

不同遮阴下亏缺灌溉对小粒咖啡生长和水光利用的影响

刘小刚 万梦丹 齐韵涛 杨启良 刘艳伟

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为探明小粒咖啡适宜的水光管理模式,通过盆栽试验研究了3个亏缺灌溉水平:轻度亏缺灌水(DI_L , (65% ~ 75%)FC,FC为田间持水量)、中度亏缺灌水(DI_M , (55% ~ 65%)FC)和重度亏缺灌水(DI_S , (45% ~ 55%)FC),3个遮阴水平:不遮阴(S_0 , 自然光照)、轻度遮阴(S_L , 50%自然光照)和重度遮阴(S_S , 30%自然光照)对小粒咖啡日均光合特性、生长及水光利用效率的影响,并建立了不同亏缺灌溉和遮阴水平下水分和光能利用的回归模型。结果表明:与 DI_L 处理相比, DI_S 处理降低小粒咖啡叶片净光合速率、气孔导度和光能利用效率分别为17.61%、22.99%和27.43%,减少总干物质积累量6.29%;而 DI_M 处理对其影响不明显。 S_0 处理的小粒咖啡叶片光能利用效率最小, S_L 处理次之, S_S 处理最大。 S_0 处理或 S_S 处理抑制叶片净光合速率和水分利用效率, S_L 处理增加干物质积累量11.14%。与 $DI_L S_0$ 处理相比,亏缺灌溉时遮阴显著降低叶片蒸腾速率而增加叶片光能利用效率。叶片光能利用效率与光合有效辐射呈显著的指数关系。随着亏水和遮阴程度的增加,灌溉水利用效率先增后减。小粒咖啡最优的水光耦合模式为轻度遮阴下轻度亏缺灌溉组合($DI_L S_L$),该组合能同时获得较高的干物质累积和水分利用效率。

关键词: 小粒咖啡; 亏缺灌溉; 遮阴; 光合特性; 光能利用; 水光耦合

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0191-07

Effect of Deficit Irrigation on Growth and Water – Radiation Use of Arabica Coffee under Different Shading

LIU Xiaogang WAN Mengdan QI Yuntao YANG Qiliang LIU Yanwei

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

Abstract: Arabica coffee has the habit of shading cultivation and its growth often is inhibited by soil drought stress. Shade changes micro-climate of coffee growth and further affects photosynthetic characteristics and water consumption. The object was to explore suitable management mode of water and light, using three levels of deficit irrigation, i.e., light deficit irrigation (DI_L , (65% ~ 75%) field capacity), medium deficit irrigation (DI_M , (55% ~ 65%) field capacity) and severe deficit irrigation (DI_S , (45% ~ 55%) field capacity), respectively, and three levels of shade, i.e., no shade (S_0 , natural light), light shade (S_L , 50% natural light) and severe shade (S_S , 30% natural light). The effect of deficit irrigation and shading levels on daily mean photosynthetic characteristics, growth and water – radiation use efficiency of arabica coffee was studied by pot experiments, and regression model was established under different deficit irrigation and shade levels. The results showed that compared with DI_L , DI_S reduced coffee leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance and radiation use efficiency by 17.61%, 22.99% and 27.43%, respectively, and reduced the total dry mass by 6.29%, but DI_M had no significant effects on leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, radiation use efficiency and total dry mass. Leaf radiation use efficiency of S_0 was the lowest, S_L was the second and S_S was the highest. S_0 or S_S inhibited net leaf photosynthetic rate and water use efficiency, and S_L increased dry mass by 11.14%. Compared with $DI_L S_0$, shading under deficit irrigation reduced leaf transpiration rate but increased light use efficiency significantly. Leaf radiation use efficiency showed a significant exponential relation with photosynthetically active radiation. Irrigation water use efficiency was increased first and then decreased with the increase of water deficit level and shading degree. On the basis of high dry mass accumulation and water use efficiency, the suitable mode of water and light management of arabica coffee was the combination of light deficit irrigation and light shade ($DI_L S_L$). The study results

收稿日期: 2016 – 09 – 24 修回日期: 2016 – 10 – 23

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

作者简介: 刘小刚(1977—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: liuxiaogangjy@126.com

can provide scientific basis for irrigation and shade management of arabica coffee. In addition, this experiment was only focused on coffee growth, dry matter and water – radiation use, and yield, quality and flavor were not involved. Further systematic discussion of arabica coffee was needed under different irrigation and shade conditions.

Key words: arabica coffee; deficit irrigation; shading; photosynthetic characteristics; radiation use; water and radiation coupling

引言

小粒咖啡是我国栽培的主要咖啡品种,经常受到季节性干旱和土壤水分亏缺的影响^[1]。亏缺灌溉是针对水资源紧缺和用水效率不高提出的一种节水灌溉新技术^[2-3]。土壤水分亏缺显著降低咖啡根系活力、水分利用效率、开花数和结果数,而增加叶片中叶绿素、类胡萝卜素、过氧化物酶活性、脯氨酸、丙二醛含量以及细胞透性^[1,4]。水分亏缺降低咖啡叶片气孔导度和光合速率,气孔导度降幅大于光合速率降幅,同时抑制咖啡生长(降低树高、冠幅、树干直径和根系密度)^[5-8]。而不同水分亏缺程度下小粒咖啡耗水规律和水分利用效率尚需进一步探讨。

