

集雨节灌种植技术对春玉米光合特性及产量的影响

陈馨^{1,3}, 邢昊阳^{2,3}, 张艳^{2,3}, 吴杨^{2,3},
贾志宽^{2,3}, 任小龙³, 张鹏^{2,3}

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 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)

摘要: 以春玉米为供试材料, 以传统灌溉方式沟灌、水平畦灌为对照, 研究了集雨节灌种植技术对春玉米功能叶片的相对叶绿素含量 (SPAD 值)、光合参数以及籽粒产量的影响。结果表明, 在同期灌溉处理中, 集雨节灌处理各测定时期的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr) 以及气孔导度 (G_s) 较沟灌处理分别提高 10.57% ~ 16.15%、4.10% ~ 9.24%、15.38% ~ 33.33%; 较水平畦灌分别提高 11.31% ~ 26.19%、5.73% ~ 13.56%、22.73% ~ 47.37%; 较沟垄集雨种植分别提高 -0.12% ~ 26.19%、0.16% ~ 9.95%、-4.35% ~ 25%。集雨节灌处理的相对叶绿素含量 (SPAD 值) 和瞬时水分利用效率 (WUE) 与沟灌、水平畦灌、沟垄集雨种植相比差异不明显。在播前灌 1 水条件下集雨节灌处理的产量和水分利用效率 (WUE_y) 较沟灌、畦灌和沟垄集雨种植分别提高 15.45% ($P < 0.05$)、21.85% ($P < 0.05$)、3.28% 和 39.82% ($P < 0.05$)、53.13% ($P < 0.05$)、4.44%, 在开花期灌 1 水条件下分别提高 7.06%、18.42% ($P < 0.05$)、2.32% 和 28.41% ($P < 0.05$)、39.58% ($P < 0.05$)、5.09%, 在播前和开花期均灌 1 水条件下分别提高 5.03%、14.57% ($P < 0.05$)、5.72% 和 40.23% ($P < 0.05$)、54.70% ($P < 0.05$)、2.99%。试验表明, 集雨节灌种植技术在大幅度降低灌水量的情况下可以提高叶片的光合性能, 并显著提高玉米籽粒产量。

关键词: 春玉米; 集雨节灌; 光合特性; 相对叶绿素含量; 产量

中图分类号: S513.31; S275 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0078-07

Effects of rainfall harvesting planting combined with water-saving irrigation on photosynthetic characteristics and yield of spring corn

CHEN Xin^{1,3}, BING Hao-yang^{2,3}, ZHANG Yan^{2,3}, WU Yang^{2,3},
JIA Zhi-kuan^{2,3}, REN Xiao-long³, ZHANG Peng^{2,3}

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

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

3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Key Laboratory of Crop

Physi-ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Taking spring corn (*Zea mays* L.) as the tested material, and the traditional irrigation methods (furrow and border irrigation) as the control, a field test was conducted to determine the effects of rainfall harvesting planting combined with water-saving irrigation (RHWI) on chlorophyll relative content (SPAD), photosynthetic parameters in functional leaves and grain yield of spring corn. The results showed that, among the treatments with same irrigation time, the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr) and stomatal conductance (G_s) of RHWI were increased by 10.57% ~ 16.15%, 4.10% ~ 9.24% and 15.38% ~ 33.33%, respectively, compared with those of furrow irrigation; they were increased by 11.31% ~ 26.19%, 5.73% ~ 13.56% and 22.73% ~ 47.37%, respectively, compared

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: “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 (2011NXC01-16); 国家自然科学基金青年项目 (31201156); 西北农林科技大学基本科研业务费 (QN2013005)

作者简介: 陈馨 (1987—), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 研究方向为旱地节水农业。E-mail: 15829722437@163.com。

