

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0255



## 限量灌溉和遮阴对干热区小粒咖啡 生长、光合及产量的影响

齐韵涛, 刘小刚, 余小弟, 朱益飞,  
韩志慧, 余宁, 杨启良

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)



齐韵涛

**摘要:** 为了探明云南干热河谷区小粒咖啡高产的灌溉和遮阴优化模式, 设置了3个灌水处理(高水  $W_H$ , 中水  $W_M$  和低水  $W_L$ ) 和4个遮阴处理( $S_H$ , 遮阴度 95%;  $S_M$ , 遮阴度 75%;  $S_L$ , 遮阴度 55%;  $S_0$ , 自然光照), 研究了不同的灌水和遮阴对小粒咖啡生长、光合特性日变化、叶片水分利用效率、叶片光能利用效率和产量的影响. 结果表明, 与  $W_L$  相比, 增加灌水分别提高了株高和新枝长度 5.60% ~ 12.39% 和 10.83% ~ 19.50%, 叶片水分利用效率、叶片光能利用效率和干豆产量分别提高了 16.98% ~ 36.79%, 61.64% ~ 121.95% 和 47.27% ~ 120.76%. 与  $S_0$  相比,  $S_L$  的日均净光合速率、气孔导度、叶片水分利用效率、叶片光能利用效率和干豆产量分别增大了 5.85%, 10.80%, 6.64%, 28.51% 和 20.05%. 与  $W_L S_0$  相比, 增加灌水和遮阴, 能同时增大叶片水分利用效率、叶片光能利用效率和干豆产量 13.94% ~ 44.47%, 7.96% ~ 231.04% 和 44.55% ~ 143.41%, 处理  $W_H S_L$  的干豆产量最大, 为 6 131.84 kg/hm<sup>2</sup>. 因此, 从最佳产量角度考虑, 干热区小粒咖啡的水光耦合模式为  $W_H S_L$  组合.

**关键词:** 小粒咖啡; 遮阴; 限量灌溉; 光合日变化; 水光利用效率; 产量

**中图分类号:** S275.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)09-0820-09

齐韵涛, 刘小刚, 余小弟, 等. 限量灌溉和遮阴对干热区小粒咖啡生长、光合及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 820-828.

QI Yuntao, LIU Xiaogang, YU Xiaodi, et al. Effects of limited irrigation and shading on growth, photosynthesis and yield of *Coffea arabica* in dry-hot area[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017, 35(9): 820-828. (in Chinese)

## Effects of limited irrigation and shading on growth, photosynthesis and yield of *Coffea arabica* in dry-hot area

QI Yuntao, LIU Xiaogang, YU Xiaodi, ZHU Yifei, HAN Zhihui, YU Ning, YANG Qiliang

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** In order to clarify the optimal irrigation and shading modes for a high yield of *Coffea arabica* in hot and dry valley area of Yunnan, three irrigation and four shading schemes are established for field experiment and the coupling effects of water and light on growth, net photosynthetic rate, water use efficiency, light use efficiency and yield of *Coffea arabica* are studied. The three irrigation schemes are

收稿日期: 2016-10-25; 修回日期: 2017-01-15; 网络出版时间: 2017-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170912.1000.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109102, 51469010, 51769010); 云南省应用基础研究项目(2014FB130); 云南省教育厅重点项目(2011Z035)

作者简介: 齐韵涛(1991—), 男, 河北保定人, 硕士研究生(728008880@qq.com), 主要从事水资源高效利用研究.

刘小刚(1977—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士(通信作者, liuxiaogangjy@126.com), 主要从事水土资源高效利用、节水灌溉理论与新技术、农业工程研究.

$W_L$ ,  $W_M$  and  $W_H$  and four shading schemes are  $S_0$  - no shading,  $S_L$  - 55% shading,  $S_M$  - 75% shading and  $S_H$  - 95% shading. The results show that an increased irrigation can improve plant height and new branch length by 5.60% - 12.39% and 10.83% - 19.50%, and enhance water use efficiency, light use efficiency and dry bean yield by 16.98% - 36.79%, 61.64% - 121.95% and 42.27% - 120.76%, respectively, compared with  $W_L$ . Compared with  $S_0$ , the average daily  $P_n$ ,  $C_i$ , water use efficiency, light use efficiency and dry bean yield of  $S_L$  have been increased by 5.85%, 10.80%, 6.64%, 28.51% and 20.05%, respectively. Compared with  $W_L S_0$ , the increased irrigation level and shading area can improve water use efficiency, light use efficiency and dry bean production by 13.94% - 44.47%, 7.96% - 231.04% and 44.55% - 143.41% simultaneously. It was noted that  $W_H S_L$  can lead to the largest dry bean production, as 6 131.84 kg/hm<sup>2</sup>. Therefore, from the highest yield point of view,  $W_H S_L$  should be the optimal mode of water - light coupling for *Coffea arabica* in hot and dry valley area.

**Key words:** *Coffea arabica*; shading; limited irrigation; diurnal variations of photosynthesis characteristics; water and light use efficiency; yield

咖啡是世界三大饮料之一,自云南省引种小粒咖啡以来,其种植面积已达  $1.2 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,成为云南省名副其实的特色产业,带动了当地的经济的发展<sup>[1]</sup>.保山潞江坝是云南省典型的干热河谷区气候,日气温平均为 21.3 °C,最高气温达 40.4 °C,终年基本无霜,是公认的最佳小粒咖啡产地;干旱度达 2.5,旱季约为 7 个月(11 月一次年 5 月),尤其在开花期(3—5 月)土壤水分极度匮乏,严重制约小粒咖啡生产潜力发挥<sup>[2-3]</sup>,因此,季节性干旱是制约小粒咖啡高产的主要因素.在高温旱季灌水迫使小粒咖啡提前开花,并能提高小粒咖啡的开花数和结果数,促进小粒咖啡植株的生长,生长指标(株高、茎粗、叶面积、新枝长度和芽数量)增长显著,净光合速率、水分利用效率以及光能利用效率明显增加<sup>[3-4]</sup>,进而提高产量.