咖啡具有荫蔽栽培的生长习性,合理遮阴可为咖啡提供适宜的生长发育环境^[9]。荫蔽栽培不显著降低叶片光合速率、蒸腾速率,而增加气孔导度和叶水势。增大荫蔽会使咖啡的光合速率日变化曲线由不对称的双峰曲线变为单峰曲线^[10],使气孔导度对净光合速率的抑制逐渐降低,而光合有效辐射中的光通量密度对净光合速率影响不明显^[11]。也有研究表明,荫蔽栽培对咖啡叶片光合特性影响不明显^[12]。遮阴处理对咖啡幼树的营养和生殖生长影响不明显,而对成龄树的节点数、叶面积和产量影响显著。咖啡进入盛产期后遮阴处理能提高叶面积而降低节点数,遮阴对多年的均产影响不明显^[13]。另有研究发现,咖啡叶面积随遮阴度的增加而增加,而产量及鲜果数量随遮阴度的增加而降低。遮阴处理减小咖啡的叶面积和叶片厚度,而增加枝条长度^[14]。

灌溉或遮阴单一因素对咖啡生理生态的影响研究较多,而水光耦合对咖啡生长调控、耗水规律、水分和光能利用效率的综合影响尚不清楚。遮阴改变咖啡生长的微气候环境,从而改变叶片光合生理特性和耗水规律。本文在不同遮阴水平下,研究亏缺灌溉对小粒咖啡生长、干物质累积、水分和光能利用效率的影响,并建立亏缺灌溉和遮阴交互作用下的水光利用回归模型,以期找到小粒咖啡适宜的水光供应模式,为小粒咖啡节水灌溉和荫蔽栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2014年4月—2015年12月在昆明理工大学农业工程学院温室内(102°45'E、24°42'N)进行。2014年4月10日移栽龄期为1年且生长均匀的小粒咖啡幼树(卡蒂姆 P796)到生长盆(上底直径30 cm、下底直径22.5 cm、高30 cm)中,盆底均匀分布5个直径为0.5 cm小孔以保证根区通气良好。供试土壤为老冲积母质发育的红褐土,田间持水量(FC)为24.3%,土壤粒径0~0.02 mm的颗粒占7.9%,0.02~0.10 mm的颗粒占32.3%,0.10~0.25 mm的颗粒占45.3%,0.25~1.00 mm的颗粒占13.5%。土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量(质量比)分别为5.05、0.87、0.68、13.9 g/kg。每盆装土14 kg,装土容重1.20 g/cm³。磷肥和钾肥施入水平为0.5 g/kg(KH₂PO₄)。

1.2 试验设计

试验设灌水和遮阴2个因素。3个灌水水平分别为轻度亏缺灌溉(DI_L, (65%~75%)FC)、中度亏缺灌溉(DI_M, (55%~65%)FC)和重度亏缺灌溉(DI_S, (45%~55%)FC)。3个遮阴水平分别为不遮阴(S₀, 自然光照)、轻度遮阴(S_L, 50%自然光照)和重度遮阴(S_S, 30%自然光照)。完全组合设计,共9个处理,3次重复。通过不同密度的黑色遮阴网实现遮阴,遮阴网与小粒咖啡树冠始终保持1 m距离,便于通风和取样观测。称量法控制灌水量,灌水处理前各处理保持较好的土壤含水率((75%~85%)FC),缓苗后60 d开始灌水和遮阴处理,灌水周期为7 d。光照强度采用光照测定系统(Li-1400型)测定,用脚手架和不同透光能力的黑色遮阴网搭建可拆卸式遮阴棚,各苗木间保持一定的株行距,确保彼此互不遮阴影响。

1.3 测定项目与方法

2015年7月12日(旺长期灌水前1 d)用便携式光合仪(Li-6400型)测定树顶靠下功能叶的光合特性(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度),测定时间为08:00—18:00,每隔2 h测定1次。每个处理3个重复,每个重复测定3次,取日均值进行分析。叶片瞬时水分利用效率为净光合速率与蒸腾速率的

比值,光能利用效率为净光合速率与光合有效辐射的比值^[15]。

2015 年 12 月 9 日测定小粒咖啡的生长指标和干物质累积量。株高和枝条长度采用毫米刻度尺测定、基茎和叶面积分别用游标卡尺和直接称量换算法测定。根系取样时,将栽植容器放在尼龙网筛上用水冲去泥土,获得整体根系,再用流水缓缓冲洗干净,冲洗时在根系下面放置 100 目筛以防止脱落的根系被水冲走,同时用滤纸和吸水纸擦干根系上的水分测其鲜质量。鲜样 105℃ 杀青 30 min 后 60℃ 干燥至质量恒定,用天平称其干质量。根冠比为根系与冠层干物质量的比值;总耗水量由水量平衡方程计算,灌溉水利用效率为总干物质量与总耗水量的比值。

1.4 数据处理

用 SAS 8.2(SAS Institute, USA)统计软件的两因素方差分析和 Duncan($P=0.05$)法进行方差分析和多重比较,回归分析采用 IBM SPSS Statistics 21 进行。

