0.21±0.01a
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	0.13±0.02b	0.17±0.02c	0.13±0.01b	0.18±0.02a	0.19±0.02ab
模式 Pattern	不同月份叶片胞间 CO ₂ 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Intercellular CO ₂ concentration in leaf in different months				
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	296.04±12.09ab	257.03±10.37b	267.73±14.92b	279.22±12.49c	324.46±14.50bc
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	313.25±13.48a	213.23±20.57d	294.84±15.23a	248.33±10.43d	255.43±13.38d
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	269.47±10.31c	284.33±18.38a	265.05±20.32b	327.52±9.90a	447.65±16.21a
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	273.53±15.32bc	238.66±15.31c	270.61±19.42b	308.94±16.32b	332.32±15.31b
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	286.86±17.64b	279.84±16.42a	237.96±18.35c	258.14±17.43d	307.48±15.25c
模式 Pattern	不同月份叶片蒸腾速率/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Transpiration rate in leaf in different months				
	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	3.36±0.75a	4.17±0.36a	3.37±0.97b	3.03±0.52b	2.90±0.75c
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	2.55±0.53b	3.46±0.67b	4.46±0.24a	3.62±1.07a	3.70±0.46ab
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	2.51±0.32b	2.88±0.16c	2.21±0.65c	2.42±0.92c	2.62±0.73c
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	3.14±0.21a	3.63±0.54ab	3.46±0.21b	3.83±1.34a	4.01±0.80a
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	3.30±0.63a	3.87±0.57a	3.30±0.75b	3.59±0.99a	3.60±0.61b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

2.2.2 Pn 值的变化 由表 2 可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4 月份至 8 月份凤丹叶片 Pn 值的变化趋势存在差异。其中,凤丹叶片 Pn 值在凤丹-木瓜间作模式下呈逐渐下降的变化趋势,而在凤丹单作和其他 3 种间作模式下呈先升高后降低的变化趋势。

总体上看,4 月份至 8 月份,凤丹叶片 Pn 值在凤丹-女贞间作模式下显著高于凤丹单作模式,在凤丹-木瓜间作模式下显著低于凤丹单作模式,在凤丹-香椿间作模式下高于凤丹单作模式,在凤丹-胡桃间作模式下仅 8 月份高于凤丹单作模式,但后 2 种

间作模式下仅部分月份与凤丹单作模式差异显著,说明凤丹-女贞间作模式可显著提高凤丹叶片 Pn 值。

2.2.3 G_s 值的变化 由表 2 可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4 月份至 8 月份凤丹叶片 G_s 值的变化趋势存在差异。其中,凤丹叶片 G_s 值在凤丹-木瓜间作模式下呈先降低后升高的变化趋势,而在凤丹单作和其他 3 种间作模式下呈“升高—降低—升高”的变化趋势。

4 月份,凤丹叶片 G_s 值仅在凤丹-胡桃间作模式下低于凤丹单作模式,在其他间作模式下则高于或等于凤丹单作模式,且无显著差异;5 月份,凤丹叶片 G_s 值在凤丹-女贞间作模式下显著高于凤丹单作模式,在凤丹-木瓜间作模式下则显著低于凤丹单作模式,在其他 2 种间作模式下则与凤丹单作模式无显著差异;6 月份至 8 月份,凤丹叶片 G_s 值在凤丹-木瓜间作模式下显著低于凤丹单作和其他间作模式,而在凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式下则明显高于凤丹单作模式,且在 6 月份和 8 月份差异显著。总体上看,凤丹叶片 G_s 值在凤丹-女贞间作模式下最高,而在凤丹-木瓜间作模式下最低,说明凤丹-女贞间作模式有助于增大凤丹叶片 G_s 值。

