

集雨节灌种植技术对夏玉米光合特性及产量的影响

张艳¹, 贾志宽^{1,2}, 邴昊阳^{1,2}, 陈馨^{2,3}, 吴杨^{1,2}, 刘孟君¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以沟灌、水平畦灌为对照, 通过2年大田试验分析了在关中灌区集雨节灌种植技术对夏玉米功能叶片的光合参数、荧光参数、叶绿素含量及产量的影响。结果表明, 在同期灌溉处理中, 集雨节灌处理各测定时期的最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、最大光能转换效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)和叶绿素含量显著高于沟灌、畦灌。集雨节灌处理的籽粒产量在播前灌1水处理下较沟灌、畦灌和沟垄集雨种植分别提高4.9% ($P < 0.05$)、8.5% ($P < 0.05$)和2.2%, 在开花期灌1水处理下提高6.0% ($P < 0.05$)、8.3% ($P < 0.05$)、1.3%; 在播前和开花期均灌1水处理下提高7.0% ($P < 0.05$)、11.2% ($P < 0.05$)和7.2% ($P < 0.05$)。不同灌溉时期集雨节灌处理的净光合速率(P_n)和叶片瞬时水分利用效率(WUE)均在灌浆期显著高于畦灌, 对基础荧光(F_o)和蒸腾速率(Tr)的影响不明显。除开花期灌1水处理外, 其它灌水时期下的集雨节灌处理百粒重显著高于沟灌、畦灌处理。研究表明, 集雨节灌可以显著提高叶片光合性能, 增强PS II 反应中心的电子传递、光合化学效率和潜在活性, 且产量显著高于传统沟灌、水平畦灌处理。

关键词: 集雨节灌; 光合特性; 荧光参数; 夏玉米

中图分类号: S275.3; S513.071 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0146-09

Effect of rainfall harvest and water-saving irrigation technology to the photosynthetic characteristics and yield of summer maize

ZHANG Yan¹, JIA Zhi-kuan^{1,2}, BING Hao-yang^{1,2}, CHEN Xin^{2,3}, WU Yang^{1,2}, LIU Meng-jun¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling 712100, China;

3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Taking the furrow irrigation and leveling border irrigation as control, through 2-year field experiment study, has analyzed the effects of rainfall harvest and water-saving irrigation (RHWI) technology in Guanzhong Irrigation district to the photosynthetic parameters, fluorescence parameters, chlorophyll content of summer maize functional leaves and yield. The experiment results showed that: In the same irrigation treatments, the maximum fluorescence (F_m), variable fluorescence (F_v), maximal PS II efficiency (F_v/F_m), PS II potential activity (F_v/F_o) and the chlorophyll content of RHWI treatments were significantly higher than the furrow irrigation and border irrigation for all determined period. Compared with furrow irrigation, border irrigation and rainfall harvest by furrow dike, the yield of RHWI with irrigated 1 time at pre-sowing stage treatment was increased 4.9% ($P < 0.05$), 8.5% ($P < 0.05$) and 2.2%, respectively; for irrigated 1 time at the flower stage treatment, the yield was increased 6.0% ($P < 0.05$), 8.3% ($P < 0.05$) and 1.3%; and at the treatment of pre-sowing and flowering stage each irrigated 1 time, the yield increased. 7.0% ($P < 0.05$), 11.2% ($P < 0.05$) and 7.2% ($P < 0.05$) while, for the RHWI, the net photosynthetic rate (P_n) and the instantaneous water use efficiency (WUE) at filling stage total were significantly higher than border irrigation, but there was

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 本研究由“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD09B03, 2011BAD29B09); 国家 863 课题(2013AA102902, 2011AA100504); 公益性行业专项(201303104); 陕西科技创新项目(2011NXCO1-16)资助

作者简介: 张艳(1987—), 女, 辽宁绥中人, 硕士研究生, 主要从事作物高产栽培研究。E-mail: 18700417476@163.com。

通信作者: 刘孟君(1962—), 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事作物栽培与耕作方面研究。E-mail: translatorliu@126.com。

no significant effect on the minimal fluorescence (F_o) and transpiration rate (Tr). In addition to the treatment of 1 time irrigation at flowering stage, the hundred kernels wight of RHWI treatment under other irrigation treatments were significantly higher than furrow irrigation and border irrigation. The research also showed that: The RHWI could significantly improve the leaf photosynthetic performance, and enhance electron transfer, the photosynthetic chemical efficiency and potential activity of the PS II reaction center. In addition, the yield of RHWI treatment was significantly higher than the furrow irrigation and border irrigation. These results can be provided a new water-saving technical approach for high production of summer maize cultivation.

Keywords: rainfall harvest and water-saving irrigation; photosynthetic characteristics; fluorescence parameters; summer maize

针对我国农业水资源短缺问题,节水农业技术研究倍受重视^[1]。在旱作农业中围绕降水高效利用问题,集水种植技术已逐步成为旱地农业生产的主推技术之一^[2-3]。集雨节灌技术是农田集水和地面灌溉结合的复合技术,其核心目标是基于田间集雨种植方式,最大限度充分利用天然降雨,以减少灌溉用水量。该技术通过田间构筑沟垄,使降雨聚集于种植沟内,且垄上覆膜可降低土壤水分无效蒸发^[4-5];同时,在作物生长阶段在种植沟内进行补充灌溉,以满足作物对水分的需求;与畦灌、沟灌等地面灌溉方式比较,集雨节灌技术是在充分利用降水基础上的一种新型灌溉方式。对于旱作集雨种植、灌区地面灌溉等单项技术对作物光合特性及作物产量的影响,已进行了大量相关研究^[6-7],而旱作集雨种植技术应用于灌溉农田以显著降低灌溉用水的节水技术研究目前国内外还少见报道。

牛俊义等研究表明^[7-8],作物遭受水分胁迫后叶片气孔阻力增加,叶绿素含量减少^[9],净光合速率、蒸腾速率、瞬时水分利用效率等均下降,使作物的经济产量受到影响^[10],随着补灌量的增大,可显著提高玉米功能叶片的叶绿素含量、净光合速率及产量^[11-12]。叶绿素含量及叶绿素荧光动力学参数能够灵敏反映光合作用的变化情况,是揭示植物抗逆生理、作物增产潜力的重要指标^[12-14]。为了对集雨节灌种植技术进行分析评判,本试验设置集雨节灌、沟灌及水平畦灌 3 种不同的灌水方式,以沟灌及水平畦灌为对照,通过研究不同灌溉处理对夏玉米光合特性及产量形成的影响,为集雨节灌技术应用与推广提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验设在西北农林科技大学(108°04'E, 34°20'N)农作试验一站,该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上,海拔 454.8 m。近 20 年年均气温