2 结果与分析

2.1 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡叶片光合特性的影响

灌水水平对小粒咖啡叶片净光合速率、气孔导

度和光能利用效率日均值影响显著(表 1),遮阴水平对净光合速率、水分利用效率和光能利用效率日均值影响显著,二者交互作用对蒸腾速率、气孔导度和光能利用效率日均值影响显著。与 DI_L 处理相比, DI_M 处理改变净光合速率、气孔导度和光能利用效率不明显,而 DI_S 处理的净光合速率、气孔导度和光能利用效率分别降低 17.61%、22.99% 和 27.43%。这表明轻度和中度亏缺灌溉对光合特性的影响基本相同,而重度亏缺灌溉明显抑制叶片光合性能。与 S_0 处理相比, S_L 处理的净光合速率、叶片水分利用效率和叶片光能利用效率分别增加 23.35%、24.32% 和 201.18%, S_S 处理分别增加 8.38%、16.03% 和 392.25%。可知随着遮阴水平的提高,净光合速率和叶片水分利用效率先增后减,而光能利用效率持续增加。与 $DI_L S_0$ 处理相比,其余各处理都不同程度降低了蒸腾速率, $DI_S S_0$ 处理降低蒸腾速率最大为 20.27%;除 $DI_S S_0$ 处理和 $DI_S S_L$ 处理气孔导度分别降低 15.43% 和 8.15% 外,其余处理气孔导度增加 13.98% ~ 59.97%; $DI_M S_0$ 处理和 $DI_S S_0$ 处理光能利用效率分别降低 7.72% 和 33.02%,而其余处理增加 144.23% ~ 402.54%。这与自然光照(S_0)条件下光合有效辐射较大而小粒咖啡适应光辐射较低的环境密切相关。

表 1 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡叶片日均光合特性的影响

Tab.1 Effect of deficit irrigation on daily photosynthetic characteristics of arabica coffee leaf under different shading						
灌水水平	遮阴水平	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片水分利用效率/ ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	叶片光能利用效率/ ($\text{mmol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$)
DI_L	S_0	2.61 ± 0.31 ^{ab}	2.36 ± 0.28 ^a	17.65 ± 2.56 ^{ab}	1.11 ± 0.06 ^{ab}	6.07 ± 0.05 ^f
	S_L	3.11 ± 0.40 ^a	2.20 ± 0.17 ^{ab}	28.23 ± 5.86 ^a	1.43 ± 0.17 ^a	16.96 ± 0.01 ^{cd}
	S_S	2.72 ± 0.18 ^{ab}	2.14 ± 0.32 ^{ab}	20.67 ± 3.84 ^{ab}	1.44 ± 0.26 ^a	28.49 ± 0.09 ^b
DI_M	S_0	2.62 ± 0.38 ^{ab}	2.22 ± 0.25 ^a	24.81 ± 3.65 ^{ab}	1.18 ± 0.13 ^{ab}	5.60 ± 0.13 ^{fg}
	S_L	2.94 ± 0.30 ^{ab}	2.21 ± 0.30 ^a	21.90 ± 6.47 ^{ab}	1.40 ± 0.13 ^{ab}	15.63 ± 0.07 ^{de}
	S_S	2.97 ± 0.32 ^{ab}	2.10 ± 0.17 ^{ab}	23.04 ± 4.66 ^{ab}	1.43 ± 0.14 ^a	30.52 ± 0.92 ^e
DI_S	S_0	1.99 ± 0.26 ^b	1.88 ± 0.21 ^b	14.92 ± 2.33 ^b	1.06 ± 0.09 ^{ab}	4.07 ± 0.08 ^a
	S_L	2.84 ± 0.23 ^{ab}	2.25 ± 0.27 ^a	16.21 ± 4.02 ^b	1.33 ± 0.15 ^{ab}	14.83 ± 0.36 ^e
	S_S	2.13 ± 0.28 ^{ab}	2.15 ± 0.25 ^{ab}	20.12 ± 4.22 ^{ab}	1.01 ± 0.11 ^b	18.49 ± 0.12 ^c
显著性检验(P 值)						
灌水水平		< 0.001	0.217 9	0.006 9	0.088 0	< 0.001
遮阴水平		< 0.001	0.467 8	0.302 5	0.031 0	< 0.001
灌水水平 × 遮阴水平		0.076	0.043 8	0.039 7	0.476 8	< 0.001

注:数据为平均值 ± 标准差($n=3$),同列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡生长特性的影响

灌水水平对小粒咖啡株高、茎粗、枝条数和叶片数影响显著,遮阴水平对叶片数影响显著,二者交互作用对茎粗和叶片数影响显著(表 2)。这表明灌水水平对生长指标的影响大于遮阴水平。与 DI_L 处理

相比, DI_M 处理株高、枝条数和叶片数增加不明显,茎粗减小不明显; DI_S 处理的株高、茎粗、枝条数和叶片数分别降低 7.31%、15.85%、8.46% 和 17.52%。与 S_0 处理相比, S_L 处理叶片数增加不明显,而 S_S 处理的叶片数减少 9.02%。与 $DI_L S_0$ 处理相比, $DI_L S_S$ 处理、 $DI_M S_0$ 处理、 $DI_M S_L$ 处理、 $DI_S S_0$ 处理、 $DI_S S_L$ 处理

和 DI_sS_s 处理的茎粗分别减小 15.54%、8.79%、15.88%、26.20%、18.43% 和 18.00%，而 DI_LS_L 处理和 DI_MS_s 处理茎粗减小不明显；DI_LS_s 处理、DI_MS₀ 处理、DI_sS₀ 处理、DI_sS_L 处理和 DI_sS_s 处理叶片数分

别减少 25.26%、11.53%、21.24%、19.56% 和 34.20%，而 DI_LS_L 处理、DI_MS_L 处理和 DI_MS_s 处理叶片数减少不明显。