通信作者: 贾志宽 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为旱区农业水分高效利用。E-mail: jiazhk@126.com。

with those of border irrigation; and they were increased by $-0.12\% \sim 26.19\%$, $0.16\% \sim 9.95\%$ and $-4.35\% \sim 25.00\%$, respectively, compared with those of rainfall harvesting planting (PRH). There was no significant difference for the chlorophyll relative content (SPAD) and instantaneous water use efficiency (WUE) between RHWI and furrow irrigation, border irrigation as well as PRH. Compared with furrow irrigation, border irrigation and PRH, the yield of RHWI was increased by 15.45% ($P < 0.05$), 21.85% ($P < 0.05$) and 3.28% , respectively, and the water use efficiency (WUE_Y) of RHWI was increased by 39.82% ($P < 0.05$), 53.13% ($P < 0.05$) and 4.44% , respectively, under the condition of irrigating 1 time at pre-sowing stage; the yield was increased by 7.06% , 18.42% ($P < 0.05$) and 2.32% , respectively, and the water use efficiency (WUE_Y) was increased by 28.41% ($P < 0.05$), 39.58% ($P < 0.05$) and 5.09% , respectively, under the condition of irrigating 1 time at flowering stage; the yield was increased by 5.03% , 14.57% ($P < 0.05$) and 5.72% , respectively, and the water use efficiency (WUE_Y) was increased by 40.23% ($P < 0.05$), 54.70% ($P < 0.05$) and 2.99% , respectively, under the condition of irrigating 1 time at pre-sowing stage and 1 time at flowering stage. It was concluded that RHWI could improve the leaf photosynthetic performance, and significantly promote the grain yield of corn under the condition of less irrigation volume.

Keywords: spring corn; rainfall harvesting planting combined with water-saving irrigation; photosynthetic characteristics; chlorophyll relative content; yield

我国农业用水紧张,短缺和浪费现象并存,因此发展以节水和提高水分利用效率为主的节水型农业,将是解决农业缺水问题的关键^[1-3]。基于高效利用自然降水降低灌水量且不影响作物产量的基本目标,我们提出旱作技术应用于灌溉农田的集雨节灌种植技术新模式,该模式属旱作农田沟垄集雨种植和地面灌溉相结合的复合技术。具体而言,该技术是通过在田间修筑沟垄、垄面覆膜使降水由垄面向沟中汇集,沟内种植区的雨水得以富集叠加^[4-5],加之垄面覆膜显著降低了土壤水分蒸发^[6-7],从而改善作物生长的水分环境;同时在作物需水关键期仅在种植沟内进行灌溉,以满足作物的水分需求。由于这一技术是在充分利用降雨的基础上只在种植沟内灌溉,和传统灌溉方式相比将显著降低灌水量。

近几年来,国内外研究者对于旱作沟垄集雨种植和地面灌溉等单项技术对作物的光合特性及产量的影响都有相应的研究^[8-11],且已广泛应用并取得了显著的成效,将旱作沟垄集雨种植与灌溉技术相结合的研究却鲜有报道。为此,本试验设置集雨节灌、沟灌、水平畦灌3种不同的灌水方式,以沟灌和水平畦灌为对照,以春玉米为供试作物,通过两年大田试验,对比研究不同灌溉方式对玉米光合特性以及产量的影响,以期为农田集雨节灌技术的完善和推广应用提供理论依据,研究建立的集雨节灌模式将对推动半干旱半湿润灌区发展节水农业有非常重要的意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地设在西北农林科技大学($108^{\circ}04' E$, 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 10 年年平均降水量 $580.5 mm$,春季降水偏少,雨量主要集中在 7、8、9 三个月,平均蒸发量 $993.2 mm$,干旱指数为 $1.3 \sim 1.59$;近 20 年年均气温 $13.5^{\circ} C$,极端最高气温 $42^{\circ} C$,极端最低气温 $-19.4^{\circ} C$,年均日照时数为 $2196 h$,无霜期 $220 d$,光照充足,属暖温带半湿润偏旱型气候。试验期玉米生育期降雨量见表 1。

表 1 试验区 2011—2012 年玉米生育期降雨量/mm

Table 1 Rainfall during corn growth period in 2011—2012 at the experiment field

年份 Year	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	总计 Total
2011	0	106.6	45.1	150.6	68.0	370.3
2012	8.8	70.2	30.2	116.8	166.0	392.0