13.5℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温 -19.4℃,年均日照时数为 2 196 h,无霜期 220 d,光照充足,属暖温带半湿润气候,年平均降水量 578.9 mm,春季降水偏少,雨量主要集中在 7、8、9 三个月,约占全年总降水量的 52.4%。平均蒸发量 993.2 mm,干旱指数为 1.3~1.59。

试验地平坦,土壤类型为垆土,前茬作物为苜蓿。夏玉米播种前耕层 0~40 cm 有机质含量为 13.27 g·kg⁻¹,碱解氮 38.43 mg·kg⁻¹,速效磷 6.95 mg·kg⁻¹,速效钾 127.90 mg·kg⁻¹,pH 值为 8.5,属中等肥力水平。试验期玉米生育期降水量情况见表 1。

表 1 试验地 2011—2012 年生育期降雨量/mm
Table 1 Rainfall during growth period in 2011—2012 at the experiment locations

年份 Years	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	总计 Total
2011	45.1	150.6	68.0	409.0	672.7
2012	30.2	116.8	166.0	104.7	417.7

1.2 试验方法

玉米试验地前茬为 7 年生苜蓿,2010 年秋季翻耕。试验年限为 2011—2012 年,玉米播期分别为 2011 年 6 月 5 日和 2012 年 6 月 9 日,收获期分别为 2011 年 9 月 28 日和 2012 年 10 月 6 日。供试品种为科大 16,各处理播种方式为穴播,行距 60 cm,株距 25 cm。肥料采用三元复合肥,纯氮 150 kg·hm⁻²,P₂O₅ 120 kg·hm⁻²,K₂O 90 kg·hm⁻²,底肥:追肥 = 1:1 施入,各处理施肥量均一致。

田间试验采用随机区组设计,设灌溉方式和灌溉时期 2 个因素,其中灌溉方式为沟灌、水平畦灌、集雨节灌,灌溉时期设播前灌 1 水、开花期灌 1 水、播前和开花期各灌 1 水,并设沟垄集雨种植(全生育期不灌水)处理,以传统灌溉方式沟灌、水平畦灌为对照,共 10 个试验处理,每个处理设 3 次重复。沟垄集雨种植(集雨不灌)及集雨节灌处理沟垄宽均为

60 cm, 垄高 15 cm; 沟灌处理开沟深度为 15 cm, 沟宽 40 cm; 畦灌处理畦宽 3 m, 畦长 20 m。沟灌、水平畦灌处理每次灌水量均为 75.0 mm, 集雨节灌处理每

次为 37.5 mm, 水表控制灌水量, 各小区长 20 m、宽 3 m。试验处理设置见表 2。

表 2 试验处理设计

Table 2 The design of the experimental treatments

灌溉时期 Irrigation period	灌溉方式 Irrigation methods	灌溉量/mm Irrigation amounts
播前灌 1 水 1 time irrigation at pre-sowing stage	集雨节灌 (M1) Rainfall harvesting planting combined with water-saving irrigation (M1)	37.5
	沟灌 (F1) Furrow irrigation (F1)	75.0
	水平畦灌 (B1) Border irrigation (B1)	75.0
开花期灌 1 水 1 time irrigation at flowering stage	集雨节灌 (M2) Rainfall harvest combined with water-saving irrigation (M2)	37.5
	沟灌 (F2) Furrow irrigation (F2)	75.0
	水平畦灌 (B2) Border irrigation (B2)	75.0
播前灌 1 水 + 开花期灌 1 水 1 time irrigation at pre-sowing stage + 1 time irrigation at flowering stage	集雨节灌 (M3) Rainfall harvest combined with water-saving irrigation (M3)	75.0
	沟灌 (F3) Furrow irrigation (F3)	150.0
	水平畦灌 (B3) Border irrigation (B3)	150.0
不灌水 No irrigation in whole growth period	沟垄集雨种植 (M) Rainfall harvest by furrow dike (M)	0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素含量 田间测定分别在玉米拔节期、开花期和灌浆期选择晴天进行, 各个处理随机选取具有代表性植株 3 株的棒三叶(拔节期选择最上部完全展开叶), 将新鲜的夏玉米叶片剪碎混匀, 称取 0.10 g, 放入装有 0.5 ml 纯丙酮 + 15 ml 80% 丙酮的刻度试管中(25 ml), 室温下置暗处浸提过夜, 期间摇动 3~4 次, 当叶片全部变白时用 80% 丙酮定容至 25 ml, 过滤后用分光光度计分别在波长 645、663 nm 和 470 nm 下测定光密度, 以 80% 的丙酮溶液为空白, 重复 3 次。公式如下:

$$C_T = 20.3D_{645} + 8.03D_{663}$$

叶绿素总含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) =

$$\frac{C_T(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{提取液总量}(\text{ml})}{\text{样品鲜重}(\text{g}) \times 1000} \times \text{稀释倍数}$$

1.3.2 功能叶片光合速率 田间测定分别在拔节期、开花期和灌浆期选择晴天进行, 拔节期选择最上部完全展开叶, 其余两个时期选择穗位叶。各处理均随机选取具代表性植株 3 株, 于上午 9:00~11:00 利用美国 LI-6400 便携式光合仪测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)。计算叶片水分利用效率, 公式如下:

$$WUE = P_n / T_r$$

WUE 为叶片瞬时水分利用效率($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$), P_n 为光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T_r 为蒸腾速率($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.3.3 叶绿素荧光参数 采用德国 Walz 公司制造

的 PAM-2100 便携式叶绿素荧光仪于玉米拔节期、开花期和灌浆期进行测定。拔节期选择最上部完全展开叶, 其余两个时期选择穗位叶进行测定, 每次选取 3 株具有代表性的植株。叶片暗适应 30 min 后, 测定叶片的基础荧光(F_0)和最大荧光(F_m)。计算可变荧光($F_v = F_m - F_0$)、PS II 的光化学效率(F_v/F_m)和 PS II 的潜在活性(F_v/F_m)。

1.3.4 产量测定 收获后每处理选取 20 株具有代表性的玉米植株进行室内考种, 自然风干后测定玉米的穗粒数和百粒重, 并计算单位面积产量; 集雨种植处理的籽粒产量以沟垄总面积计算。

1.3.5 数据处理 试验数据年限为 2011—2012 年, 数据处理运用 Excel 2003 进行, 用 DPS v7.05 处理软件进行样本方差分析及 Duncan's 新复极差检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对夏玉米叶片光合参数的影响