表 2 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡生长的影响

Tab.2 Effect of deficit irrigation on arabica coffee growth under different shading							
灌水水平	遮阴水平	树高/cm	茎粗/mm	冠幅/cm	枝条数	叶片数	新梢长度/cm
DI _L	S ₀	74.5 ± 1.2 ^{ab}	11.8 ± 0.3 ^a	66.7 ± 3.4 ^a	23 ± 2 ^{abc}	386 ± 7 ^a	16.0 ± 0.7 ^a
	S _L	67.8 ± 1.8 ^{abc}	11.5 ± 0.3 ^a	73.4 ± 5.9 ^a	24 ± 1 ^{ab}	379 ± 19 ^a	18.2 ± 0.5 ^a
	S _s	69.2 ± 2.9 ^{abc}	9.9 ± 0.2 ^{bc}	71.0 ± 0.5 ^a	19 ± 2 ^d	289 ± 11 ^c	17.1 ± 0.1 ^a
DI _M	S ₀	75.3 ± 2.7 ^a	10.7 ± 0.1 ^{ab}	70.3 ± 0.3 ^a	24 ± 4 ^{ab}	342 ± 17 ^b	15.3 ± 1.0 ^a
	S _L	71.3 ± 0.8 ^{abc}	9.9 ± 0.8 ^{bc}	70.1 ± 5.4 ^a	24 ± 2 ^{ab}	378 ± 8 ^a	18.5 ± 2.8 ^a
	S _s	74.9 ± 1.2 ^a	11.6 ± 0.1 ^a	72.2 ± 2.2 ^a	26 ± 1 ^a	396 ± 11 ^a	18.1 ± 0.1 ^a
DI _s	S ₀	65.6 ± 5.5 ^{bc}	8.7 ± 0.2 ^c	64.1 ± 2.5 ^a	20 ± 2 ^{cd}	304 ± 4 ^c	15.7 ± 0.1 ^a
	S _L	65.8 ± 2.8 ^{bc}	9.6 ± 0.6 ^{bc}	63.9 ± 2.6 ^a	21 ± 3 ^{bcd}	311 ± 4 ^{bc}	16.6 ± 1.0 ^a
	S _s	64.7 ± 0.7 ^c	9.7 ± 0.5 ^{bc}	65.6 ± 1.0 ^a	20 ± 1 ^{cd}	254 ± 4 ^d	16.3 ± 0.4 ^a
显著性检验 (P 值)							
灌水水平		0.012 6	0.000 9	0.105 8	0.002 1	<0.000 1	0.530 3
遮阴水平		0.299 5	0.973 3	0.600 8	0.270 6	0.003 5	0.148 0
灌水水平 × 遮阴水平		0.705 5	0.009 2	0.839 3	0.083 7	0.001 2	0.844 4

2.3 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡干物质质量积累的影响

表 3 统计表明,除灌水水平对叶片干物质质量、遮阴水平对茎干物质质量和根冠比、二者交互作用对根干物质的影响不显著外,灌水水平、遮阴水平及交互作用对其余各器官干物质质量及根冠比影响显著。与 DI_L处理相比,DI_M处理增加叶、杆干物质质量和根冠比和减少总干物质质量不明显,而茎干物质质量减少 6.36%。DI_s处理的根、茎、杆、总干物质质量和根冠比分别减小 17.90%、33.83%、30.03%、13.13% 和 6.29%。与 S₀处理相比,S_L处理的根、叶、杆和总干

物质质量分别增加 12.33%、10.79%、16.42% 和 11.14%。S_s处理的根和杆干物质质量减少 5.75% 和 7.99%,而增加叶干物质质量和减少总干物质质量不明显。与 DI_LS₀处理相比,除 DI_LS_L处理增加和 DI_MS₀处理减少茎干物质质量不明显外,其余处理茎干物质质量减少 12.78% ~ 45.30%。DI_sS_L处理叶片干物质质量增加 8.12%,而 DI_LS_L处理和 DI_MS_L处理增加叶片干物质质量不明显。其余处理叶片干物质质量降低 4.38% ~ 13.34%。除 DI_MS₀处理减少杆干物质质量不明显外,DI_LS_L处理增加了 5.42%,而其余处理减少了 6.27% ~ 47.40%。DI_LS_L处理总干物质质量增加