2.2.4 C_i 值的变化 由表 2 可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4 月份至 8 月份凤丹叶片 C_i 值的变化趋势存在差异。其中,凤丹叶片 C_i 值在凤丹单作以及凤丹-香椿和凤丹-胡桃间作模式下呈先降低后升高的变化趋势,在凤丹-女贞间作模式下总体呈波动降低的变化趋势,在凤丹-木瓜间作模式下呈“升高—降低—升高”的变化趋势。

5 月份、7 月份和 8 月份,凤丹叶片 C_i 值在凤丹-女贞间作模式下均最低,在凤丹-木瓜间作模式下均最高,且总体上与凤丹单作和其他间作模式差异显著;4 月份和 6 月份,凤丹叶片 C_i 值在凤丹-女贞间作模式下均最高,且总体上显著高于凤丹单作和其他间作模式,但 4 月份凤丹叶片 C_i 值在凤丹-木瓜间作模式下最低,6 月份凤丹叶片 C_i 值则在凤丹-胡桃间作模式下最低,且均显著低于凤丹单作和其他间作模式。总体上看,与凤丹单作模式相比,在凤丹-女贞和凤丹-木瓜间作模式下凤丹叶片 C_i 值波动较大。

2.2.5 Tr 值的变化 由表 2 可见:在凤丹单作和不同间作模式下,4 月份至 8 月份凤丹叶片 Tr 值的变化趋势存在差异。其中,凤丹叶片 Tr 值在凤丹单作模式下呈先升高后降低的变化趋势,而在 4 种间作模式

下呈“升高—降低—升高”的变化趋势。

4 月份至 8 月份,凤丹叶片 Tr 值在凤丹-木瓜间作模式下均最低,且总体上与凤丹单作和其他间作模式差异显著。4 月份和 5 月份,凤丹叶片 Tr 值在 4 种间作模式下均低于凤丹单作模式,但仅在凤丹-女贞和凤丹-木瓜间作模式下与凤丹单作模式差异显著;6 月份,凤丹叶片 Tr 值在凤丹-女贞间作模式下最高,且与凤丹单作和其他间作模式差异显著;7 月份和 8 月份,凤丹叶片 Tr 值在凤丹-香椿间作模式下均最高,且均与凤丹单作和凤丹-木瓜间作模式差异显著。总体上看,与凤丹单作模式相比,实验前中期,4 种间作模式下凤丹叶片 Tr 值均较低;但在实验中期和后期,凤丹叶片 Tr 值在凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式下较高,而在凤丹-木瓜间作模式下整体较低。

2.3 不同间作模式下凤丹叶片净光合速率的相关性分析

以凤丹单作模式为对照,在不同间作模式下凤丹叶片的净光合速率(Pn)与气体交换参数[气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)]和田间环境参数[空气温度(T_a)、空气相对湿度(RH)和光合有效辐射(PAR)]的相关系数见表 3。在相关性分析的基础上,为进一步确定影响凤丹叶片 Pn 值的主要因素,以 Pn 值为因变量(Y),以 G_s(X₁)、C_i(X₂)、Tr(X₃)、T_a(X₄)、RH(X₅)和 PAR(X₆)值为自变量进行多元逐步回归分析,结果见表 4。

由表 3 可见:从 G_s 值看,凤丹叶片 Pn 值仅在凤丹-香椿间作模式下与 G_s 值呈显著正相关;从 C_i 值看,凤丹叶片 Pn 值在凤丹单作模式下与 C_i 值呈显著负相关,在凤丹-木瓜和凤丹-香椿间作模式下与 C_i 值呈极显著负相关;从 Tr 值看,凤丹叶片 Pn 值在凤丹单作以及凤丹-女贞和凤丹-胡桃间作模式下与 Tr 值呈显著正相关;从 T_a 值看,凤丹叶片 Pn 值在凤丹单作和凤丹-木瓜间作模式下与 T_a 值分别呈显著和极显著负相关,在凤丹-胡桃间作模式下与 T_a 值呈显著正相关;从 RH 值看,凤丹叶片 Pn 值在凤丹单作以及凤丹-香椿和凤丹-木瓜间作模式下与 RH 值呈显著或极显著负相关,在凤丹-胡桃间作模式下与 RH 值呈极显著正相关;从 PAR 值看,凤丹叶片 Pn 值仅在凤丹-女贞和凤丹-木瓜间作模式下与 PAR 值分别呈显著负相关和显著正相关。