试验田土地平坦,土层深厚,通气良好,土壤类型为垆土,前茬作物为生长了 7 年的苜蓿。玉米播种前耕层 $0 \sim 40 cm$ 有机质含量为 $13.27 g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 $38.43 mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 $6.95 mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 $127.90 mg \cdot kg^{-1}$,pH 值为 8.5 ,属中等肥力水平。

1.2 试验设计

本试验年限为 2011—2012 年,玉米播期分别为 2011 年 4 月 24 日和 2012 年 4 月 25 日,收获期分别为 8 月 27 日和 9 月 6 日;两年各处理品种为忻抗 14,播种方式均为穴播,行距 $60 cm$,株距 $25 cm$,密度 $66667 株 \cdot hm^{-2}$;玉米播种前的基肥和拔节期的追肥均为复合肥,施肥水平为 $N 150 kg \cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5 120 kg \cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O 90 kg \cdot hm^{-2}$,按基肥:追肥 = 1:1 施入,各处理施肥量一致。

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,其中灌溉方式设沟灌、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)及集雨节灌处理的沟垄宽均为 60 cm,垄高 15 cm;沟灌处理开沟深度为 15 cm,沟宽 40 cm;畦灌处理畦高为 15 cm,畦宽 300 cm。沟灌、畦灌处理每次灌水量均为 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,集雨节灌为 $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,水表量水控制灌水。各小区面积为 60 m^2 (长 20 m × 宽 3 m)。试验处理如表 2。

表 2 试验处理设计

Table 2 The design of experiment treatments

灌溉时期 Irrigation period	灌溉方式 Irrigation method	灌溉量/mm Irrigation amount
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 harvesting planting 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 harvesting planting 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
全程不灌水 No irrigation in whole growth period	沟垄集雨种植(M) Planting of rainfall harvesting (M)	0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合指标的测定 田间测定分别在玉米拔节期、抽雄期和灌浆期进行,选择一个晴朗天气,在自然光源下进行活体测定,时间定于上午 9:00—11:00,每处理随机选取 5 株具有代表性的植株,用 LI-6400 光合仪分别测定功能叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)。

1.3.2 相对叶绿素含量的测定 田间测定分别在拔节期、抽雄期和灌浆期进行,每处理选取 10 株具有代表性的植株(拔节期选择最上部完全展开叶,其

余两个时期选择棒叶),用美国产 CM-1000 非接触式叶绿素仪在自然光源下活体测定叶片相对叶绿素含量(SPAD 值)。时间定于上午 9:00—11:00,配合光合指标同天测定。

1.3.3 最终产量指标的测定 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,测定玉米穗长、穗粗、穗粒数、百粒重等性状;经济产量以沟垄总面积计算。

1.3.4 水分利用效率计算^[12]

(1) 沟灌、畦灌种植区:

$$W_c = (W_1 - W_2) + P + I$$

$$WUE_Y = \frac{Y}{W_c}$$

(2) 集雨节灌种植区:

$$W_c = P + E_r \frac{n_1}{n_2} P + (W_1 - W_2) + I$$

$$WUE_Y = \frac{Y}{W_c \times \frac{n_2}{n_1 + n_2}}$$

式中, W_c 为作物耗水量(mm); WUE_Y 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); W_1 、 W_2 分别为播种前和收获时 200 cm 土层储水量(沟垄种植区以沟中、垄侧和垄中储水量平均值计算)(mm); E_r 为沟垄集雨种植垄面集水效率,取值为 0.87^[13]; P 为作物生长期的降水量(mm); I 为生育期田间灌水量(mm); n_1 、 n_2 分别为垄宽和沟宽(cm); Y ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为沟垄总面积计算的籽粒产量,得到籽粒产量水分利用效率。

1.3.5 数据处理 各分析数据均为 2011、2012 年两年平均值。数据处理运用 Excel 2003 进行,用 DPSv7.05 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 不同处理对春玉米相对叶绿素含量(SPAD 值)的影响