表 3 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡干物质质量积累的影响

Tab.3 Effect of deficit irrigation on dry mass of arabica coffee under different shading							
灌水水平	遮阴水平	各器官干物质质量/(g·棵 ⁻¹)					根冠比/%
		根	茎	叶	杆	总计	
DI _L	S ₀	43.35 ± 2.55 ^{bc}	22.14 ± 0.52 ^a	102.03 ± 1.35 ^{ab}	40.99 ± 0.31 ^{ab}	208.51 ± 3.69 ^{bc}	26.25 ± 1.36 ^{bc}
	S _L	50.79 ± 1.00 ^a	23.23 ± 0.35 ^a	103.09 ± 1.49 ^{ab}	43.21 ± 2.10 ^a	220.32 ± 1.96 ^a	29.96 ± 0.42 ^a
	S _s	40.72 ± 0.39 ^{cd}	18.18 ± 0.41 ^b	91.52 ± 1.04 ^{bc}	28.41 ± 0.14 ^c	178.83 ± 1.20 ^c	29.48 ± 0.62 ^{ab}
DI _M	S ₀	45.38 ± 0.83 ^b	21.61 ± 1.31 ^a	94.77 ± 0.32 ^{bc}	36.94 ± 0.65 ^c	198.70 ± 0.81 ^{cd}	29.60 ± 0.86 ^{ab}
	S _L	50.53 ± 0.10 ^a	19.31 ± 0.30 ^b	102.59 ± 4.54 ^{ab}	40.07 ± 1.81 ^{abc}	212.50 ± 3.13 ^{ab}	31.20 ± 0.52 ^a
	S _s	41.15 ± 0.52 ^{cd}	18.59 ± 1.06 ^b	97.85 ± 1.85 ^{bc}	38.42 ± 0.80 ^{bc}	196.01 ± 0.51 ^d	26.57 ± 0.34 ^{bc}
DI _s	S ₀	36.08 ± 0.06 ^c	12.11 ± 0.16 ^d	88.42 ± 4.80 ^c	21.56 ± 0.82 ^f	158.17 ± 5.84 ^f	29.55 ± 1.35 ^{ab}
	S _L	38.88 ± 0.53 ^{de}	13.81 ± 0.33 ^d	110.31 ± 7.31 ^a	32.55 ± 0.78 ^d	195.55 ± 6.73 ^d	24.82 ± 0.64 ^c
	S _s	35.76 ± 1.35 ^e	16.13 ± 0.22 ^c	97.56 ± 0.99 ^{bc}	24.71 ± 0.89 ^f	174.16 ± 1.67 ^e	25.84 ± 0.92 ^c
显著性检验 (P 值)							
灌水水平		<0.000 1	<0.000 1	0.098 0	<0.000 1	<0.000 1	0.013 2
遮阴水平		<0.000 1	0.119 0	0.005 2	<0.000 1	<0.000 1	0.157 4
灌水水平 × 遮阴水平		0.087 5	0.000 9	0.039 2	0.000 5	0.000 8	0.002 4

5.66%，而 $DI_M S_L$ 处理总干物质质量增加不明显，其余处理减少了 4.7%~21.14%。除 $DI_S S_L$ 处理减小根冠比 5.32% 和 $DI_S S_S$ 处理根冠比减小不明显外，其余处理的根冠比均有不同程度的增加，其中 $DI_M S_L$ 处理的根冠比最大，比 $DI_L S_0$ 处理增加了 18.94%。这表明适度水分亏缺能促进根系生长，有利于提高土壤水分的利用效率，而重度水分亏缺则抑制根系生长。

2.4 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡耗水量和灌溉水利用效率的影响

灌水水平、遮阴水平及二者的交互作用对小粒咖啡耗水量及灌溉水利用效率的影响显著（图 1）。与 DI_L 处理相比， DI_M 处理和 DI_S 处理耗水量分别减小 9.61% 和 17.49%，而增加灌溉水利用效率 10.45% 和 4.82%。与 S_0 处理相比， S_L 处理和 S_S 处理耗水量分别减小 13.94% 和 23.83%，而增加灌溉水利用效率 29.13% 和 27.76%。这与遮阴降低冠层和土壤表层温度以及叶片蒸腾有关。与 $DI_L S_0$ 处理相比，其余处理耗水量减小 13.32%~33.95%，除 $DI_S S_0$ 处理灌溉水利用效率增加不明显外，其余处理灌溉水利用效率增加 9.89%~42.26%。因此，适量亏缺灌溉和适度遮阴是提高小粒咖啡水分利用

效率的 2 种有效途径。

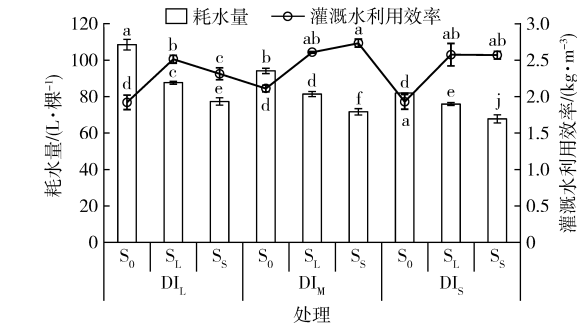


图 1 不同遮阴水平下亏缺灌溉对小粒咖啡耗水量及灌溉水利用效率的影响

Fig. 1 Effect of deficit irrigation on water consumption and irrigation water use efficiency of arabica coffee under different shading

2.5 水分和光能利用模型

遮阴条件相同时， DI_M 和 DI_S 条件下灌溉水利用效率与耗水量呈显著的二次多项式关系；灌水水平相同时， S_L 条件下的灌溉水利用效率与耗水量也呈显著的二次多项式关系。相同遮阴或灌水条件下，叶片光能利用效率与光合有效辐射均呈显著的指数关系（表 4）。

表 4 不同亏缺灌溉和遮阴水平下小粒咖啡的水光利用回归模型							
Tab.4 Regression model of water and radiation use of arabica coffee under different levels of water deficit and shading							
处理	耗水量 (X) 与灌溉水利用效率 (Y)		决定		光合有效辐射 (x) 与叶片光能利用	决定	
	回归模型		系数 R ²	P		效率 (y) 回归模型	系数 R ²
DI _L	Y = - 0.000 4X ² + 0.051 8X + 0.635 4		0.842	0.760	y = 0.042e ^{- 0.005x}	0.994	<0.001
DI _M	Y = - 0.001 0X ² + 0.145 5X - 2.318 9		0.987	0.001		0.972	0.001
DI _S	Y = - 0.006 2X ² + 0.876 7X - 28.449		0.919	0.023		0.990	<0.001
S ₀	Y = - 0.001 1X ² + 0.204 6X - 7.621 6		0.809	0.085		0.783	0.020
S _L	Y = - 0.003 3X ² + 0.542 9X - 19.71		0.868	0.047		0.771	0.021
S _S	Y = - 0.005 8X ² + 0.806 5X - 25.537		0.765	0.114		0.903	0.004