由表 3 所示, 在拔节期、开花期和灌浆期, 集雨节灌处理较沟灌、畦灌和沟垄集雨(M)处理的 2 年平均净光合速率均有所提高。其中在灌浆期, 播前灌 1 水处理下, 集雨节灌(M1)处理的净光合速率(P_n)较畦灌(B1)提高 21.2% ($P < 0.05$); 在开花期灌 1 水处理中, 集雨节灌(M2)处理灌浆期 P_n 较畦灌(B2)提高 20.9% ($P < 0.05$); 其中在 2011 年玉米灌浆期, M2 处理的 P_n 较沟灌(F2)处理提高 25.9% ($P < 0.05$)。在播前和开花期均灌 1 水处理下, 集

雨节灌(M3)处理在开花期和灌浆期的 P_n 较畦灌(B3)处理分别提高 8.6% ($P < 0.05$)和 16.4% ($P < 0.05$);其中在 2012 年的开花期和灌浆期, M3 处理的 P_n 显著高于沟灌(F3)处理,其它处理间差异不显著。

表 3 不同处理对夏玉米净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)和瞬时水分利用效率(WUE)的影响

Table 3 Effect of different treatments on net photosynthetic rate(P_n), transpiration rate(Tr), and instantaneous water use efficiency(WUE) of summer maize

年份 Year	处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthetic rate(P_n) / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			蒸腾速率 Transpiration rate(Tr) / $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			瞬时水分利用效率 Instantaneous water use efficiency (WUE)/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$		
		拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
		2011	M1	40.1a	41.5ab	21.9 a	7.34a	6.04a	6.45a	5.45a
F1	37.2a		38.3ab	19.4ab	7.16a	5.79a	6.31a	5.10a	6.63a	3.07ab
B1	36.9a		37.9ab	17.4b	7.13a	5.78a	6.28a	5.10a	6.57a	2.77bc
M2	38.1a		40.4ab	21.4a	7.26a	5.99a	6.41a	5.25a	6.80a	3.34a
F2	35.1a		36.7b	17.3b	6.70a	5.61a	6.27a	5.10a	6.56a	2.76bc
B2	34.7a		36.5b	17.0b	6.73a	5.59a	6.27a	5.17a	6.53a	2.71c
M3	40.3a		42.50a	22.1a	7.39a	6.06a	6.48a	5.40a	7.01a	3.40a
F3	37.5a		39.4ab	20.7a	7.24a	5.96a	6.34a	5.20a	6.67a	3.26a
B3	37.5a		38.7ab	19.5ab	7.23a	5.80a	6.33a	5.19a	6.67a	3.08ab
M	38.1a		40.1ab	20.9a	7.25a	5.98a	6.35a	5.24a	6.80a	3.29a
2012	M1	37.5ab	37.9ab	23.9ab	6.67ab	5.87a	5.71ab	5.63a	6.48a	4.20a
	F1	35.6b	36.7ab	23.3b	6.35bc	5.70a	5.66ab	5.62a	6.44a	4.11a
	B1	35.6b	35.8b	20.3c	6.30c	5.61a	5.61 b	5.57a	6.38a	3.61b
	M2	37.0ab	37.6ab	23.8ab	6.58ab	5.80a	5.70ab	5.62a	6.46a	4.18a
	F2	35.1b	36.0b	23.2b	6.35bc	5.65a	5.65b	5.62a	6.41a	4.11a
	B2	34.4b	35.6b	19.7c	6.16c	5.60a	5.61b	5.56a	6.36a	3.50b
	M3	39.0a	38.7a	24.6a	6.88a	5.93a	5.88a	5.67a	6.55a	4.23a
	F3	36.7ab	37.2b	23.5b	6.54ab	5.74a	5.68ab	5.60a	6.45a	4.13a
	B3	35.7b	36.0b	20.6c	6.33bc	5.63a	5.63b	5.62a	6.39a	3.65b
	M	36.6ab	36.8ab	23.4b	6.51bc	5.71a	5.68ab	5.62a	6.44a	4.12a
2 年平均 Average	M1	38.8ab	39.7ab	22.9a	7.01ab	6.00a	6.08a	5.54a	6.67a	3.80a
	F1	36.4abc	37.5abc	21.4abc	6.76bcd	5.75a	5.99a	5.36a	6.53a	3.59ab
	B1	36.3abc	36.9bc	18.9de	6.72bcd	5.70a	5.95a	5.34a	6.48a	3.19d
	M2	37.6abc	39.0abc	22.6ab	6.92abc	5.90a	6.06a	5.44a	6.63a	3.76a
	F2	35.1bc	36.4bc	20.3bcd	6.53cd	5.63a	5.96a	5.36a	6.48a	3.44bc
	B2	34.6c	36.1c	18.7e	6.45d	5.60a	5.94a	5.37a	6.45a	3.11d
	M3	39.7a	40.6a	23.4a	7.14a	6.00a	6.18a	5.54a	6.78a	3.82a
	F3	37.1abc	38.3abc	22.1b	6.89abc	5.85a	6.01a	5.40a	6.56a	3.70ab
	B3	36.6abc	37.4bc	20.1ede	6.78abc	5.72a	5.98a	5.41a	6.53a	3.37cd
	M	37.4abc	38.5abc	22.2ab	6.88abc	5.85a	6.02a	5.43a	6.62a	3.71ab

注:表中不同字母表示 0.05 水平下差异显著,下同。其他缩写如表 2。

Note: The different letters after values within a same column mean significant different among treatments at the 0.05 level, The same as below. Other abbreviations are the same as given in table 2.