小粒咖啡在生长发育过程中,形成了喜荫蔽和湿润的生长环境,遮阴会减少光照的强度,影响小粒咖啡生长的冠层微气候环境,从而对叶片的光合产生一定的影响作用<sup>[5]</sup>.适当遮阴可以促进咖啡树的生长,使冠幅增大,新枝长度增大,芽数量增多,保持良好的光合状态,增大净光合速率<sup>[6-8]</sup>,从而有利于咖啡稳产、增产,提高土地利用率,降低生产成本;而过度遮阴则会明显减弱光照的强度,不利于叶片进行正常的光合作用,严重影响植株的水分利用效率和光能利用效率,从而减少小粒咖啡的产量<sup>[9]</sup>.

水、光是小粒咖啡最重要的两大生长因子<sup>[10]</sup>,水分保证和适当遮阴可以促进小粒咖啡提高产量.国内外关于小粒咖啡植株生长、光合和产量的分析已有报道<sup>[11-12]</sup>,而小粒咖啡作为云南的一种主要经

济作物,在国内对其水光耦合的管理方式却鲜有研究成果.

文中通过干热河谷区大田试验,研究不同灌水和遮阴对小粒咖啡的生长、光合、水分利用效率、光能利用效率和产量的影响,通过设定 4 个遮阴处理和 3 个灌水处理,研究水光耦合模式对小粒咖啡生长特征、光合特性、水分利用效率、光能利用效率和产量的影响,以期提出最佳灌水和遮阴指标,为干热河谷区小粒咖啡水光管理提供参考.

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验地点及材料

试验于 2015 年 3 月至 2016 年 1 月在云南保山潞江坝新寨村(中国咖啡第一村)进行,该村位于 98°53'E, 21°59'N,海拔为 750 m,年均降水量为 755.40 mm,90%降水集中在 6—10 月,年均蒸发量为 2 101.90 mm,日平均气温为 21.3 °C,最高气温为 40.4 °C,终年基本无霜,年均积温为 7 694.0 °C;年均日照时数为 2 328 h,相对湿度为 71%,属于南亚热带半干旱季风气候,植被呈热带稀树灌草丛景观.

试验用田的土壤为老冲积层上发育形成的红褐色砂壤土,选择长势一致的 3 年生小粒咖啡(卡蒂姆 C1FC7963)为供试材料,株行间距为 1.5 m × 2.0 m.用钢管搭建遮阴支架,用不同透光能力的黑色遮阴网搭架遮阴篷,遮阴网与小粒咖啡冠层表面保持 1.5 m 的距离,以便于试验观测和通风.灌水方式采用地表滴灌,采用压力补偿式滴头,流量为 2.5 L/h.

## 1.2 试验处理

试验设置遮阴和灌水 2 个因素. 根据干热区需水量资料和前人的研究成果<sup>[12-13]</sup>, 结合降水量, 确定旱季高水灌水量, 灌水周期为 7 d, 遇到降水则后延. 灌水量采用水表计量, 3 个灌水处理分别为高水  $W_H$ 、中水  $W_M$  和低水  $W_L$ , 灌水量分别为 393.04, 294.78 和 196.52 mm. 4 个遮阴处理分别为  $S_H$ 、 $S_M$ 、 $S_L$  和  $S_0$ , 遮阴度分别为 95%, 75%, 55%, 0 (即自然光照). 试验为完全组合式设计, 12 个处理, 每个处理 5 次重复, 共 60 株咖啡树.

## 1.3 测定项目与方法

植株生长测定: 生长测定于 2015 年 4 月起测量株高、茎粗、冠幅和新枝长度, 每 2 个月测量 1 次, 株高、茎粗和新枝长度用毫米刻度尺测量, 茎粗用游标卡尺测量. 其中 2015 年 10 月第 4 次测量生长时, 增加测量了芽数量, 芽数量可以更好地了解植株新枝和叶展的情况, 以利于分析小粒咖啡植株的生长趋势和环境因素对植株的影响.

光照强度、空气温度和空气湿度用空气温湿度光照速测仪 QSH-18 测定. 光合特性用 Li-6400 便携式光合仪测定. 测定日期选择开花期灌水后第 2 天, 光合功能叶选择自顶部向下的第 4 片无病害叶子. 测定时间为 10:00—16:00, 每 2 h 测定 1 次, 每个处理 3 个重复, 每个重复测定 3 次. 测量内容包括净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $CO_2$  浓度. 叶片水分利用效率为净光合速率和蒸腾速率的

比值<sup>[14]</sup>, 光能利用效率为净光合速率和叶室内部光强的比值<sup>[15]</sup>.

小粒咖啡豆质量: 于 2015 年 12 月 10 日对保山大田小粒咖啡进行鲜果采摘, 用精度为 0.01 g 的电子秤称量咖啡豆鲜质量; 鲜豆脱皮后加水淹没, 静置发酵完成后清洗搓揉脱胶, 日光自然干燥后用精度为 0.01 g 的电子秤称量咖啡豆干质量.

## 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和制图, 用 SPSS 统计软件对数据进行方差分析 (ANOVA) 和多重比较, 多重比较则采用 Duncan 法 ( $P=0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 小气候环境日变化

表 1 为不同遮阴下咖啡冠层微气候环境的日变化数据, 表中  $t$ ,  $AH$ ,  $E$  分别为空气温度、空气湿度、光照强度. 由表可以看出, 与  $S_0$  相比, 遮阴处理  $S_L$ 、 $S_M$  和  $S_H$  的日均空气温度减少 6.78%, 5.61% 和 8.10%, 日均空气湿度增大 5.03%, 6.76% 和 9.08%, 日均光照强度减弱 34.79%, 47.77% 和 65.00%, 这表明空气温度和光照强度的日变化随着遮阴度增大而减小, 空气湿度的日变化随着遮阴度增大而增大. 空气温度和光照强度的日变化均在 14:00 最大, 空气湿度的日变化均在 10:00 最大.