3 讨论

光照是植物进行光合作用的最重要的能量来源，而水分则是植物生长和物质运输的基础和载体^[16]。遮阴必然引起叶片光合作用、蒸腾作用、气孔导度及源库关系的改变，进而影响作物对水分和光照的吸收和利用^[17-19]。本研究发现，灌水和遮阴水平的交互作用对小粒咖啡叶片的蒸腾速率和气孔导度的日均值影响显著。主要是由于遮阴影响了冠层微气候环境，降低冠层气温并改变叶片气孔导度和蒸腾速率，因此也改变了耗水规律。亏缺灌溉下遮阴处理均不同程度降低蒸腾速率，降低程度与亏缺灌溉和遮阴水平相关。同时，在光合速率不降低或者降幅不大的情况下，叶片水分利用效率得到提高，可见亏缺灌溉下适度遮阴是小粒咖啡节水的有

效途径。90%的植物干物质来自光合作用，光能利用效率是决定植物生产力的重要因素^[20]。遮阴处理能显著提高叶片光能利用效率，表明小粒咖啡对弱光胁迫具有一定的调节和适应能力，主要通过降低光补偿点来适应光辐射强度低的环境^[15]。 DI_S 处理显著降低叶片光能利用效率，可能由于土壤水分严重胁迫导致作物对光合有效辐射的吸收及转换能力降低所致。因此，只有土壤水分适宜的条件下适度遮阴才能获得较高的叶片水分和光能利用效率。适宜的水分条件是保证植物正常生命活动的前提。本研究发现灌水对小粒咖啡生长指标的影响显著大于遮阴（表 2 和表 3）。 DI_S 显著降低了各器官干物质积累量，可能是由于水分重度亏缺严重影响叶细胞膨胀，从而降低光能截获面积，最终影响光合产物积累总量^[21-22]。 S_L 能增加干物质积累总量，

这与小粒咖啡的耐阴能力较强有关,适度遮阴时的生理活性增强,光合特性得以优化,相对增长率也得到提高^[23]。灌水和遮阴的交互作用对小粒咖啡干物质积累的交互作用显著,亏缺灌溉对干物质积累的影响与遮阴程度密切相关。轻度亏缺灌溉和轻度遮阴组合($DI_L S_L$)的干物质积累量最大,同时能获得较大的灌溉水利用效率。因此,本研究中土壤含水率(65%~75%)FC耦合50%自然光照能实现“以光调水”和节水增效的目的。主要由于适宜的水光组合能使小粒咖啡维持较高的光合作用水平和正常的生长发育的同时,减少了叶片的奢侈蒸腾量,从而保持了较高的水分利用效率。

随着遮阴水平的提高,不同亏缺灌溉水平下的耗水量逐渐减少。其中 DI_M 和 DI_S 的灌溉水利用效率与耗水量呈显著的二次曲线关系,这与遮阴改善小粒咖啡生长的微气候环境(影响光合碳循环中光调节酶活性和植物生理生化过程)^[24]、减少耗水量且提高灌溉水利用效率密切相关。 S_L 条件下灌溉水利用效率与耗水量也呈二次曲线关系,这与前人研究结果^[25-26]一致。叶片的光能利用效率与光合有效辐射呈显著的指数关系。表明光能利用效率随着光合有效辐射的增加而先迅速减小后缓慢减小;也表明当光合有效辐射增加到一定程度时,光能利用效率基本维持在同一个水平。也就是光合有效辐射超过阈值时,对提高光能利用效率意义不大。

本研究采用遮阴网实现不同光照环境,而生产中往往通过荫蔽栽培(或者间作)的方式来实现遮阴。荫蔽栽培会改变小粒咖啡冠层微气候环境和根

区土壤的水肥条件,情况比人工遮阴复杂。本研究探明小粒咖啡适宜的水光组合为 $DI_L S_L$,可为小粒咖啡的大田灌溉和遮阴管理提供理论参考。但由于本研究只设置了3个亏缺灌溉和3个遮阴水平,要得到精准的小粒咖啡水光耦合模式,还需进一步细化试验设计。另外本试验只对小粒咖啡生长、干物质质量和水、光能利用进行了研究,尚未涉及到产量及品质风味等综合指标,还需系统深入探讨。

4 结论

(1)与轻度亏缺灌溉处理(DI_L)相比,重度亏缺灌溉处理(DI_S)显著降低叶片净光合速率、气孔导度和光能利用效率,从而抑制小粒咖啡生长,减少干物质积累。

(2)随着遮阴水平的提高,小粒咖啡叶片光能利用效率随之增加,而净光合速率和水分利用效率先增后降。与 S_0 处理相比, S_L 处理显著增加小粒咖啡的干物质积累量,而 S_S 处理不利于干物质积累。

(3)与轻度亏缺灌溉不遮阴处理($DI_L S_0$)相比,遮阴条件下亏缺灌溉(DI)不同程度降低叶片蒸腾速率而增加叶片光能利用效率。轻度亏缺灌溉和轻度遮阴处理($DI_L S_L$)在获得最大干物质积累量的同时,有较高的灌溉水利用效率。