所有集雨节灌处理在玉米拔节期、开花期和灌浆期两年平均的蒸腾速率(Tr)较沟灌、畦灌均有所提高。在播前灌 1 水处理下, M1 处理各测定时期的 Tr 虽较 F1、B1 和 M 高,但差异不显著,但 2012 年

M1 处理在拔节期的 Tr 较 B1 处理显著提高 5.87% ($P < 0.05$);在开花期灌 1 水处理中,在拔节期 M2 处理的 Tr 较 B2 处理提高 6.8% ($P < 0.05$);在播前和开花期均灌 1 水处理中, M3 处理各测定时期的

T_r 较 B3、F3 和 M 处理差异不显著,但 2012 年 M3 处理在灌浆期较 B3、M 处理分别提高 8.7% ($P < 0.05$)、5.7% ($P < 0.05$)。

各集雨节灌处理在拔节期和开花期较对应的沟灌、畦灌处理及集雨种植不灌溉处理的瞬时水分利用效率 (WUE) 有所提高 ($P > 0.05$), 只在灌浆期差异达到显著水平。播前灌 1 水处理下, M1 处理在灌浆期的 WUE 较 B1 两年平均提高 19.1% ($P < 0.05$), 与其他处理差异不显著。开花期灌 1 水处理下, M2 处理在灌浆期的 WUE 分别较 F2、B2 处理两年平均提高 9.3% ($P < 0.05$) 和 20.9% ($P < 0.05$), 但 2012 年 M2 处理的 WUE 在灌浆期与 F2 处理间无显著差异。在播前和开花期均灌 1 水处理下, M3 处理灌浆期两年平均的 WUE 较 B3 提高 13.4% ($P < 0.05$), 但 2011 年与 B3 处理间无显著差异。

2.2 不同处理对夏玉米叶片叶绿素含量的影响

由表 4 可见, 在播前灌 1 水处理下, M1 处理在拔节期、开花期和灌浆期的叶绿素含量显著高于 F1、B1 处理。两年平均 M1 处理较 F1 分别提高

18.1%、5.4% 和 10.1%, 较 B1 提高 24.7%、6.6% 和 13.2%; 较 M 处理分别提高 12.6% ($P < 0.05$)、3.9% ($P < 0.05$) 和 4.6%, 但 2012 年 M1 处理在 3 个测定时期较 M 处理无明显差异。

在开花期灌 1 水处理中, M2 处理的叶绿素含量显著高于 F2、B2 处理。M2 处理在拔节期、开花期和灌浆期较 F2 处理两年平均分别提高 23.0%、4.2% 和 8.6%, 较 B2 处理两年平均分别提高 26.6%、5.1% 和 13.2%, 较 M 处理无显著的差异。在 2011 年各测定时期 M2 处理叶绿素含量显著高于 M 处理, 较 M 处理平均提高 5.1%。

在播前和开花期均灌 1 水处理下, M3 处理的叶绿素含量显著高于 F3、B3 处理。M3 处理在拔节期、开花期和灌浆期较 F3 两年平均提高 18.4%、7.8% 和 9.5%, 较 B3 分别提高 28.6%、9.0% 和 12.0%, M3 处理的叶绿素含量较 M 处理两年平均分别提高 18.9% ($P < 0.05$)、7.0% ($P < 0.05$) 和 5.8%。在 2012 年 M3 处理各测定时期的叶绿素含量较 M 处理差异不显著。

表 4 不同处理对夏玉米叶绿素含量的影响/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 4 Effect of different treatments on chlorophyll content of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	2.31b	4.03b	3.12b	3.04a	4.32a	3.73a	2.68a	4.18b	3.43a
F1	1.97de	3.82de	3.03c	2.56cd	4.10cd	3.19cd	2.27cd	3.96def	3.11cd
B1	1.89e	3.80de	3.02c	2.40d	4.03 de	3.04de	2.15cd	3.92ef	3.03d
M2	2.18c	3.93b	3.09b	3.06a	4.25ab	3.60ab	2.62ab	4.09bc	3.35ab
F2	1.93de	3.81de	3.02c	2.33d	4.04de	3.14cd	2.13cd	3.93def	3.08cd
B2	1.87e	3.78e	3.03c	2.27d	3.99e	2.88e	2.07d	3.89f	2.96d
M3	2.46a	4.24a	3.27a	3.20a	4.36a	3.66a	2.83a	4.30a	3.47a
F3	1.99d	3.84c	3.07c	2.79bc	4.14bc	3.27c	2.39bc	3.99cde	3.17bc
B3	1.92de	3.80de	3.02c	2.47cd	4.09cd	3.17cd	2.20cd	3.95def	3.10cd
M	1.97de	3.83de	3.03c	2.78ab	4.21abc	3.52ab	2.38bc	4.02cd	3.28abc

2.3 不同处理对夏玉米叶片荧光参数的影响

2.3.1 基础荧光 由表 5 可以看出, 在播前灌 1 水处理下, M1 处理在拔节期到灌浆期的 F_o 值较 F1、B1 和 M 处理的 F_o 值有所降低, 但差异不显著。在拔节期、开花期、灌浆期, 开花期灌 1 水处理中, M2 处理两年平均的 F_o 值较 B2 处理分别降低 15.9% ($P < 0.05$)、10.1% ($P < 0.05$) 和 9.4% ($P < 0.05$), 与 F2、M 差异不显著。在 2012 年灌浆期, M2 处理的 F_o 值较 F2 处理显著降低 6.4%。在播前和开花期均灌 1 水处理下, M3 处理较 B3、F3 和 M 处理的 F_o

值有所下降, 差异不明显。在 2012 年的灌浆期, M3 处理的 F_o 值较 B3 处理降低了 8.3% ($P < 0.05$)。

2.3.2 最大荧光 由表 6 可以看出, 在拔节期和灌浆期, M1 处理两年平均的 F_m 值显著高于 F1、B1 处理。拔节期 M1 处理较 F1、B1 处理分别提高 17.0% 和 24.0%, 灌浆期分别提高 22.0% 和 27.1%。在开花期, M1 处理两年平均的 F_m 值较 F1、B1 无差异, 但在 2011 年 M1 处理的 F_m 值较 F1、B1 处理分别提高 19.2% ($P < 0.05$)、34.8% ($P < 0.05$)。开花期灌 1 水处理下, M2 处理在拔节期和灌浆期两年平均的

F_m 值显著高于 F2、B2 处理,拔节期较 F2、B2 处理分别提高 22.0%、27.0%,灌浆期较 F2、B2 处理分别提高 20.4%、25.5%;在开花期 M2 处理两年平均的 F_m 值较 B2 处理增加 27.1% ($P < 0.05$),与 F2 无差异。播前和开花期均灌 1 水处理下,M3 处理在拔节期两年平均的 F_m 值较 F3、B3 处理分别提高 16.4%

($P < 0.05$)和 28.0% ($P < 0.05$),在开花期较 B3 处理提高 25.5% ($P < 0.05$),在灌浆期较 F3、B3 和 M 处理分别提高了 21.2%、29.2% 和 6.9% ($P < 0.05$),但 2012 年 M3 处理灌浆期 F_m 值较 F3、M 处理差异不明显。