表 1 不同遮阴下咖啡冠层微气候环境的日变化  
Tab. 1 Diurnal variation of microclimate environment on coffee canopy at different shading levels

时间	$t/^\circ C$				$AH/\%$				$E/klx$			
	$S_H$	$S_M$	$S_L$	$S_0$	$S_H$	$S_M$	$S_L$	$S_0$	$S_H$	$S_M$	$S_L$	$S_0$
10:00	27.26	28.64	27.09	28.92	85.15	72.40	84.85	72.15	26.44	36.53	30.82	65.93
12:00	28.76	30.05	28.90	30.94	70.15	67.15	68.55	66.25	28.71	44.90	36.24	88.33
14:00	30.85	32.02	31.51	33.71	65.80	62.55	63.80	62.50	30.17	47.57	40.74	88.56
16:00	27.83	28.10	28.04	28.24	69.50	67.30	66.60	65.50	20.17	28.41	24.74	58.56

### 2.2 水光耦合对生长特性的影响

表 2 为不同水光供给的小粒咖啡苗木生长增量, 表中  $h$ ,  $\Delta h$  为株高及其增量;  $d$ ,  $\Delta d$  为茎粗及其增量;  $w$ ,  $\Delta w$  为冠幅及其增量;  $l$ ,  $\Delta l$  为新枝长度及其增量;  $s$  为芽数量.

由表 2 可知, 灌水对株高、新枝长度和芽数量的影响具有统计学意义, 与  $W_L$  相比, 灌水处理  $W_H$  和  $W_M$  分别增加株高和新枝长度 12.39%, 5.60% 和 19.50%, 10.83%, 减少芽数量 7.29% 和 10.94%. 与  $S_0$  相比, 遮阴处理  $S_M$  和  $S_L$  的芽数量增加了 31.13% 和 21.70%,  $S_H$  的减少了 15.57%. 灌水和

遮阴的交互作用对小粒咖啡的株高、茎粗、新枝长度和芽数量影响具有统计学意义, 与  $W_L S_0$  相比, 处理  $W_H S_L$  的株高和新枝长度分别增加了 13.20% 和 17.46%, 处理  $W_L S_M$  和  $W_H S_L$  的茎粗分别增加了 15.51% 和 10.88%, 处理  $W_H S_M$  和  $W_H S_L$  的芽数量分别增加了 40.00% 和 31.43%, 灌水和遮阴的交互作用对处理  $W_H S_L$  的生长产生了一定的促进作用.

灌水对茎粗增量的影响具有统计学意义. 与  $W_L$  相比, 处理  $W_H$  和  $W_M$  分别增加茎粗增量 10.06% 和 6.26%, 灌水增加了茎粗的生长速度. 与  $S_0$  相比, 遮阴处理  $S_L$  和  $S_M$  和  $S_H$  的茎粗增量增加

了15.94%,34.79%和46.07%,茎粗增长量随着遮阴度增大而增大,遮阴促进了茎粗的生长.与 $W_L S_0$

相比,处理 $W_H S_M$ 的茎粗增量增加了45.88%,灌水和遮阴的交互作用对茎粗增量影响较大.

表2 不同水光供给小粒咖啡苗木生长增量  
Tab.2 Growth increment of *Coffea arabica* seedlings at different water – light supplies

遮阴	灌水	$h/mm$	$\Delta h/mm$	$d/mm$	$\Delta d/mm$	$w/mm$	$\Delta w/mm$	$l/mm$	$\Delta l/mm$	$s/个$
$S_H$	$W_H$	1 847 ± 24bcd	252 ± 34a	23.23 ± 0.56bc	6.62 ± 0.59abcd	1 369 ± 78b	134 ± 9a	279.12 ± 4.87bc	102.43 ± 29.17ab	9.8 ± 2.3g
	$W_M$	1 752 ± 36efg	228 ± 62a	22.17 ± 1.12cd	6.84 ± 1.81abc	1 429 ± 49ab	137 ± 11a	256.52 ± 8.55ef	119.77 ± 15.16ab	11.6 ± 1.8fg
	$W_L$	1 603 ± 170h	248 ± 32a	22.88 ± 1.76bc	7.61 ± 0.46a	1 485 ± 47a	132 ± 16a	231.47 ± 16.97g	121.07 ± 13.63ab	14.4 ± 2.6def
$S_M$	$W_H$	1 878 ± 39abc	236 ± 38a	22.98 ± 0.83bc	7.25 ± 1.15ab	1 438 ± 71ab	141 ± 5a	283.63 ± 4.46bc	123.87 ± 16.41ab	19.6 ± 3.1a
	$W_M$	1 792 ± 22cedf	244 ± 64a	21.10 ± 0.71d	5.28 ± 0.93defg	1 355 ± 49b	137 ± 5a	271.45 ± 5.84cd	125.77 ± 27.40ab	17.2 ± 2.8abcde
	$W_L$	1 723 ± 58fg	232 ± 29a	24.73 ± 1.07a	5.99 ± 0.69bcde	1 415 ± 60ab	137 ± 8a	246.02 ± 17.51e	131.46 ± 15.13ab	18.8 ± 6.1ab
$S_L$	$W_H$	1 972 ± 18a	250 ± 47a	23.74 ± 1.11ab	5.64 ± 1.43cdef	1 338 ± 53b	140 ± 7a	298.67 ± 9.31a	131.62 ± 13.72ab	18.4 ± 2.1abcd
	$W_M$	1 770 ± 23edfg	252 ± 30a	22.73 ± 0.91bc	6.28 ± 0.55abcde	1 379 ± 23b	141 ± 8a	265.27 ± 4.26de	95.93 ± 12.28b	14.6 ± 1.7cdef
	$W_L$	1 694 ± 83g	254 ± 30a	21.16 ± 0.69d	3.01 ± 0.47g	1 235 ± 130c	141 ± 7a	231.57 ± 13.75g	115.45 ± 32.62ab	18.6 ± 1.7abc
$S_0$	$W_H$	1 903 ± 41ab	260 ± 35a	21.94 ± 0.60cd	4.24 ± 0.65g	1 389 ± 81ab	136 ± 11a	289.75 ± 5.51ab	110.33 ± 34.78ab	13.2 ± 2.7efg
	$W_M$	1 827 ± 25bcde	268 ± 55a	23.32 ± 0.75bc	4.53 ± 0.97fg	1 364 ± 80b	136 ± 9a	274.42 ± 2.02cd	104.82 ± 21.66ab	15.2 ± 2.4bcdef
	$W_L$	1 742 ± 48efg	200 ± 37a	21.41 ± 0.68d	4.97 ± 0.94efg	1 340 ± 68	137 ± 10a	254.27 ± 10.28ef	133.67 ± 42.74a	14.0 ± 2.1ef
显著性检验(P值)										
$P(S)$		0.861	0.382	0.001	0.107	0.005	0.338	0.966	0.924	0.137
$P(W)$		0.191	0.942	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.007	0.781	<0.001
$P(WS)$		<0.001	0.082	<0.001	0.887	<0.001	0.888	<0.001	0.069	<0.001

注:数据为平均值 ± 标准差( $n=5$ ),同一列不同小写字母表示 $P<0.05$ 下的差异具有统计学意义.