SPAD 值是利用叶绿素计进行无损活体测定的反映植物叶片叶绿素相对含量的指标。从表 3 中可以看出,集雨节灌处理的 2 年平均 SPAD 值在拔节期、抽雄期和灌浆期均大于沟垄集雨种植(M)以及对应的沟灌、畦灌处理。其中在拔节期,集雨节灌的播前灌 1 水处理(M1)与播前和开花期均灌 1 水处理(M3)较沟垄集雨种植(M)分别显著提高 4.56%、4.76%,其余各处理差异均不显著,但 2011 年开花期灌 1 水处理中集雨节灌(M2)的 SPAD 值较水平畦灌(B2)降低 0.11%。与 M 相比,F1、F2、F3

及 B1、B2、B3 处理在拔节期、抽雄期、灌浆期的相对叶绿素含量均无显著变化。

表 3 不同处理春玉米生育阶段叶绿素相对含量 (SPAD 值)

Table 3 SPAD value of spring corn at different stages under different treatments

处理 Treatments	相对叶绿素含量 Chlorophyll relative content (SPAD)		
	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling
M1	362.2a	344.7a	325.9a
F1	355.5ab	328.0a	293.2a
B1	353.4ab	320.8a	280.1a
M	346.4b	326.3a	296.9a
M2	346.4b	327.8a	313.5a
F2	344.1b	306.1a	297.6a
B2	344.6b	302.6a	283.8a
M	346.4b	326.3a	296.9a
M3	362.9a	342.3a	332.1a
F3	356.9ab	327.4a	303.2a
B3	352.7ab	318.2a	292.8a
M	346.4b	326.3a	296.9a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.

2.2 不同处理对春玉米净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率的影响

由于开花后光合产物主要分配去向是籽粒,因

而这一时期维持较高的光合速率、延长光合时间和降低呼吸消耗,对于光合产物的转化和积累、增加粒重、形成经济产量具有重要作用^[14]。如表 4 所示,玉米叶片的净光合速率在抽雄期达到最大,灌浆期急剧下降。集雨节灌处理的净光合速率在拔节期和抽雄期均显著大于对应的沟灌、畦灌处理;与 M 相比,M1、M3 在拔节期和抽雄期也均有显著提高。灌浆期集雨节灌处理的净光合速率同样大于 M 以及对应的沟灌、畦灌处理,但差异未达显著水平。沟灌各处理与 M 相比,F2 在这三个时期均有所降低,且在拔节期和抽雄期差异较大;F3 较 M 均有所提高,但在 2011 年的拔节期降低 0.59%,2012 年的抽雄期降低 0.06%;F1 在拔节期和抽雄期较 M 有所提高,灌浆期略有降低,但在 2011 年拔节期较 M 降低 0.29%。畦灌各处理的净光合速率从拔节期到灌浆期均小于 M,其中 B2 与 M 的差异在拔节期和抽雄期较显著。

蒸腾速率在一定程度上反映了植物调节水分及适应不同环境的能力,对于植物体内水分吸收和运转、维管束物质运输、维持叶片温度和促进气孔内外气体交换具有重要作用^[8]。从表 4 中可以看出,玉米叶片的蒸腾速率在拔节期较高,抽雄期有所下降,灌浆期达到最低。集雨节灌处理的蒸腾速率在拔节期和抽雄期均显著大于对应的沟灌、畦灌处理。与 M 相比,M1、M3 在拔节期和抽雄期也均有显著提高。灌浆期集雨节灌处理的蒸腾速率同样大于 M

表 4 不同处理春玉米生育阶段净光合速率、蒸腾速率和瞬时水分利用效率

Table 4 P_n , T_r and WUE of spring corn at different stages under different treatments