表 5 不同处理对夏玉米基础荧光 (F_o) 的影响Table 5 Effect of different treatments to basic fluorescence (F_o) of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	0.144a	0.129a	0.144b	0.151a	0.155a	0.142c	0.147c	0.142b	0.144b
F1	0.160a	0.141a	0.147ab	0.160a	0.174a	0.151bc	0.160abc	0.158ab	0.149ab
B1	0.165a	0.149a	0.154ab	0.171a	0.180a	0.160a	0.168abc	0.165ab	0.157ab
M2	0.154a	0.138a	0.144b	0.152a	0.164a	0.146bc	0.153bc	0.151b	0.145b
F2	0.190a	0.150a	0.152ab	0.165a	0.180a	0.156a	0.178ab	0.165ab	0.154ab
B2	0.190a	0.154a	0.158a	0.172a	0.181a	0.162a	0.182a	0.168a	0.160a
M3	0.152a	0.133a	0.143b	0.150a	0.150a	0.144c	0.151bc	0.142b	0.144b
F3	0.160a	0.141a	0.145ab	0.158a	0.166a	0.147bc	0.159abc	0.154ab	0.154ab
B3	0.163a	0.145a	0.151ab	0.169a	0.176a	0.157a	0.166abc	0.160ab	0.145b
M	0.154a	0.141a	0.146ab	0.157a	0.169a	0.146bc	0.150abc	0.155ab	0.146ab

表 6 不同处理对夏玉米最大荧光 (F_m) 的影响Table 6 Effect of different treatments to maximum fluorescence (F_m) of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	0.60ab	0.62ab	0.61ab	0.64ab	0.60abc	0.62a	0.62ab	0.61ab	0.61ab
F1	0.49c	0.52c	0.49cd	0.58abcd	0.57abc	0.52c	0.53cd	0.55abc	0.50cd
B1	0.46cd	0.46d	0.48cd	0.55cd	0.54bc	0.50c	0.50cd	0.50bc	0.48cd
M2	0.59ab	0.61b	0.59ab	0.63ab	0.62ab	0.61a	0.61ab	0.61ab	0.59ab
F2	0.43d	0.47d	0.47cd	0.57bcd	0.56bc	0.52c	0.50cd	0.52bc	0.49cd
B2	0.42d	0.44d	0.47d	0.54d	0.53c	0.49c	0.48d	0.48c	0.47d
M3	0.62a	0.65a	0.62a	0.66a	0.64a	0.63a	0.64a	0.64a	0.62a
F3	0.48c	0.54c	0.50c	0.62abc	0.59abc	0.54bc	0.55bc	0.56abc	0.51c
B3	0.46cd	0.47d	0.48cd	0.55cd	0.55bc	0.51c	0.50cd	0.51bc	0.48cd
M	0.55ab	0.60b	0.58b	0.59abcd	0.58abc	0.58ab	0.57abc	0.59abc	0.58b

2.3.3 可变荧光 由表 7 可以看出,在拔节期、开花期和灌浆期,播前灌 1 水处理下,M1 处理两年平均 F_v 值显著高于 F1、B1 处理。在拔节期 M1 处理较 F1、B1 分别提高 27.0% 和 38.2%,开花期较 F1、B1 分别提高 20.5%、38.2%,灌浆期分别提高 30.6% 和 42.4%,与 M 处理间差异不显著。在拔节期、扬花期和灌浆期,开花期灌 1 水处理中,M2 处理的 F_v 值显著高于 F2、B2 处理。在拔节期 M1 处理

较 F1、B1 分别提高 43.8% 和 53.3%,开花期较 F1、B1 分别提 31.4%、43.7%,灌浆期分别提高 32.4% 和 40.6%,与 M 处理间差异不显著。播前和开花期各灌 1 水处理下,M3 处理的两年平均 F_v 值显著的高于 F3、B3 处理,在拔节期 M3 处理较 F3、B3 处理分别提高 25.6% 和 44.1%,在开花期较 F3、B3 处理的 F_v 值分别提高 22.0%、42.9%,在灌浆期较 F3、B3 和 M 处理分别提高 26.3%、41.2% 和 9.1% ($P < 0.05$)。

表 7 不同处理对夏玉米可变荧光 (F_v) 的影响Table 7 Effect of different treatments to variable fluorescence (F_v) of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	0.46a	0.48a	0.47ab	0.49ab	0.45ab	0.47a	0.47ab	0.47ab	0.47ab
F1	0.33bc	0.38b	0.34c	0.42bcd	0.40bc	0.37cd	0.37cd	0.39cd	0.36cd
B1	0.29ede	0.31c	0.33c	0.38d	0.36bc	0.34cd	0.34de	0.34de	0.33d
M2	0.44a	0.47a	0.45ab	0.48ab	0.45ab	0.46a	0.46ab	0.46ab	0.45ab
F2	0.24de	0.32c	0.32c	0.40bcd	0.38bc	0.36cd	0.32e	0.35cde	0.34cd
B2	0.23e	0.32c	0.31c	0.37d	0.35c	0.33d	0.30e	0.32e	0.32d
M3	0.47a	0.51a	0.48a	0.51a	0.49a	0.48a	0.49a	0.50a	0.48a
F3	0.32bcd	0.40b	0.36c	0.47abc	0.43abc	0.39bc	0.39c	0.41bc	0.38c
B3	0.29ede	0.32c	0.33c	0.38cd	0.38bc	0.35cd	0.34de	0.35ede	0.34cd
M	0.40ab	0.46a	0.44b	0.43abcd	0.42abc	0.44ab	0.42abc	0.44abc	0.44b

2.3.4 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 和最大光能转换效率 (F_v/F_m) 由表 8 可以看出,在拔节期、开花期和灌浆期,播前灌 1 水处理下, M1 处理的两年平均 F_v/F_o 值显著高于 F1、B1 处理。在各测定时期 M1 处理较 F1 分别提高 43.5%、36.0% 和 37.1%, 较 B1 分别提高 62.8%、65.9% 和 55.9%, 较 M 处理无显著差异。但 2011 年和 2012 年拔节期的 M1 处理的 F_v/F_o 值较 F1 处理无明显差异。在拔节期、开花期和灌浆期,开花期灌 1 水处理中, M2 处理的两年平均 F_v/F_o 值显著高于 F2、B2 处理。在各测定时期 M2 处理较 F2 分别提高 57.4%、40.1% 和 41.0%,

较 B2 分别提高 80.3%、65.4% 和 57.3%, 较 M 处理无显著差异。但在 2012 年的开花期, M2 处理与 F2、B2 的 F_v/F_o 值的差异不明显。在播前和开花期各灌 1 水处理下, M3 处理的两年平均 F_v/F_o 值在各测定时期均显著高于 F3、B3 处理。在拔节期 M3 处理较 F3、B3 分别提高 31.4% 和 55.5%, 开花期较 F3、B3 和 M 分别提高 34.7%、68.5% 和 24.2% ($P < 0.05$), 灌浆期较 F3、B3 分别提高 30.2% 和 52.7%, 但在 2011 年的拔节期和 2012 年的拔节期、开花期, M3 处理与 F3 的 F_v/F_o 值无明显差异。