### 2.3 水光耦合对净光合速率日变化的影响

净光合速率 $P_n$ 的日变化基本呈“单峰曲线”.图1为不同灌水和遮阴下小粒咖啡叶片净光合速率的日变化.由图可见峰值均出现在12:00;14:00出现光合午休的现象.在遮阴处理 $S_0$ 下,与 $W_L$ 比,灌水处理 $W_H$ 和 $W_M$ 的日均 $P_n$ 分别增大了24.91%和12.61%,水分缺失则会抑制正常的光合作用,灌水对日均 $P_n$ 影响具有统计学意义.在灌水处理 $W_H$

下,与 $S_0$ 相比,遮阴处理 $S_M$ 和 $S_H$ 的日均 $P_n$ 分别减小了6.25%和6.93%, $S_L$ 的日均 $P_n$ 增大了5.85%,表明在保障水分充足的情况下,适当遮阴可以促进净光合速率,而过度遮阴抑制了光合作用.与 $W_L S_0$ 相比,处理 $W_M S_0$ , $W_H S_0$ 和 $W_H S_L$ 的日均 $P_n$ 分别增大了12.61%,21.35%和28.46%,遮阴与灌水的交互作用对日均 $P_n$ 有促进作用,且处理 $W_H S_L$ 下的日均 $P_n$ 促进作用最大.

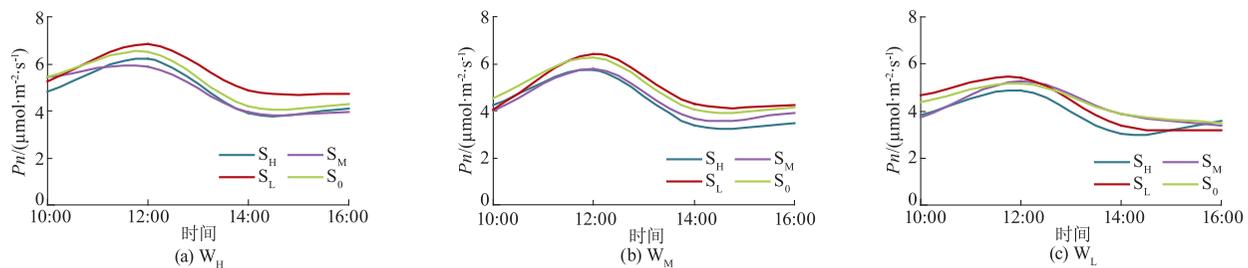


图1 不同灌水和遮阴下小粒咖啡叶片净光合速率日变化

Fig.1 Diurnal variation of *Coffea arabica* leaf photosynthetic rate at various irrigation and shading levels

### 2.4 水光耦合对蒸腾速率日变化的影响

图2为不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片蒸

腾速率 $Tr$ 日变化.由图可见蒸腾速率日变化与净光合速率日变化的规律相似,均在12:00出现峰值.

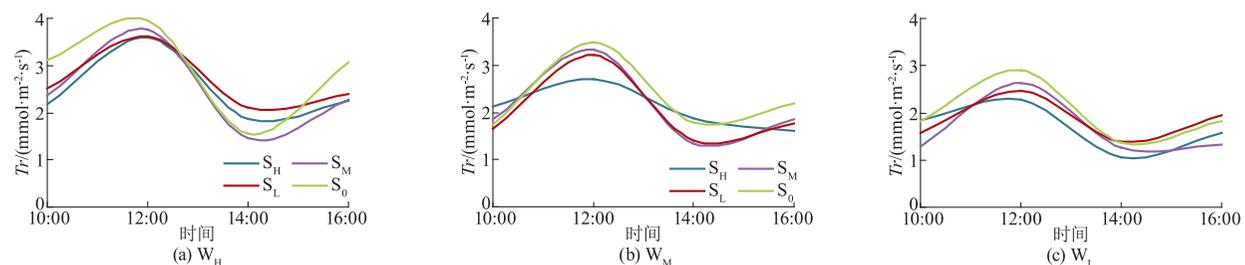


图2 不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片蒸腾速率日变化

Fig.2 Diurnal variation of *Coffea arabica* leaf transpiration rate at various irrigation and shading levels

灌水对日均蒸腾速率  $Tr$  变化的影响具有统计学意义,与  $W_L$  相比,灌水处理  $W_M$  和  $W_H$  的日均蒸腾速率  $Tr$  值分别增大 18.97% 和 47.35%。遮阴对日均蒸腾速率  $Tr$  的影响具有统计学意义,灌水处理  $W_H$  下,与  $S_0$  相比,增加遮阴度分别降低遮阴处理  $S_L$ ,  $S_M$  和  $S_H$  的日均  $Tr$  为 8.64%, 15.50% 和 15.53%。与  $W_L S_0$  相比,处理  $W_M S_0$  和  $W_H S_0$  的日均  $Tr$  值分别增大了 16.27% 和 47.44%,处理  $W_L S_H$ ,  $W_L S_M$  和  $W_L S_L$  的日均  $Tr$  值分别减小了 14.74%, 17.81% 和 6.91%。

## 2.5 水光耦合对叶片气孔导度日变化的影响

图 3 为不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片气孔导度  $G_s$  日变化。由图可见,气孔导度  $G_s$  的日变化