由表 4 可见:在不同间作模式下,影响凤丹叶片

表 3 不同间作模式下凤丹叶片净光合速率 (Pn) 与气体交换参数和田间环境参数的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of net photosynthetic rate (Pn) in leaf of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang with gas exchange parameters and field environmental parameters under different intercropping patterns

模式 Pattern	Pn 值与各参数的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient of Pn value with each parameter ¹⁾					
	Gs	Ci	Tr	Ta	RH	PAR
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	0.231	-0.346*	0.632*	-0.362*	-0.343*	-0.329
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	0.169	0.037	0.171*	-0.014	-0.209	-0.376*
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	0.159	-0.566**	0.171	-0.619**	-0.557**	0.125*
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	0.365*	-0.505**	0.066	-0.065	-0.368*	-0.288
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	-0.054	-0.302	0.129*	0.349*	0.073**	0.092

¹⁾ Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Ta: 空气温度 Air temperature; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation. *: P<0.05; **: P<0.01.

表 4 不同间作模式下凤丹叶片净光合速率与气体交换参数和田间环境参数的多元逐步回归分析结果

Table 4 Result of multiple stepwise regression analysis on net photosynthetic rate in leaf of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang with gas exchange parameters and field environmental parameters under different intercropping patterns

模式 Pattern	回归方程 ¹⁾ Regression equation ¹⁾	R ²	F 值 F value	Sig.
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	$Y = 9.817 - 0.016X_2 + 1.820X_3$	0.523	14.807	P<0.01
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	$Y = 18.979 - 0.005X_6$	0.142	4.950	P<0.01
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	$Y = 19.641 - 0.010X_2 - 0.290X_4 - 0.102X_6$	0.519	14.546	P<0.01
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	$Y = 15.444 + 19.819X_1 - 0.036X_2 + 0.878X_3$	0.514	9.164	P<0.01
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	$Y = 10.254 + 0.524X_5$	0.625	12.875	P<0.01

¹⁾ Y: 净光合速率 Net photosynthetic rate; X₁: 气孔导度 Stomatal conductance; X₂: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; X₃: 蒸腾速率 Transpiration rate; X₄: 空气温度 Air temperature; X₅: 空气相对湿度 Air relative humidity; X₆: 光合有效辐射 Photosynthetically active radiation.

Pn 值的气体交换参数和田间环境参数存在差异。4 月份至 8 月份,在凤丹单作模式下,凤丹叶片 Pn 值主要受 Ci 和 Tr 值的影响,随 Ci 值的升高而减小,随 Tr 值的升高而增大;在凤丹-女贞间作模式下,凤丹叶片 Pn 值主要受 PAR 值影响,随 PAR 值的升高而减小;在凤丹-木瓜间作模式下,凤丹叶片 Pn 值主要受 Ci、Ta 和 PAR 值的影响,均随 Ci、Ta 和 PAR 值的升高而减小;在凤丹-香椿间作模式下,凤丹叶片 Pn 值主要受 Gs、Ci 和 Tr 值的影响,随 Gs 和 Tr 值的升高而增大,随 Ci 值的升高而减小;在凤丹-胡桃间作

模式下,凤丹叶片 Pn 值主要受 RH 值的影响,随 RH 值的升高而增大。

2.4 不同间作模式下凤丹种实性状和种子产量的比较

以凤丹单作模式为对照,不同间作模式下凤丹的种实性状和种子产量见表 5。

由表 5 可见:凤丹的单株果荚数、单果种子数、果实直径、种子千粒质量和种子产量均在凤丹-木瓜间作模式下最低,且除种子千粒质量外,其余 4 个指标与凤丹单作和其他间作模式的差异显著;而单株果荚