表 8 不同处理对夏玉米 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 的影响Table 8 Effect of different treatments to PS II potential activity (F_v/F_o) of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	3.43a	3.83a	3.09ab	3.83a	2.97a	3.33a	3.63a	3.40ab	3.29a
F1	2.09abcd	2.71bc	2.31cd	2.97abcd	2.29b	2.48cd	2.53bcd	2.50cde	2.40bc
B1	1.92cd	2.08c	2.13de	2.54cd	2.02b	2.09de	2.23cd	2.05e	2.11cd
M2	2.88ab	3.44ab	3.25ab	3.54ab	2.78ab	3.16a	3.21ab	3.11abc	3.13a
F2	1.27d	2.30c	2.12de	2.81bcd	2.13b	2.32cde	2.04cd	2.22de	2.22bcd
B2	1.20d	1.83c	1.95e	2.36d	1.93b	2.03e	1.78d	1.88e	1.99d
M3	3.30ab	3.89a	3.37a	3.82a	3.49a	3.35a	3.56a	3.69a	3.36a
F3	2.10abcd	2.84bc	2.48c	3.31abc	2.64ab	2.7bc	2.71bcd	2.74cd	2.58b
B3	1.93cd	2.25c	2.17cde	2.65bcd	2.14b	2.24de	2.29bcd	2.19de	2.20bcd
M	2.62abc	3.48ab	2.98b	3.29abcd	2.47ab	3.01ab	3.00abc	2.97bc	2.99a

由表 9 可以看出,在播前灌 1 水处理下, M1 处理的两年平均 F_v/F_m 值在拔节期、开花期和灌浆期较 B1 处理分别提高 13.4% ($P < 0.05$)、14.9% ($P < 0.05$) 和 13.2% ($P < 0.05$), 在开花期和灌浆期, M1 处理的两年平均 F_v/F_m 值较 F1 分别提高 8.5%

($P < 0.05$) 和 10.0% ($P < 0.05$)。在拔节期、开花期和灌浆期,开花期灌 1 水处理中, M2 处理的两年平均 F_v/F_m 值显著高于 F2、B2 处理。在拔节期 M2 处理较 F2、B2 分别提高 17.2% 和 23.0%, 开花期较 F2、B2 分别提高 10.3% 和 15.4%, 灌浆期分别提高

10.1% 和 15.2%,但在 2012 年的拔节期和开花期, M2 处理的 Fv/Fm 值与 F2 的差异未达到显著水平。在拔节期、开花期和灌浆期,播前和开花期各灌 1 水处理下, M3 处理的两年平均 Fv/Fm 值较 B3 处理分

别高 14.9% ($P < 0.05$)、14.7% ($P < 0.05$) 和 11.6% ($P < 0.05$),较 F3、M 处理差异不显著,但在 2011 年的灌浆期, M3 处理的 Fv/Fm 值较 F3 显著提高 37.0%。

表 9 不同处理对夏玉米最大光能转换效率 (Fv/Fm) 的影响

Table 9 Effect of different treatments to maximal PS II efficiency (Fv/Fm) of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	灌浆期 Filling
M1	0.76a	0.79a	0.76ab	0.76ab	0.74ab	0.77a	0.76a	0.77a	0.77a
F1	0.67ab	0.73abc	0.71cd	0.72abcd	0.70abc	0.71bcd	0.70abc	0.71bcd	0.70bc
B1	0.64abc	0.67cd	0.68d	0.69cd	0.66bc	0.67d	0.67bcd	0.67cd	0.68c
M2	0.74a	0.77ab	0.76abc	0.76abc	0.73abc	0.76ab	0.75a	0.75ab	0.76ab
F2	0.56bc	0.68cd	0.68d	0.71abcd	0.68bc	0.70cd	0.64cd	0.68cd	0.69c
B2	0.54c	0.65d	0.66d	0.68d	0.66c	0.67d	0.61d	0.65d	0.66c
M3	0.76a	0.79a	0.78a	0.77a	0.76a	0.77a	0.77a	0.78a	0.77a
F3	0.67ab	0.74abc	0.71bcd	0.75abc	0.71abc	0.73abc	0.71ab	0.73abc	0.72abc
B3	0.64abc	0.69bcd	0.71d	0.69bcd	0.68bc	0.69d	0.67bcd	0.68bcd	0.69c
M	0.72a	0.77abc	0.75abc	0.73abcd	0.71abc	0.75abc	0.73ab	0.74abc	0.75ab

2.4 不同处理对夏玉米产量及产量构成因素的影响

分析两年的平均值可以看出集雨节灌处理的百粒重显著高于畦灌处理,较沟灌处理也略有提高。由表 10 可以看出,在播前灌 1 水处理下, M1 处理的百粒重较 F1、B1 处理的百粒重增加 1.53 g、2.13 g,其中 2012 年, M1 处理的百粒重较 M 处理减少 0.05 g。在开花期灌 1 水处理下, M2 处理的百粒重较 F2、B2 差异不显著,较 M 处理降低 1.07 g ($P < 0.05$)。在播前和开花期均灌 1 水处理下, M3 处理的百粒重较 F3、B3 和 M 分别增加 1.79 g ($P < 0.05$)、1.87 g ($P < 0.05$) 和 0.58 g,但 2012 年, M3 处理的百粒重较 F3 处理差异不显著。除开花期灌 1

水处理下, M2 处理的穗粒数较 B2 处理每穗增加 35.1 粒 ($P < 0.05$) 外,较其他处理无明显的差异。

集雨节灌处理的两年平均籽粒产量较沟灌、畦灌和沟垄集雨种植(不灌水)处理均有不同程度提高。在播前灌 1 水处理下, M1 处理的籽粒产量较 F1、B1 和 M 分别提高 4.9%、8.5% ($P < 0.05$) 和 2.2%。在开花期灌 1 水处理下, M2 处理的籽粒产量较 F2、B2 和 M 分别提高 6.0% ($P < 0.05$)、8.3% ($P < 0.05$) 和 1.3%,但在 2012 年 M2 处理较 F2 的籽粒产量差异未达到显著水平。在播前和开花期均灌 1 水处理下, M3 处理的籽粒产量较 F3、B3 和 M 处理分别提高 7.0% ($P < 0.05$)、11.2% ($P < 0.05$) 和 7.2% ($P < 0.05$)。