曲线亦与  $P_n$  和  $Tr$  日变化曲线相似,均在 12:00 出现峰值。

在处理  $W_H$  下,与  $S_0$  相比,遮阴处理  $S_M$  和  $S_H$  的  $G_s$  分别比  $S_0$  的减小了 16.00% 和 18.20%,  $S_L$  的  $G_s$  却比  $S_0$  的增大了 10.80%,表明适当遮阴可增大日均  $G_s$ ,过度遮阴反而减小日均  $G_s$ 。与  $W_L$  相比,灌水处理  $W_M$  和  $W_H$  的日均  $G_s$  分别增大了 57.44% 和 90.46%。与  $W_L S_0$  相比,处理  $W_M S_0$ ,  $W_H S_0$  和  $W_H S_L$  的日均  $G_s$  分别增大了 108.90%, 157.74% 和 185.57%,其中,处理  $W_H S_L$  的日均  $G_s$  增大量最多,适当的遮阴和充足的水分是满足气孔导度最适宜的环境,可满足光合作用过程中气体交换的需求,从而增大  $P_n$  值。

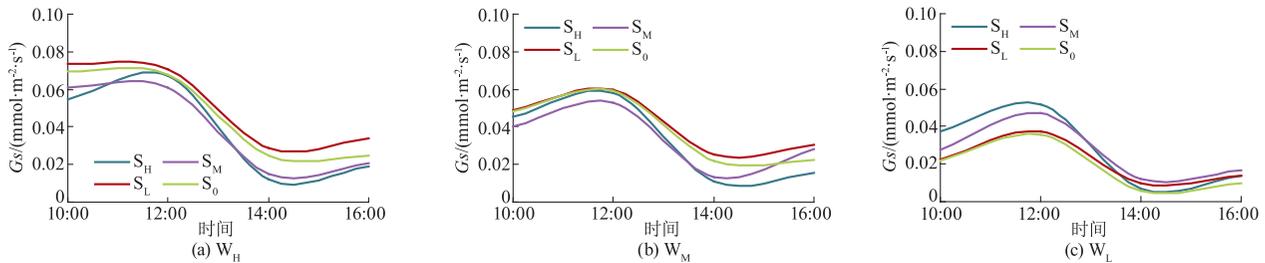


图3 不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片气孔导度日变化

Fig. 3 Diurnal variation of *Coffea arabica* leaf stomatal conductance at various irrigation and shading levels

## 2.6 水光耦合对胞间 $CO_2$ 浓度日变化的影响

图 4 为不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$  日变化。小粒咖啡胞间  $CO_2$  浓度的日均变化曲线峰值在 14:00,峰谷在 12:00,这与  $P_n$  相反。处理  $W_H$  下,与  $S_0$  相比,遮阴处理  $S_H$  和  $S_M$  的日均  $C_i$  分别增大 7.66% 和 7.24%,  $S_L$  的日均  $C_i$  减

小了 5.32%,因此,适当遮阴减小日均  $C_i$ ,过度遮阴增大日均  $C_i$ 。与  $W_L$  相比,处理  $W_H$  和  $W_M$  的日均  $C_i$  减小了 15.84% 和 7.42%,日均  $C_i$  随着灌水增加而减小。与  $W_L S_H$  相比,处理  $W_M S_H$ ,  $W_H S_H$  和  $W_H S_L$  的日均  $C_i$  分别减小了 6.93%, 13.52% 和 23.95%,水光交互作用对处理  $W_H S_L$  的减少量最大。

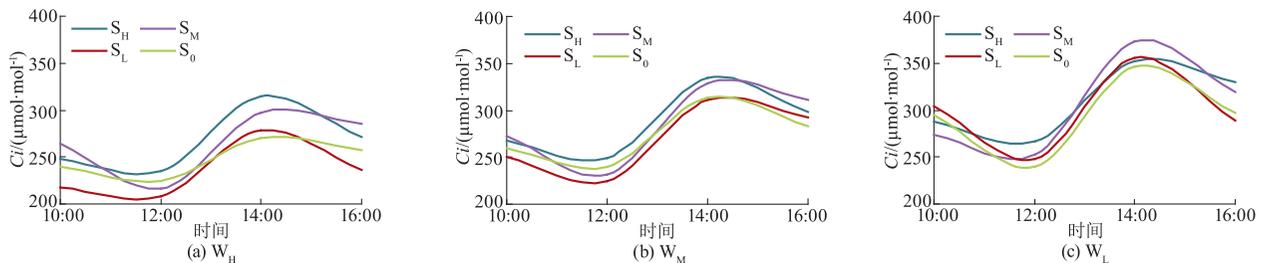


图4 不同灌水和遮阴处理下小粒咖啡叶片胞间  $CO_2$  浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variation leaf intercellular  $CO_2$  concentration of *Coffea arabica* at different irrigation and shading levels

## 2.7 水光耦合对叶片水分利用效率的影响

图 5 为不同灌水和遮阴下小粒咖啡叶片水分利用效率  $WUE$  日变化。由图可知,与  $W_L$  相比,处理  $W_H$  和  $W_M$  分别提高日均水分利用效率 36.79% 和 16.98%,水分利用效率随着灌水量增加而增大。在处理  $W_H$  下,与  $S_0$  相比,遮阴处理  $S_M$  和  $S_H$  的日均

水分利用效率减小了 5.97% 和 10.11%,  $S_L$  的日均水分利用效率增大了 6.64%,表明适当地遮阴有利于提高水分利用效率。与  $W_L S_0$  相比,处理  $W_M S_0$ ,  $W_H S_0$  和  $W_H S_L$  分别提高日均水分利用效率 13.94%, 35.47% 和 44.47%,  $W_H S_L$  的提高率最大,因此  $W_H S_L$  为水分利用效率的最佳水光耦合模式。