表 5 不同间作模式下凤丹种实性状及种子产量的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 5 Comparison on fruit and seed traits and seed yield of *Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang under different intercropping patterns ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

模式 Pattern	单株果荚数 Pod number per plant	单果种子数 Seed number per fruit	果实直径/cm Fruit diameter	种子千粒质量/g 1 000-grain mass of seed	种子 产量/(kg · hm ⁻²) Seed yield
凤丹单作 Monoculture of <i>P. ostii</i> (CK)	4.5±0.4a	34.9±3.3b	10.98±0.30b	325.66±10.98c	1 099.57±28.13b
凤丹-女贞间作 Intercropping of <i>P. ostii-Ligustrum lucidum</i>	5.0±0.2a	40.9±3.0a	12.20±0.65ab	409.78±15.21a	1 570.75±34.25b
凤丹-木瓜间作 Intercropping of <i>P. ostii-Chaenomeles sinensis</i>	2.0±0.2b	30.2±3.3c	9.88±0.45c	301.04±9.79c	819.33±44.07c
凤丹-香椿间作 Intercropping of <i>P. ostii-Toona sinensis</i>	4.9±0.2a	44.3±4.1a	13.55±0.74a	388.27±14.52b	1 741.37±27.20a
凤丹-胡桃间作 Intercropping of <i>P. ostii-Juglans regia</i>	4.5±0.3a	36.9±4.0b	10.30±0.68b	308.56±19.24c	918.66±33.18b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 (P<0.05) Different lowercases in the same column indicate the significant (P<0.05) difference.

数和种子千粒质量则在凤丹-女贞间作模式下最高,单果种子数、果实直径和种子产量均在凤丹-香椿间作模式下最高,其中,种子千粒质量和种子产量与凤丹单作和其他间作模式的差异显著。

总体上看,在凤丹-香椿间作模式下,凤丹的单果种子数、果实直径和种子产量均最高,单株果荚数和种子千粒质量则位居第2;而在凤丹-女贞间作模式下,凤丹的单株果荚数和种子千粒质量最高,其单果种子数、果实直径和种子产量则位居第2,表明凤丹-香椿和凤丹-女贞这2种间作模式有利于凤丹的种实发育。

3 讨论和结论

植物的光合能力是影响作物产量的关键因子之一,叶片具有较高的光合速率是作物高产的重要前提^[17]。环境因子通过改变作物叶片的光合性能影响光合作用产物的合成、积累、转运和分配,并最终影响作物产量^[18]。不同的农作物及种植密度对田间小气候的调节作用有一定差异^[19]。本研究中,田间空气温度在夏季(7月份和8月份)较高,与凤丹单作模式相比,此阶段凤丹与其他树种的间作模式可使田间空气温度降低 2.21 °C ~ 5.58 °C,可有效减轻高温对凤丹叶片的伤害;但与凤丹单作模式相比,在间作模式下光合有效辐射显著降低,且以凤丹-木瓜间作模式下光合有效辐射最小。在间作模式下,随着间作树种枝叶的展开,田间光照强度降低,其中木瓜种植的株距和行距均较小,因此林下透光性也最差,这是不同间作模式下田间光合有效辐射存在差异的原因。此外,在田间空气温度较高的8月份,间作模式还具有一定的增湿效应,可使空气相对湿度增加。总体上看,与凤丹单作模式相比,间作模式可导致田间空气温度和光合有效辐射降低,空气相对湿度增加。

研究表明:间作模式可整体提高凤丹叶片的叶绿素含量,但在不同间作模式下凤丹叶片净光合速率的变化规律较为复杂,且在不同间作模式下凤丹叶片净光合速率的主要影响因子不尽相同,可能与不同间作模式下田间环境条件的差异有关。4月份至8月份,凤丹叶片净光合速率除在凤丹-木瓜间作模式下呈逐渐下降的变化趋势外,在凤丹单作和其他间作模式下均呈先升高后降低的变化趋势。在凤丹单作模式下,凤丹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率