表 10 不同处理对夏玉米产量构成因素和产量的影响

Table 10 Effect of different treatments to yield and yield component factors of summer maize

处理 Treatments	2011			2012			2 年平均 Average		
	穗粒数 Kernels per ear	百粒重/g Hundred-kernels wight	经济产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per ear	百粒重/g Hundred-kernels wight	经济产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per ear	百粒重/g Hundred-kernels wight	经济产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
M1	541.1ab	28.87a	10417.97b	550.0a	36.09abc	13237.85ab	545.6ab	32.45a	11827.91b
F1	551.3ab	27.02bc	9936.39bcd	543.8a	34.83d	12619.95bcd	547.5ab	30.92bc	11278.17bcde
B1	545.8ab	26.20c	9539.15cd	533.8a	34.45d	12264.31cd	539.8ab	30.32c	10901.73e
M2	573.2a	27.06b	10344.92bc	550.3a	35.67bc	13090.51abc	561.7a	31.36b	11717.72bc
F2	542.6ab	26.47bc	9579.07cd	535.4a	35.11cd	12538.90bcd	539.0ab	30.79bc	11058.99de
B2	531.4b	26.71bc	9470.37d	521.7a	34.95cd	12159.34d	526.6b	30.83bc	10814.86e
M3	573.6ab	29.06a	11116.73a	555.0a	36.97a	13683.07a	564.3a	33.01a	12399.90a
F3	586.3ab	26.00bc	10170.34bcd	535.2a	36.43ab	13005.36bc	560.7a	31.22b	11587.85bcd
B3	545.1ab	26.98bc	9809.42bcd	530.4a	35.30bcd	12487.51bcd	537.8ab	31.14 bc	11148.47cde
M	531.6b	28.73a	10179.64bcd	537.7a	36.14abc	12959.23bcd	534.7ab	32.43a	11569.43bcd

3 讨 论

叶绿素是重要的光合色素,它具有截获光能的作用,叶片叶绿素含量的消长规律是反映叶片生理活性变化的重要指标之一,与叶片光合能力有密切关系^[15]。作物生产潜力能否得以发挥,与群体光合作用强度有很重要的关系^[16]。当受到逆境胁迫时,叶片叶绿体受损,叶绿素含量下降,导致光合能力降低^[17-18]。在诸多外界环境因子中,土壤水分是影响植物光合作用的重要因素^[19-20]。叶绿素荧光作为研究光合作用的探针,对外界环境变化的反应十分敏感^[21],因此,利用叶绿素荧光技术能够有效探测到植物生长发育状态及营养状况,比净光合速率更能真实地反映光合作用^[22-24]。王艳等研究表明^[12,25],充分灌溉可以大幅度地提高叶绿素的含量,随着灌溉量的减少会使叶绿素含量、净光合速率和蒸腾速率均降低。李兴等研究认为^[23],覆膜坐水结合拔节期补灌可以显著提高玉米叶片的净光合速率、蒸腾速率及瞬时水分利用效率。任小龙等研究表明^[26],沟垄集雨种植不仅可以增强夏玉米叶片的光合能力,还能显著地提高夏玉米叶片 PS II 光量子转化成化学能的效率,增强夏玉米叶片耗散过剩激发能的能力,使夏玉米叶片具有较高的光合电子传递能力,减小光抑制的可能性。经过连续 2 年的定位试验,与传统沟灌、水平畦灌相比,集雨节灌处理在灌水量减小一半的情况下,其功能叶片的叶绿素含量、光合能力和叶绿素荧光参数仍能维持较高的水平,进而获得较高的产量。相关研究也表明^[7,23,27],集雨补灌可以显著提高玉米植株干物质积累量,增加对玉米籽粒源的供应,提高玉米的穗粒数、百粒重,这与本试验结果相似。

集雨节灌处理之所以其功能叶片的叶绿素含量、光合能力、叶绿素荧光参数及籽粒产量较沟灌、水平畦灌高,这与集雨节灌种植方式改善了土壤水分条件有直接关系。一方面集雨节灌处理因垄上覆膜,农田总蒸发面积仅为沟灌、水平畦灌处理的一半,显著抑制了垄下土壤水分蒸发;另一方面,垄上降雨迭加至沟中,使种植沟中单位面积的含水量大幅度增加^[28],以 2011 年为例,集雨种植处理下种植沟内玉米生育期接纳的雨水可达 1 345.4 mm,沟灌、畦灌仅为 672.7 mm,虽然较集雨节灌处理每次多灌水 37.5 mm,但远低于集雨种植处理玉米生育期所补充的水量。因此,良好的土壤水分条件,是玉米获得较高产量的重要因素。

4 结 论

在灌水量为传统沟灌、水平畦灌一半的条件下,集雨节灌处理的叶绿素含量、最大荧光 (F_m)、可变荧光 (F_v)、最大光能转换效率 (F_v/F_m) 和 PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 显著高于沟灌、畦灌和沟垄集雨种植,在灌浆期净光合速率及瞬时水分利用效率显著高于畦灌,在拔节期蒸腾速率明显高于畦灌处理;且集雨节灌处理的籽粒产量显著高于传统沟灌、水平畦灌。由此认为,集雨节灌是一种有效的节水栽培技术途径,可作为半干旱半湿润区玉米节灌栽培的重要技术方向予以进一步深入研究。由于仅针对夏播玉米进行了 2 年的定位试验,因此试验结果具有一定的局限性。为进一步证实集雨节灌种植技的节水增产效果,应丰富供试作物并增加试验年限。

参 考 文 献:

- [1] 任小龙,贾志宽,丁瑞霞,等.我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展与展望[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):83-88.
- [2] 王俊鹏,韩清芳,王龙昌,等.宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J].西北农业大学学报,2000,28(4):16-20.
- [3] 韩清芳,李向拓,王俊鹏,等.微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究[J].农业工程学报,2004,20(2):78-82.
- [4] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge/ furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rain fall harvesting system with mulches[J]. Agric water Manage, 2002,54:243-254.
- [5] Zhang J Y, Sun J S, Duan A W, et al. Effects of different planting patterns on water use and yield performance of winter wheat in the Huang Huai Hai Plain of China[J]. Agric water Manage, 2007,92:41-47.
- [6] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等.半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J].农业工程学报,2007,23(10):45-50.
- [7] 牛俊义,秦舒浩,蔺海明,等.集雨补灌对粮草饲兼用玉米的产量及生理效应研究[J].草业学报,2002,11(1):38-42.
- [8] 张钱兵,杨玲,孙兵,等.干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J].农业工程学报,2012,28(14):77-83.
- [9] Hirasawa T, Hsiao T. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field[J]. Field Crops Research, 1999,62:53-62.
- [10] Gall A, Flexas J. Gas-exchange and chlorophyll fluorescence measurements in grapevine leaves in the field[C]//Delrot S. Methodologies and Results in Grapevine Research. Business Media: Springer Science, 2010:107-121.
- [11] 蔺海明,牛俊义,秦舒浩.陇中半干旱区小麦和玉米补灌效应研究[J].干旱地区农业研究,2001,19(4):80-86.
- [12] 王策,王志强,张志伟,等.补灌量对夏玉米光合和叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2010,30(6):99-106.
- [13] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1991,42:313-349.