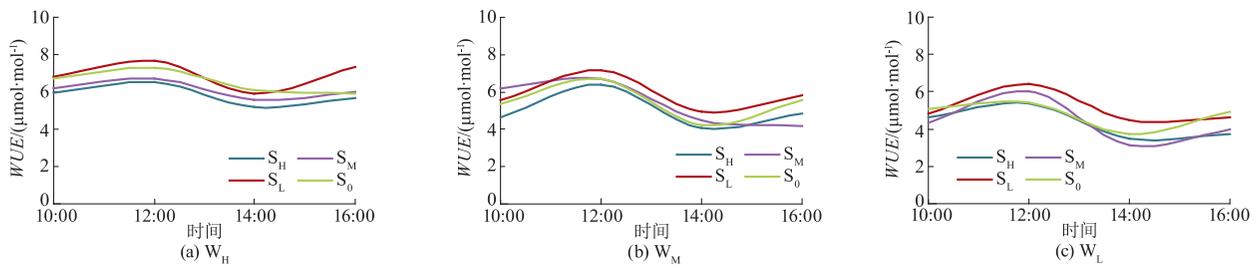


图5 不同灌水和遮阴下小粒咖啡叶片水分利用效率日变化  
Fig. 5 Diurnal variation of leaf water use efficiency of *Coffea arabica* at different irrigation and shading levels

2.8 水光耦合对叶片光能利用效率的影响

图6为水光耦合对小粒咖啡光能利用效率LUE的影响.由图可见,处理W<sub>H</sub>和W<sub>M</sub>的日均光能利用效率比W<sub>L</sub>增大了121.95%和61.64%.与S<sub>0</sub>相比,处理S<sub>M</sub>和S<sub>H</sub>的日均光能利用效率减小了5.30%和24.07%,S<sub>L</sub>的日均光能利用效率增

大了28.51%,光能利用效率随着遮阴度增大而减小,而适当遮阴可促进光能利用效率.与W<sub>L</sub>S<sub>H</sub>相比,处理W<sub>L</sub>S<sub>0</sub>,W<sub>H</sub>S<sub>H</sub>和W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>分别增大日均光能利用效率7.96%,109.56%和231.04%,可见W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>的最大,因此光能利用效率的最佳水光耦合模式是W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>.

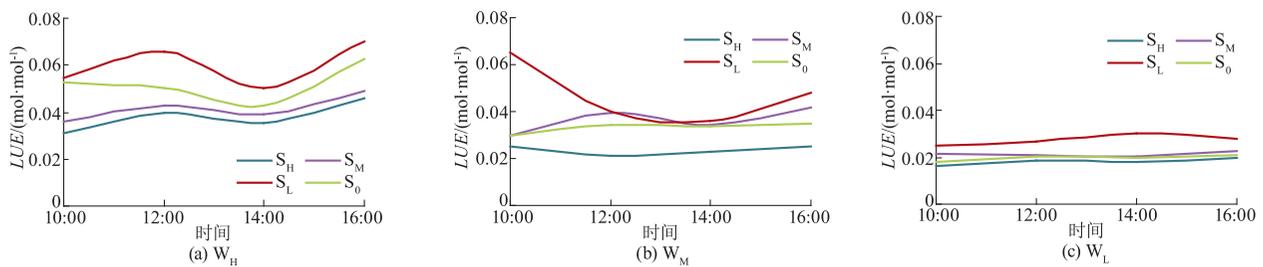


图6 水光耦合对小粒咖啡光能利用效率的影响  
Fig. 6 Effect of water and light coupling on light use efficiency of *Coffea arabica*

2.9 水光耦合对产量的影响

图7为水光耦合对小粒咖啡产量Y的影响.由图可知,灌水处理与遮阴处理及其两者的交互作用对小粒咖啡鲜豆产量影响具有统计学意义.与W<sub>L</sub>相比,处理W<sub>H</sub>和W<sub>M</sub>的鲜豆产量分别提高了121.58%和47.85%,鲜豆产量随着灌水量增加而增加.与S<sub>0</sub>相比,处理S<sub>M</sub>和S<sub>H</sub>的鲜豆产量分别减少了8.13%和28.96%,S<sub>L</sub>的鲜豆产量却增加了20.93%,因此遮阴处理S<sub>L</sub>可以增加鲜豆产量.与W<sub>L</sub>S<sub>0</sub>相比,处理W<sub>M</sub>S<sub>0</sub>,W<sub>H</sub>S<sub>0</sub>和W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>分别增加鲜豆产量41.84%,99.58%和141.49%,说明水光耦合对鲜豆产量有很大的影响作用.

干豆产量,而S<sub>L</sub>可以增加干豆产量.与W<sub>L</sub>S<sub>0</sub>相比,处理W<sub>M</sub>S<sub>0</sub>,W<sub>H</sub>S<sub>0</sub>和W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>分别增加干豆产量44.55%,105.14%和143.41%,其中W<sub>H</sub>S<sub>L</sub>的增量最大,为6131.84 kg/hm<sup>2</sup>,是W<sub>L</sub>S<sub>0</sub>的2.43倍,因此,灌水处理W<sub>H</sub>和遮阴处理S<sub>L</sub>的耦合模式可显著提高干豆产量.

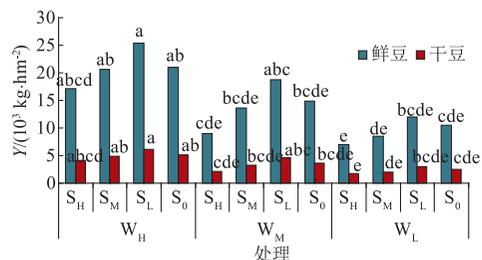


图7 水光耦合对小粒咖啡产量的影响  
Fig. 7 Effect of water - light coupling on dry bean yield of *Coffea arabica*

灌水处理与遮阴处理及其两者的交互作用对小粒咖啡干豆产量影响具有统计学意义.与W<sub>L</sub>相比,处理W<sub>H</sub>和W<sub>M</sub>的干豆产量分别提高了120.76%和47.27%,表明增加灌水可以提高干豆产量.与S<sub>0</sub>相比,处理S<sub>M</sub>和S<sub>H</sub>的干豆产量分别减少了10.32%和29.48%,S<sub>L</sub>的干豆产量却增加了20.05%,表明遮阴水平S<sub>M</sub>和S<sub>H</sub>减少了小粒咖啡的

3 讨论

干热河谷区气候终年基本无霜,光热充足,90%

的降水集中在雨季,年均蒸发量为2 101.90 mm,土壤水分极度匮乏<sup>[16]</sup>.因此,在高温旱季灌水对干热河谷区的小粒咖啡增产研究工作有重要意义.研究表明,高水轻度遮阴处理能增大小粒咖啡的生长指标,并获得较高的叶片水分利用效率、叶片光能利用效率和干豆产量<sup>[3-4]</sup>,这主要由于灌水缓解了土壤干旱,为小粒咖啡生长提供了适宜的水环境;小粒咖啡是喜荫蔽植物,遮阴改变了小粒咖啡冠层微气候环境,提高了光合速率,这与前人<sup>[2,17-19]</sup>的研究结果相似.