均在5月份达到峰值,但胞间 CO₂ 浓度却最低,此时期田间的空气温度和光合有效辐射不高,叶片气孔张开,光合作用过程中 CO₂ 的消耗量增多,导致胞间 CO₂ 浓度降低;之后随夏季到来,田间光照强度增大、空气温度升高,为防止高温和强光伤害,凤丹叶片的气孔逐渐关闭、蒸腾速率下降,净光合速率也随之降低。总体上看,在凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式下,凤丹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率及种实性状和种子产量等相关指标均较高,胞间 CO₂ 浓度均较低,说明间作女贞和香椿可提高凤丹的净光合速率,并有利于其种实发育。7月份至8月份,在不同间作模式下凤丹叶片胞间 CO₂ 浓度总体升高,但净光合速率下降,主要是由非气孔限制因子引起^[20]。

彭晓邦等^[21]认为,间作模式下不同的田间环境条件会造成土地生产力的差异。王灿等^[22]的研究结果显示:胡椒 (*Piper nigrum* Linn.) 与槟榔 (*Areca catechu* Linn.) 间作,不仅使胡椒产量提高,还增加了胡椒叶片中磷、钾等养分的含量。师帅^[23]发现,油用牡丹与石楠 [*Photinia serratifolia* (Desfontaines) Kalkman] 或黑胡桃 (*Juglans nigra* Linn.) 间作,油用牡丹的种子产量分别增加了 18.3% 和 10.9%。本研究中,凤丹与香椿或女贞间作种植也可使凤丹的种子产量提高,与这2种间作模式下凤丹光合作用的提高有密切关系。但凤丹与木瓜间作种植后种子产量显著降低,这可能与田间光照环境变化和根系生长有关,在凤丹-木瓜间作模式下田间光合有效辐射在各月份均显著低于凤丹单作和其他间作模式,而在该间作模式下凤丹叶片净光合速率与田间光合有效辐射呈显著正相关,因而,其净光合速率也显著低于凤丹单作和其他间作模式,加之木瓜为浅根性树种,可与凤丹竞争水肥资源,从而导致凤丹种子减产。

综上所述,凤丹与其他树种间作可降低田间空气温度和光合有效辐射,在空气温度较高时还可使空气相对湿度增大,尤以凤丹-女贞和凤丹-香椿间作模式对田间气候因子改良效果明显,使凤丹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率增大,有利于提高凤丹的单株果荚数、单果种子数、果实直径和种子千粒质量等指标,提升种子产量。本研究仅对间作模式下凤丹的光合特性、种实性状的变化以及田间小气候特征的改变进行了初步研究,后续将对间作后物种间的化感效应以及土壤肥力状况的变化等进行深入研究,以期全面掌握间作种植模式对油用牡丹的综合效益。

参考文献:

- [1] 杨丹怡, 吉文丽, 杨静萱, 等. 平茬措施对凤丹生长、光合生理和结实的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(1): 43-51.
- [2] 史国安, 焦封喜, 焦元鹏, 等. 中国油用牡丹的发展前景及对策[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 124-128.
- [3] 杨玉珍, 张志浩, 李娟. 不同间作模式下油用牡丹‘凤丹’光合特性及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2905-2912.
- [4] 蔡艳飞, 李世峰, 王继华, 等. 遮荫对油用牡丹植株生长和光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(8): 1623-1631.
- [5] 周曙光, 孔祥生, 张妙霞, 等. 遮光对牡丹光合及其他生理生化特性的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(2): 56-60.
- [6] 张衷华, 唐中华, 杨逢建, 等. 两种主要油用牡丹光合特性及其微环境影响因子分析[J]. 植物研究, 2014, 34(6): 770-775.
- [7] 笕丽霞, 陈君红, 霍科科, 等. 牡丹籽油脂肪酸成分分析及微胶囊化工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(11): 32-35.
- [8] 董秀婷, 杨国恩, 王秋敏. 凤丹牡丹籽油的提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 6-9.
- [9] 冯贞, 方晓璞, 任春明. 不同提取方法对牡丹籽油品质和微量活性成分的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 17-19.
- [10] DA SILVA J A T, SHEN M, YU X. Tissue culture and micropropagation of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) [J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2012, 15(3): 159-168.
- [11] 王新, 成仿云, 钟原, 等. 凤丹牡丹鳞芽离体培养与快繁技术[J]. 林业科学, 2016, 52(5): 101-110.
- [12] 杨静萱, 吉文丽, 刘玲, 等. 株行距配置对油用牡丹‘凤丹’生长发育及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 37(6): 202-208.
- [13] 王晓静, 马慧丽, 郭丽丽, 等. 种植密度对油用牡丹‘凤丹’形态性状和产量的影响[J]. 北方园艺, 2018(3): 101-108.
- [14] 张忠华, 唐中华, 杨逢建, 等. 两种主要油用牡丹光合特性及其微环境影响因子分析[J]. 植物研究, 2014, 34(6): 770-775.
- [15] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1-15.
- [16] 宋宏伟, 刘少华, 沈植国, 等. 不同栽培条件下油用牡丹种子产量及含油率[J]. 经济林研究, 2018, 36(1): 105-109.
- [17] KITAO M, UTSUGI H, KURAMOTO S, et al. Light-dependent photosynthetic characteristics indicated by chlorophyll fluorescence in five mangrove species native to Pohnpei Island, Micronesia [J]. Physiologia Plantarum, 2003, 117(3): 376-382.
- [18] 王信宏, 王月福, 赵长星, 等. 不同生育时期断根对花生光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1521-1526.
- [19] 张立宇, 董玉芝, 陈虹, 等. 核(桃)农间作系统小气候水平分布特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(3): 5-10.
- [20] 高冠龙, 冯起, 张小由, 等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 929-937.
- [21] 彭晓邦, 张硕新. 商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2692-2698.
- [22] 王灿, 杨建峰, 祖超, 等. 胡椒园间作槟榔对胡椒产量及养分利用的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(7): 1191-1196.
- [23] 师帅. 间作及施肥对油用牡丹籽产量和品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学林学与园林学院, 2016: 38.

(责任编辑: 郭严冬)

(上接第18页 Continued from page 18)

- [20] DENNY G C, ARNOLD M A. Taxonomy and nomenclature of baldcypress, pondcypress, and montezuma cypress: one, two, or three species? [J]. Horttechnology, 2007, 17(1): 125-127.
- [21] LICKY E B, WALKER G L. Population genetic structure of baldcypress (*Taxodium distichum* [L.] Rich. var. *distichum*) and pondcypress (*T. distichum* var. *imbricarium* [Nuttall] Croom): biogeographic and taxonomic implications [J]. Southeastern Naturalist, 2002, 1(2): 131-148.
- [22] 翟大才, 宣磊, 周琦, 等. 黄山地区马尾松和黄山松基于SSR分子标记的基因渐渗研究[J]. 分子植物育种, 2018, 16(14): 4614-4622.
- [23] MCMILLAN C. Differentiation in habitat response in *Taxodium distichum*, *Taxodium mucronatum*, *Platanus occidentalis*, and *Liquidambar styraciflua* from the United States and Mexico [J]. Vegetation, 1974, 29: 1-10.
- [24] LICKY E B, WATSON F D, WALKER G L. Differences in bark thickness among populations of baldcypress [*Taxodium distichum* (L.) Rich. var. *distichum*] and pondcypress [*T. distichum* var. *imbricarium* (Nuttall) Croom] [J]. Castanea, 2002, 67(1): 33-41.

(责任编辑: 郭严冬)