处理 Treatments	净光合速率 (P_n) Net photosynthetic rate $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate $/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			瞬时水分利用效率 (WUE) Instantaneous water use efficiency $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$		
	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling
M1	30.17a	38.28a	23.13a	6.95a	6.73a	6.19a	4.35a	5.70a	3.73a
F1	26.72b	34.59b	20.03a	6.38b	6.21b	5.88a	4.18a	5.58a	3.43a
B1	25.13b	32.53b	18.33a	6.12c	5.97b	5.71a	4.12a	5.51a	3.22a
M	26.56b	34.20b	20.87a	6.43b	6.13b	5.90a	4.14a	5.59a	3.53a
M2	26.73b	34.16b	22.50a	6.44b	6.14b	6.09a	4.17a	5.58a	3.69a
F2	23.38c	30.70c	20.35a	5.91c	5.71c	5.85a	3.94a	5.44a	3.48a
B2	22.67c	30.69c	19.13a	5.86c	5.68c	5.76a	3.87a	5.44a	3.35a
M	26.56b	34.20b	20.87a	6.43b	6.13b	5.90a	4.14a	5.59a	3.53a
M3	30.24a	38.42a	24.53a	6.95a	6.74a	6.35a	4.36a	5.71a	3.87a
F3	26.63b	34.47b	21.12a	6.40b	6.17b	5.97a	4.17a	5.59a	3.53a
B3	25.29b	32.80b	20.23a	6.14c	5.97b	5.89a	4.12a	5.51a	3.44a
M	26.56b	34.20b	20.87a	6.43b	6.13b	5.90a	4.14a	5.59a	3.53a

以及对应的沟灌、畦灌处理,但差异不显著。与 M 相比,沟灌处理的 F1 在抽雄期提高 1.31%; F2 在拔节期、抽雄期、灌浆期分别降低 8.09% ($P < 0.05$)、6.85% ($P < 0.05$)、0.85%; F3 只在拔节期降低 0.47%,其余均有小幅度的增长。畦灌各处理的蒸腾速率一直小于 M,且在拔节期差异显著,但 2012 年 B3 在灌浆期提高 1.83%。

植物叶片的瞬时水分利用效率为净光合速率与蒸腾速率的比值,它反映了 CO_2 同化作用和水分消耗的关系以及植物对逆境适应能力的强弱^[15-16]。玉米叶片瞬时水分利用效率的变化趋势与净光合速率一致,在抽雄期达到最大,灌浆期急剧下降,各处理之间均无显著差异。从各生育阶段来看,集雨节灌处理的瞬时水分利用效率均大于对应的沟灌、畦灌处理,且在灌浆期增幅较大;与 M 相比,除抽雄期 M2 降低 0.18% 外,其余均有不同程度提高,其中在灌浆期增幅较大。沟灌处理中除 F1、F3 在拔节期较 M 分别提高 0.97%、0.72% 外,其余均有所降低,但

不显著,2011 年灌浆期 F3 略有提高。拔节期到灌浆期,畦灌各处理的 WUE 一直小于 M,但在 2012 年拔节期 B1、B3 分别提高了 2.51%、1.75%。

2.3 不同处理对春玉米气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的影响

气孔导度反映了单位叶面积蒸腾失水的情况和气孔对干旱的敏感性^[17]。从表 5 可以看出,随着生育时期的推进,各处理气孔导度逐渐减小。从各生育阶段来看,集雨节灌处理的气孔导度均大于对应的沟灌、畦灌处理。其中 M1 较 B1 在这三个阶段均有显著提高; M1 与 F1、M2 与 B2 均在抽雄期和灌浆期差异显著; M3 在这三个阶段均显著大于 F3、B3。与 M 相比, M2 不同阶段差异不显著,且只在灌浆期提高 12.50%; M1、M3 在这三个阶段较 M 均有提高,且在抽雄期和灌浆期差异较大。与 M 相比,拔节期到灌浆期,沟灌和畦灌处理中除灌浆期的 F3 外,其余处理的气孔导度均小于 M,且只在抽雄期 B2 与 M 差异显著。

表 5 不同处理春玉米气孔导度和胞间 CO_2 浓度

Table 5 G_s and C_i of spring corn at different stages under different treatments