研究还发现,与灌水处理 $W_L$ 相比,增加灌水能够明显增加小粒咖啡的株高、茎粗、新枝长度和芽数量.与遮阴处理 $S_0$ 相比,轻度遮阴增加了茎粗、冠幅和芽数量.水光交互对株高、茎粗新枝长度和芽数量影响具有统计学意义.可能是由于小粒咖啡喜荫蔽,具有利用弱光能力,灌水增加了土壤水分,提高了土壤含水率,进而促进根系对水分的吸收能力<sup>[20]</sup>.另外,水光耦合条件下的小粒咖啡叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度的日变化峰值均出现在12:00,胞间 $CO_2$ 浓度的峰值出现在14:00,存在光合午休现象<sup>[21]</sup>.适当遮阴和增加灌水能显著提高小粒咖啡叶片日均净光合速率,遮阴降低了蒸腾速率和胞间 $CO_2$ 浓度,缓解了光合午休现象,从而提高了水分利用效率和光能利用效率.处理 $W_H S_L$ 下的小粒咖啡叶片蒸腾速率较小而光合速率较大,从而得出较大的水分利用效率,同时该处理的光能利用效率也最大,该处理为最优水光耦合模式<sup>[22]</sup>.因此,干热河谷区小粒咖啡应当采取适当的遮阴和适宜的土壤水分的管理方法,以改善小粒咖啡生长的微环境,这对于提高小粒咖啡生长和水分利用效率具有重要的科学意义.

水光适量组合能实现产量的稳定增加<sup>[23-25]</sup>.研究发现,与 $W_L$ 相比,增加灌水能显著提高小粒咖啡的干豆产量.与 $S_0$ 相比,轻度遮阴增加了产量.水光交互作用对干豆产量影响显著, $W_H S_L$ 获得最大的干豆产量(6 131.84 kg/hm<sup>2</sup>).可能是由于在土壤水分极度匮乏的开花期灌水,迫使咖啡提前开花,并增加开花数和结果数,轻度遮阴能促进对水分和光能的利用<sup>[3]</sup>.研究还发现,遮阴的增产效应与灌水量相关,灌水量较少时( $W_M$ 或 $W_L$ ),遮阴减少了干豆产量,而灌水量适宜时( $W_H$ ),过度遮阴显著降低干豆产量.主要由于土壤水分缺失抑制根系生长和吸收,影响了植株的正常生长,水分的缺失导致光合的降低,故水分利用率降低,同时不能获得较高

的光能利用率;轻度遮阴放缓了株高的增长速度,但是加速了茎粗、冠幅和芽数量的生长速度,同时增大了光合速率,进而提高光合同化产物,提高干豆产量.这与相关研究结论一致<sup>[4,22]</sup>.说明轻度遮阴增加了干热河谷区小粒咖啡的产量.

水光调控的主要目标是稳定增产和高效节水,涉及的指标较多且互相关联.处理 $W_H S_L$ 下的小粒咖啡的冠幅、新枝长度和芽数量较大,净光合速率最大,水分利用效率和光能利用效率最高,同时产量也最大,表明在 $W_H$ 灌水条件下,轻度的遮阴策略能够实现小粒咖啡水分高效利用和稳定增产.

## 4 结 论

1) 水光交互作用对小粒咖啡的株高、茎粗、新枝长度和芽数量影响具有统计学意义,与 $W_L S_0$ 相比,处理 $W_H S_L$ 的株高、茎粗、新枝长度和芽数量分别增加了13.20%、10.88%、17.46%和31.43%,该处理对生长起到了一定的促进作用.

2) 水光交互作用对小粒咖啡日均净光合速率、气孔导度、叶片水分利用效率和叶片光能利用效率起到了一定促进作用,与 $W_L S_0$ 相比,增加灌水和遮阴,日均净光合速率、气孔导度、叶片水分利用效率和叶片光能利用效率分别增加12.61%~28.46%、108.90%~185.57%、13.94%~44.47%和7.96%~231.04%,其中处理 $W_H S_L$ 的增加量最大.

3) 在适宜的灌水条件下,轻度遮阴增加了小粒咖啡产量.轻度遮阴下,过度限量灌溉会造成产量降低.从高效节水增产的角度考虑,建议干热河谷区小粒咖啡的水光耦合模式为 $W_H S_L$ 组合.

研究成果可为干热区小粒咖啡的水光管理模式提供一定的依据和参考.

## 参考文献 (References)

- [1] 张洪波,周华,李锦红,等.中国小粒种咖啡高海拔种植研究[J].热带农业科学,2014,37(7):21-26,32.  
ZHANG Hongbo, ZHOU Hua, LI Jinhong, et al. Growing of *Coffea arabica* in high altitudes in China[J]. Chinese journal of tropical agriculture, 2014, 37(7):21-26,32. (in Chinese)
- [2] CAI C T, CAI Z Q, YAO T Q, et al. Vegetative growth and photosynthesis in coffee plants under different watering and fertilization managements in Yunnan, SW China[J]. Photosynthetica, 2007,45(3):455-461.