(4)小粒咖啡的叶片光能利用效率与光合有效辐射呈显著的指数关系。随着亏水和遮阴程度的增加,灌溉水利用效率先增后减。基于节水增效方面考虑,小粒咖啡最优的水光耦合模式为 $DI_L S_L$ 组合。

参 考 文 献

- 1 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/OL].农业机械学报,2014,45(8):160-166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140825&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.025.
- 2 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):160-166. (in Chinese)
- 3 PATANÈ C, TRINGALI S, SORTINO O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions[J/OL]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4):590-596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.016.
- 4 武阳,王伟,黄兴法,等.亏缺灌溉对成龄库尔勒香梨产量与根系生长的影响[J/OL].农业机械学报,2012,43(9):78-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120916&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.016.
- 5 WU Yang, WANG Wei, HUANG Xingfa, et al. Yield and root growth of mature Korla fragrant pear tree under deficit irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):78-84. (in Chinese)
- 6 VAAST P, KANTEN R, SILES P, et al. Shade: a key factor for coffee sustainability and quality[C]//ASIC 2004. 20th International Conference on Coffee Science. Bangalore, India, 2004:11-15.
- 7 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/OL]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2014, 3(2):1-9. <http://link.springer.com/article/10.1007/s40093-014-0059-x>. DOI:10.1007/s40093-014-0059-x.
- 8 SAKAI E, BARBOSA E A A, CARVALHO S, et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different

- population arrangements and with and without drip irrigation [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2015, 148: 16 – 23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.020>.
- 7 PERDONÁ M J, SORATTO R P. Irrigation and intercropping with macadamia increase initial arabica coffee yield and profitability [J/OL]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(2): 615 – 626. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/107/2/615>. DOI: 10.2134/agronj14.0246.
- 8 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/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 143 – 150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160219&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.019.
- LIU Xiaogang, HAO Kun, HAN Zhihui, et al. Effect of water and nitrogen coupling on yield and quality of arabica coffee in dry-hot area [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 143 – 150. (in Chinese)
- 9 EHRENBARGEROVÁ L, CIENCIALA E, KUČERA A, et al. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru [J/OL]. *Agroforestry Systems*, 2016, 90(3): 433 – 445. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10457-015-9865-z>. DOI: 10.1007/s10457-015-9865-z.
- 10 董建华, 王秉忠. 咖啡光合速率生理生态的研究[J]. *热带作物学报*, 1995, 16(2): 58 – 64.
- DONG Jianhua, WANG Bingzhong. Physiology and ecology of photosynthetic rate in *coffea arabica* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 1995, 16(2): 58 – 64. (in Chinese)
- 11 FRANCK N, VAAST P. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels [J/OL]. *Trees*, 2009, 23(4): 761 – 769. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00468-009-0318-z>. DOI: 10.1007/s00468-009-0318-z.
- 12 ARAUJO W L, DIAS P C, MORAES G A B K, et al. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions [J/OL]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, 46(10): 884 – 890. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.005>.
- 13 李锦红, 张洪波, 周华, 等. 荫蔽或非荫蔽耕作制度对云南咖啡质量的影响[J]. *热带农业科学*, 2011, 31(10): 20 – 23.
- LI Jinhong, ZHANG Hongbo, ZHOU Hua, et al. Effects of shade/non-shade farming systems on cup quality of arabica coffee in Yunnan [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2011, 31(10): 20 – 23. (in Chinese)
- 14 BOSSELMANN A S, DONS K, OBERTHUR T, et al. The influence of shade trees on coffee quality in small holder coffee agroforestry systems in Southern Colombia [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 253 – 260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.09.004>.
- 15 王凯, 朱教君, 于立忠, 等. 遮阴对黄波罗幼苗的光合特性及光能利用效率的影响[J/OL]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 1003 – 1012. <http://www.plant-ecology.com/CN/10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.020>. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.020.
- WANG Kai, ZHU Jiaojun, YU Lizhong, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and light use efficiency of *Phellodendron amurense* seedlings [J/OL]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5): 1003 – 1012. (in Chinese)
- 16 王日明, 熊兴耀. 高温胁迫对黑麦草生长及生理代谢的影响[J/OL]. *草业学报*, 2016, 25(8): 81 – 90. <http://cyxb.lzu.edu.cn/CN/10.11686/cyxb2015563>. DOI: 10.11686/cyxb2015563.
- WANG Riming, XIONG Xingyao. Effect of temperature stress on growth and metabolism in perennial ryegrass [J/OL]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 81 – 90. (in Chinese)
- 17 张昆, 万勇善, 刘风珍. 苗期弱光对花生光合特性的影响[J/OL]. *中国农业科学*, 2010, 43(1): 65 – 71. <http://www.chinaagrisci.com/CN/10.3864/j.issn.0578-1752.2010.01.008>. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.01.008.
- ZHANG Kun, WAN Yongshan, LIU Fengzhen. Effects of weak light on photosynthetic characteristics of peanut seedlings [J/OL]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 65 – 71. (in Chinese)
- 18 REN B, CUI H, CAMBERATO J J, et al. Effects of shading on the photosynthetic characteristics and mesophyll cell ultrastructure of summer maize [J/OL]. *The Science of Nature*, 2016, 103(7-8): 1 – 22. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00114-016-1392-x>. DOI: 10.1007/s00114-016-1392-x.
- 19 王瑞, 刘国顺, 陈国华, 等. 光强对苗期烤烟光合作用及干物质生产的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2072 – 2077.
- WANG Rui, LIU Guoshun, CHEN Guohua, et al. Effects of light intensity on photosynthesis and dry matter production of flue-cured tobacco at its seedling stage [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2072 – 2077. (in Chinese)
- 20 彭晓邦, 蔡靖, 姜在民, 等. 光能竞争对农林复合生态系统生产力的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 545 – 552.
- PENG Xiaobang, CAI Jing, JIANG Zaimin, et al. Effects of light competition on crop productivity in an intercropping agroforestry ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 545 – 552. (in Chinese)
- 21 吴海卿, 段爱旺, 杨传福. 冬小麦对不同土壤水分的生理和形态响应[J/OL]. *华北农学报*, 2000, 15(1): 92 – 96. <http://www.hbxb.net/CN/Y2000/V15/I1/92>. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7091.2000.01.019.
- WU Haiqing, DUAN Aiwan, YANG Chuanfu. Physiological and morphological responses of winter wheat to soil moisture [J/OL]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2000, 15(1): 92 – 96. (in Chinese)
- 22 张玉, 韩清芳, 成雪峰, 等. 关中灌区沟垄集雨种植补灌对冬小麦光合特征、产量及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1382 – 1390.
- ZHANG Yu, HAN Qingfang, CHENG Xuefeng, et al. Effects of ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation on winter wheat photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency in Guanzhong irrigation district [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1382 – 1390. (in Chinese)