处理 Treatments	气孔导度 (G_s)/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Stomatal conductance			胞间 CO_2 浓度 (C_i)/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Intercellular CO_2 concentration		
	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling
M1	0.30a	0.27a	0.19a	98.86d	160.60a	210.17b
F1	0.26a	0.21b	0.15b	125.89e	173.20a	272.33ab
B1	0.23b	0.19b	0.13b	145.46b	183.90a	286.83a
M	0.27ab	0.23b	0.16b	121.00c	172.20a	232.00ab
M2	0.27ab	0.22b	0.18a	123.50c	175.70a	210.33ab
F2	0.22b	0.18b	0.15ab	163.23a	198.20a	263.17a
B2	0.22b	0.16c	0.14b	167.65a	200.90a	276.67a
M	0.27ab	0.23b	0.16b	121.00c	172.20a	232.00ab
M3	0.31a	0.28a	0.20a	99.17d	160.80a	187.67b
F3	0.26b	0.21b	0.16b	125.10c	174.30a	243.83ab
B3	0.24b	0.19b	0.15b	143.82b	188.70a	274.00a
M	0.27ab	0.23b	0.16b	121.00c	172.20a	232.00ab

胞间 CO_2 浓度的变化与光合能力的高低直接相关,随着生育时期的推进,胞间 CO_2 浓度逐渐增大。拔节期到灌浆期,沟灌、畦灌各处理的胞间 CO_2 浓度均大于对应的集雨节灌处理,其中在拔节期均差异显著;抽雄期各处理之间差异较小;在灌浆期, B1 与 M1、B3 与 M3 差异较大。与 M 相比, M2 在拔节期和抽雄期均有提高,灌浆期降低 9.34%, M1、M3 则均有降低,其中在拔节期差异显著。F1、F2、F3 与 M 相比从拔节期到灌浆期均有提高,其中拔节期 F2 较 M

显著提高 32.17%。B1、B2、B3 处理的胞间 CO_2 浓度也大于 M,且在拔节期差异显著。

2.4 不同处理对春玉米产量和水分利用效率的影响

由表 6 可知,集雨节灌处理的玉米产量性状指标及产量均大于对应的沟灌、畦灌处理。集雨节灌处理的穗长较沟灌、畦灌和 M 的增幅为 2.08% ~ 7.30%, M3 与 B3 差异显著;与 M 相比,沟灌、畦灌处理中只有 F3 提高 1.04%,其余均小于 M。集雨节

灌处理的穗粗较沟灌、畦灌和 M 的增幅为 0.97% ~ 4.56%, M3 与 B3 差异显著, 2011 年 M1、M2 的穗粗较 M 分别降低了 0.19%、0.75%; 沟灌、畦灌各处理的穗粗均小于 M。集雨节灌处理的穗粒数均大于沟灌、畦灌和 M, 其中 M1 与 B1、M3 与 B3 差异显著, M2 的穗粒数在 2011 年较 F2 降低 2.78%, 2012 年较 M 降低 0.18%; 沟灌、畦灌各处理的穗粒数与 M 相比, F2、F3 分别提高 1.58%、4.94%, 其余均有不同

程度的降低, 但 2011 年 F1、B1、B3 的穗粒数较 M 略有提高, 2012 年 F2 较 M 降低 3.83%。集雨节灌处理的百粒重较对应的沟灌、畦灌处理均有显著的提高; 与 M 相比, M1、M2、M3 的百粒重分别降低 2.39% ($P < 0.05$)、0.54%、2.39% ($P < 0.05$), 但在 2012 年较 M 均有小幅度的增长; 沟灌、畦灌各处理较 M 的降幅为 4.59% ~ 10.25% ($P < 0.05$), 2012 年 F3 的百粒重提高了 0.32%。