- [ 3 ] CRISOSTO C H, GRANTZ D A, MEINZER F C. Effects of water deficit on flower opening in coffee (*Coffea arabica* L.) [J]. *Tree physiology*, 1992, 10(2): 127 - 139.
- [ 4 ] 王克全, 何新林, 王振华, 等. 不同灌水处理对滴灌春小麦生长及产量的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2010(9): 41 - 42, 47.  
WANG Kequan, HE Xinlin, WANG Zhenhua, et al. Effect of different drip irrigation treatments on growth and yield of spring wheat [J]. *Water saving irrigation*, 2010(9): 41 - 42, 47. (in Chinese)
- [ 5 ] 钟原, 刘小刚, 耿宏焯, 等. 亏缺灌溉与氮营养对小粒咖啡苗木生长及水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 89 - 93.  
ZHONG Yuan, LIU Xiaogang, GENG Hongzhuo, et al. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on growth and water consumption of *Coffea arabica* seedling [J]. *Agricultural research in the arid areas*, 2014, 32(1): 89 - 93. (in Chinese)
- [ 6 ] 严海燕, 董然, 金光勋, 等. 遮阴对富贵草光合特性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(5): 46 - 49, 59.  
YAN Haiyan, DONG Ran, JIN Guangxun, et al. Effects of shading on photosynthetic characteristics of *pachysandra terminalis* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(5): 46 - 49, 59. (in Chinese)
- [ 7 ] 刘万德, 李帅锋, 郎学东, 等. 云南红豆杉人工药用原料林春芽数量及其动态[J]. *林业科学*, 2013, 49(8): 161 - 167.  
LIU Wandu, LI Shuaifeng, LANG Xuedong, et al. Spring bud number and dynamic of the planted pharmaceutical raw material forest of *taxus yunnanensis* [J]. *Scientia silvae sinicae*, 2013, 49(8): 161 - 167. (in Chinese)
- [ 8 ] 刘小刚, 徐航, 程金焕, 等. 水肥耦合对小粒咖啡苗木生长和水分利用的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 40(1): 33 - 40.  
LIU Xiaogang, XU Hang, CHENG Jinhuan, et al. Coupling effects of water and fertilization on growth and water use of *Coffea arabica* seedling [J]. *Journal of Zhejiang University (agric life sci)*, 2014, 40(1): 33 - 40. (in Chinese)
- [ 9 ] 蔡志全, 蔡传涛, 齐欣, 等. 施肥对小粒咖啡生长光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1561 - 1564.  
CAI Zhiquan, CAI Chuantao, QI Xin, et al. Effects of fertilization on the growth, photosynthetic characteristics and yield of *Coffea arabica* [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2004, 15(9): 1561 - 1564. (in Chinese)
- [ 10 ] 刘贤赵, 康绍忠, 邵明安, 等. 土壤水分与遮荫水平对棉花叶片光合特性的影响研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 377 - 381.  
LIU Xianzhao, KANG Shaozhong, SHAO Ming'an, et al. Effects of soil moisture and shading levels on photosynthetic characteristics of cotton leaves [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2000, 11(3): 377 - 381. (in Chinese)
- [ 11 ] FRANCK N, VAAST P. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels [J]. *Trees*, 2009, 23(4): 761 - 769.
- [ 12 ] 刘小刚, 郝琨, 韩志慧, 等. 水氮耦合对干热区小粒咖啡产量和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143 - 150, 160.  
LIU Xiaogang, HAO Kun, HAN Zhihui, et al. Effect of water and nitrogen coupling on yield and quality of *arabica coffea* in dry - hot area [J]. *Transactions of the CSAM*, 2016, 47(2): 143 - 150, 160. (in Chinese)
- [ 13 ] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6 - 12.  
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6 - 12. (in Chinese)
- [ 14 ] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2902 - 2909.  
YU Wenying, JI Ruipeng, FENG Rui, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage [J]. *Acta ecologica sinica*, 2015, 35(9): 2902 - 2909. (in Chinese)
- [ 15 ] 叶子飘, 康华靖, 杨小龙. 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下番茄幼苗叶片的光能利用效率[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2543 - 2550.  
YE Zipiao, KANG Huajing, YANG Xiaolong. Light-use efficiency of tomato seedlings leaves at different CO<sub>2</sub> concentrations [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2016, 27(8): 2543 - 2550. (in Chinese)
- [ 16 ] 穆军, 李占斌, 李鹏, 等. 干热河谷干季土壤水分动态研究[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(12): 22 - 25.  
MU Jun, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Study on soil moisture dynamic variation law in dry seasons in dry - hot valley areas [J]. *Journal of Yangtze River Scientific*

- Research Institute, 2009, 26(12): 22 - 25. (in Chinese)
- [17] 万梦丹, 刘小刚, 徐航, 等. 不同灌水和光强条件下小粒咖啡叶片光响应及光合生理特征[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 795 - 803.  
WAN Mengdan, LIU Xiaogang, XU Hang, et al. Light response and photosynthetic physiology characteristics of *Coffea arabica* L. leaf at different irrigation and light intensity levels[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(9): 795 - 803. (in Chinese)
- [18] 刘小刚, 张岩, 程金焕, 等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 160 - 166.  
LIU Xiaogang, ZHANG Yan, CHENG Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(8): 160 - 166. (in Chinese)
- [19] CHEMURA A. The growth response of coffee (*Coffea arabica* L.) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels[J]. International journal of recycling of organic waste in agriculture, 2014, 3(2): 1 - 9.
- [20] 刘吉利, 赵长星, 吴娜, 等. 苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 469 - 476.  
LIU Jili, ZHAO Changxing, WU Na, et al. Effects of drought and rewatering at seedling stage on photosynthetic characteristics and water use efficiency of peanut [J]. Scientia agricultura sinica, 2011, 44(3): 469 - 476. (in Chinese)
- [21] 陈金陵, 杨启良, 刘小刚, 等. 盐胁迫条件下施氮对小桐子光合特性的调控效应[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(7): 631 - 638.  
CHEN Jinling, YANG Qiliang, LIU Xiaogang, et al. Responses of nitrogen supply on photosynthesis of *Jatropha curcas* L. under salt stress[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(7): 631 - 638. (in Chinese)
- [22] 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 Yuanshuai, FENG Wei, ZHANG Haiyan, 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. (in Chinese)
- [23] 周罕觅, 张富仓, 李志军, 等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171 - 180.  
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(12): 171 - 180. (in Chinese)
- [24] 杜彦修, 季新, 张静, 等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1307 - 1317.  
DU Yanxiu, JI Xin, ZHANG Jing, et al. Research progress on the impacts of low light intensity on rice growth and development [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2013, 21(11): 1307 - 1317. (in Chinese)
- [25] LIU Xiaogang, LI Fusheng, ZHANG Yan, et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China[J]. Agricultural water management, 2016, 172: 1 - 8.

(责任编辑 张文涛)