- yield [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 36–42. (in Chinese)
- 12 雪静, 王全九, 毕远杰. 微咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 14–19.
XUE Jing, WANG Quangjiu, BI Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 14–19. (in Chinese)
- 13 毕远杰, 王全九, 雪静. 微咸水造墒对油葵生长及土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 39–44.
BI Yuanjie, WANG Quanjiu, XUE Jing. Effect of saline water for increasing soil water before sowing on helianthus growth and saline distributional characteristics of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 39–44. (in Chinese)
- 14 乔玉辉, 宇振荣. 灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2050–2056.
QIAO Yuhui, YU Zhenrong. Simulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2050–2056. (in Chinese)
- 15 曹彩云, 郑春莲, 李科江, 等. 化度咸水灌溉对小麦产量和生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 347–355.
CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, LI Kejiang, et al. Impact of saline water irrigation with different salinities on yield and physiological indices of wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 347–355. (in Chinese)
- 16 杜世州, 乔玉强, 李玮, 等. 淮北地区小麦超高产群体生长特性分析[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 231–238.
DU Shizhou, QIAO Yuqiang, LI Wei, et al. Research on growth characteristics of super-high-yielding wheat populations in Huaibei area [J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(2): 231–238. (in Chinese)
- 17 YE Z P, YU Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. Photosynthetica, 2008, 46(4): 637–640.
- 18 YOSHINOBU K, TOMOHISA Y, TOSHIMASA H, et al. Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Seabasin—research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1): 1–14.
- 19 FLOWERS T J, RAGAB R, MALASH N, et al. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean; SALTMED [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1–2): 3–14.
- 20 MURTAZA G, CHAFOOR A, QADIR M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton wheat rotation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1): 98–114.
- 21 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71–76.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
- 22 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73–80.
MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 73–80. (in Chinese)
- 23 冯棣, 张俊鹏, 曹彩云, 等. 咸水畦灌条件下土壤水盐运移规律[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 48–52.
FENG Di, ZHANG Junpeng, CAO Caiyun, et al. Soil water and salt migration under border irrigation with saline water [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 48–52. (in Chinese)
- 24 STEPPUHN H, VAN M T, GRIEVE C M. Crop ecology, management and quality, root-zone salinity: I. selecting a product-yield index and response function for crop tolerance [J]. Crop Science, 2005, 45(1): 209–220.
- ~~~~~
- (上接第 197 页)
- 23 孙园园, 孙永健, 陈林, 等. 不同播期和抽穗期弱光胁迫对杂交稻生理性状及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2734–2744.
SUN Yuanyuan, SUN Yongjian, CHEN Lin, et al. Effects of different sowing dates and low-light stress at heading stage on the physiological characteristics and grain yield of hybrid rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2734–2744. (in Chinese)
- 24 彭强. 遮阴与土壤水分对结果期辣椒果实及叶片生理特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
PENG Qiang. Effects of shading and soil water content on physiology characters of fruit and leaf of pepper during fruiting stage [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 25 刘学娜, 刘彬彬, 崔青青, 等. 交替滴灌施氮对日光温室黄瓜生长, 光合特性, 产量及水氮利用效率的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(6): 905–916.
LIU Xuena, LIU Binbin, CUI Qingqing, et al. Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on growth, photosynthesis, yield, and water-nitrogen use efficiency of cucumbers in solar greenhouse [J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(6): 905–916. (in Chinese)
- 26 董志强, 张丽华, 李谦, 等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J/OL]. 作物学报, 2016, 42(5): 725–733.
http://zwxb.chinacrops.org/CN/Y2016/V42/I05/725. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.00725.
DONG Zhiqiang, ZHANG Lihua, LI Qian, et al. Grain yield and water use characteristics of winter wheat under micro-sprinkler irrigation [J/OL]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(5): 725–733. (in Chinese)