- 研究[J]. 植物学报, 1993, 35(1): 51-56.
- [9] 李其星, 唐新莲, 沈方科, 等. 铝胁迫下外源 Ca^{2+} 对黑麦幼根膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 广西农业科学, 2006, 37(3): 249-252.
- [10] 张雪峰. 低温胁迫对玉米种子萌发过程中内源激素含量变化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2): 147-151.
- [11] 朱祥春, 矫洪涛, 苍晶. 玉米幼苗低温诱导蛋白的鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(6): 674-679.
- [12] 王瑞, 马凤鸣, 李彩凤. 低温胁迫对玉米幼苗脯氨酸、丙二醛含量及电导率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(5): 20-23.
- [13] 吴建慧, 杨玲, 孙国荣. 低温胁迫下玉米幼苗叶片活性氧的产生及保护酶活性的变化[J]. 植物研究, 2004, 24(4): 456-459.
- [14] 冯锐, 武晋雯, 纪瑞鹏. 低温胁迫下春玉米生长参数及产量影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 183-187.
- [15] Chander M S. Enzymic associations with resistance to rust and powdery mildew in pea[J]. Indian Journal of Horticulture, 1990, 47(3): 341-345.
- [16] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [17] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 赫春长. 外源钙对低温下麻疯树生理生化调节效应的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [21] 杜润峰, 郝文芳, 王龙飞. 达乌里胡枝子抗氧化保护系统及膜脂过氧化对干旱胁迫及复水的动态响应[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 51-61.
- [22] 张化生, 郭晓冬, 王萍. 低温胁迫下硝酸钙处理对辣椒幼苗抗寒性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 4(2): 66-69.
- [23] 王风华, 王贵学, 赖钟雄, 等. CaCl_2 处理对茄子幼苗膜脂过氧化的影响[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(4): 545-547.
- [24] 王芳, 常盼盼, 陈永平, 等. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 178-186.
- [25] 鲁艳, 李新荣, 何明珠, 等. Ni 和 Cu 胁迫对骆驼蓬抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 147-155.
- [26] Kellogg E W, Fridovich I. Hydrogen peroxide, and single oxygen in lipid peroxidation by xanthine oxidase system[J]. Biochem, 1975, 250: 8812-8817.
- [27] 李晓明, 陈劲枫, 逯明辉, 等. 低温下钙对黄瓜幼苗抗氧化酶活性及 POD 同工酶谱的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(2): 241-246.
- [28] 张化生, 郭晓冬, 王萍. 低温胁迫下硝酸钙处理对辣椒幼苗抗寒性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 4(2): 66-69.
- [29] Monroy A F, Sarhan F, Dhindsa R S. Cold-induced changes in freezing tolerance, protein phosphorylation, and gene expression: Evidence of a role of calcium[J]. Plant Physiol, 1993, 102: 1227-1235.
- [30] 苏梦云. 杉木幼苗在渗透胁迫下脯氨酸积累及 Ca 的调节作用研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 335-338.
- [31] 毛俊娟, 王胜华, 陈放. 不同温度和铝浓度对麻疯树生理指标的影响及外源钙的作用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 26(6): 201-205.
- [32] Minorovsky P V. An heuristic hypothesis of chilling in Plants: a role for calcium as the Primary Physiology transducers of injury [J]. Plant, Cell & Environment, 1995, (8): 75-82.
- [33] De B, Bhattacharjee S, Mukherjee A K. Short term heat shock and cold shock induced proline accumulation relation to calcium involvement in *Lycopersicon esculentum* cultured cells and seedlings[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 1996, 14(1): 32-35.
- [34] Gong M, Li Z G. Calmodulin-binding protein from *Zea mays* germs [J]. Phytochemistry, 1995, 40(5): 1335-1339.

(上接第 154 页)

- [14] 吴长艾, 孟庆伟, 邹琦. 小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 339-344.
- [15] 童淑媛, 宋凤斌, 徐洪文. 玉米不同叶位叶片 SPAD 值的变化及其与生物量的相关性[J]. 核农学报, 2008, 22(6): 969-974, 869.
- [16] 王庆成, 牛玉贞, 徐庆章, 等. 株型对玉米群体光合速率和产量的影响[J]. 作物学报, 1996, 22(2): 223-227.
- [17] 王伟, 蔡焕杰, 王健, 等. 水分亏缺对冬小麦株高、叶绿素相对含量及产量的影响[J]. 排水灌溉, 2009, 28(1): 41-44.
- [18] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [19] 江晓东, 王芸, 侯连涛, 等. 少免耕模式对冬小麦生育后期光合特性的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 2(5): 66-69.
- [20] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. 杂粮作物, 2003, 23(1): 33-35.
- [21] 冯建灿, 胡秀丽, 毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J]. 经济林研究, 2002, 20(4): 14-18, 30.
- [22] 韦莉莉, 张小全, 侯振宏, 等. 杉木苗木光合作用及其产物分配对水分胁迫的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 394-402.
- [23] 李兴, 程满金, 史海滨, 等. 黄土高原半干旱区集雨补灌玉米增产机理的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 7-12.
- [24] 刘明, 齐华, 张振平, 等. 不同环境因子对玉米叶绿素荧光特性的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(6): 198-204.
- [25] 王艳, 张佳宝, 张丛志, 等. 不同灌溉处理对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 41-44.
- [26] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 半干旱区沟垄集雨对玉米光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 838-845.
- [27] 任稳江, 李耀辉. 半干旱区全膜玉米集雨补灌水分龙永效率研究[J]. 现代农业科技, 2010, (18): 43-45.
- [28] 张德奇, 廖允成, 贾志宽, 等. 宁南旱区谷子地膜覆盖的土壤水温效应[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2069-2075.