表6 不同处理下春玉米的产量和水分利用效率

Table 6 The yield and WUE_y of spring corn under different treatments

处理 Treatments	穗长 Ear length /cm	穗粗 Ear diameter /cm	穗粒数 Kernels per spike	百粒重 Weight per 100 grains/g	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率 Water use efficiency(WUE_y) /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
M1	18.84ab	18.84ab	532a	36.39b	12910.63a	33.31a
F1	17.91b	17.91b	490ab	34.21c	11182.92c	23.82b
B1	17.65b	17.65b	475b	33.46c	10595.54c	21.75b
M	18.30ab	18.30ab	506ab	37.28a	12501.06ab	31.89a
M2	18.68ab	18.68ab	519ab	37.08ab	12791.52a	33.51a
F2	18.23ab	18.23ab	514ab	34.85c	11947.96ab	26.10b
B2	17.62b	17.62b	475ab	34.15c	10802.19c	24.01b
M	18.30ab	18.30ab	506ab	37.28a	12501.06ab	31.89a
M3	19.41a	19.41a	545a	36.39b	13216.33a	32.84a
F3	18.49ab	18.49ab	531ab	35.57c	12583.09ab	23.42b
B3	18.09b	18.09b	495b	34.93c	11535.92bc	21.23b
M	18.30ab	18.30ab	506ab	37.28a	12501.06ab	31.89a

集雨节灌处理的产量均高于沟灌、畦灌和 M, 且与畦灌处理差异较大; F1、F2 的产量较 M 分别降低 10.54% ($P < 0.05$)、4.42%, F3 提高 0.66%; B1、B2、B3 的产量均较 M 有所降低, 其中与 B1、B2 差异显著。集雨节灌的水分利用效率较对应的沟灌、畦灌处理均有显著提高, 与 M 差异不大; 沟灌、畦灌各处理的水分利用效率均小于 M, 降幅为 18.16% ~ 33.44% ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

相关研究表明^[18-19], 水分胁迫下玉米叶片相对含水量下降, 叶绿素分解及合成受阻, 含量降低^[20], 导致蒸腾作用受阻, 光合能力降低。干旱胁迫下玉米叶片气孔被迫关闭, CO_2 的吸收量减少, 导致光能转化率降低, 这是作物减产的主要原因。

本试验结果表明, 集雨节灌处理的相对叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率等光合参数以及产量和水分利用效率较沟灌、水平畦灌均有不同程度提高, 这与集雨节灌种植方式改善了土壤水分条件有直接关系。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, 显著降低了垄下土壤水分的蒸发, 同时垄上的降雨叠加至沟中, 使种植沟中接纳的雨水量是沟灌、畦灌的 1 倍, 远大于玉米生长期中补灌的水量, 使得玉米根域水分条件显著改善, 有利于光合作用的进行和干物质向穗部的转移和积累, 最终提高产量。集雨节灌处理的两年春玉米产量和沟垄集雨种植相比差异均不显著, 这与玉米生育期降雨量及分布有较大关系。春玉米生育期内雨量较为充足, 与沟垄集雨种植比较相对弱化了在玉米生育关键期进行补充灌溉的优势, 因而各处理间相差幅度较小。

经过以上分析可以看出, 与传统灌溉方式沟灌、水平畦灌相比, 集雨节灌种植在灌水量减少一半的情况下, 玉米叶片相对叶绿素含量和光合能力并未降低, 且显著提高了玉米产量和水分利用效率, 可以认为集雨节灌是玉米高产节水栽培的一条新技术途径, 具有重要的推广应用前景。

参考文献:

[1] 朱永达, 朱冬麟, 娄世忠. 高产高效机械化节水农业技术体系初

- 探[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 1-6.
- [2] 罗良国, 任爱胜, 王瑞梅, 等. 我国农业可持续发展的水危机及广泛开展节水农业前景初探[J]. 节水灌溉, 2000, 5: 6-10.
- [3] 王韩民. 关于做好农业和农村节水工作的几点思考[J]. 节水灌溉, 2002, 1: 5-14.
- [4] 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): 83-89.
- [5] 王俊鹏, 马林, 蒋骏, 等. 宁南半干旱地区农田微集水种植技术研究[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(8): 22-27.
- [6] 王俊鹏, 蒋骏, 韩清芳, 等. 宁南半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 8-13.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 韩娟, 贾志宽, 任小龙, 等. 模拟降雨量下微集水种植对玉米光合速率及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 81-85, 101.
- [10] 牛俊义, 秦舒浩, 蒯海明, 等. 集雨补灌对粮饲兼用玉米的产量及生理效应研究[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 1-3.
- [11] 崔福柱, 冯瑞云, 郭秀卿, 等. 不同灌溉方式对玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(1): 118-120.
- [12] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量下沟垄微型集雨种植玉米的水温效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 70-77.
- [13] Xiao Yan Li, Jia Dong Gong, Qian Zhao Gao. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2011, 50: 173-183.
- [14] 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, 22(5): 66-69.
- [15] 蒋高明, 何维明. 毛乌素沙地若干植物光合作用、蒸腾作用和水分利用效率种间及生境间差异[J]. 植物学报, 1999, 41(10): 1114-1124.
- [16] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Ann. Rev Plant Physiol, 1978, 29(1): 277-317.
- [17] 李潮海, 栾丽敏, 王群, 等. 苗期遮光及光照转换对不同玉米杂交种光合效率的影响[J]. 作物学报, 2005, (3): 381-385.
- [18] 罗明华, 胡进耀, 吴庆贵, 等. 干旱胁迫对丹参叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 619-623.
- [19] 常敬礼, 杨德光, 谭巍巍, 等. 水分胁迫对玉米叶片光合作用的影响[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(11): 1-5.
- [20] Borrell A K, Hammer G L. Does maintaining green leaf area sorghum improve yield under drought[J]. Crop Science, 2000, 40: 1037-1048.

(上接第 58 页)

土壤质地的不同影响着湿润体特征值的变化, 本次研究主要针对砂壤土, 所以其试验结果有一定的局限性, 对于其他不同质地土壤湿润体特征值变化还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵颖娜, 汪有科, 马理辉, 等. 不同流量对滴灌土壤湿润体特征值的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 30-34.
- [2] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32-35.
- [3] Nakayama F S, Bucks D. Trickle irrigation for crop production—design, operation and management[M]. London: Elsevier Science Publishers. B. V., 1986: 19, 68, 108.
- [4] Meshkat M, R C Warner, S R Workman. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. Trans of the ASAE, 2000, 43(1): 79-86.
- [5] Michael A B, Bruce G S, David G B. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems[J]. Irrig Sci, 2003, 22: 135-141.
- [6] Gardner W R, Mayhugh M S. Solution and tests of the diffusion equation for the more meat of water in soil[J]. Soil Sci Soc Amerproc, 1958, 22: 197-201.
- [7] 刘晓英, 杨振刚, 王天俊. 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J]. 水利学报, 1990, 21(1): 11-21.
- [8] Brant A, Bresler E, Diner N, et al. Infiltration from a trickle source: I. mathematical models[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1971, 35: 675-683.
- [9] 李光永, 曾德超. 滴灌土壤湿润体特征值的数值算法[J]. 水利学报, 1997, 28(7): 1-6.
- [10] 刘雪芹, 范兴科. 滴灌条件下土壤水分再分布过程研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 42-45.
- [11] 杨直毅, 汪有科, 汪星, 等. 山地红枣林地滴灌水分运移规律试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 213-216.
- [12] 岳海英. 滴灌条件下土壤水分运移规律试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [13] 郑园萍. 滴灌条件下土壤水分入渗过程模拟试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 15-17.
- [14] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 水利学报, 2000, 31(6): 39-44.
- [15] 张志刚. 滴灌条件下土壤水分运移规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013: 11-44.
- [16] 杨婵婵, 李宏, 郭光华, 等. 幼龄期红枣吸收根系空间分布特征[J]. 南方农业学报, 2013, 44(2): 270-274.
- [17] 张志刚, 李宏, 等. 塔里木河中游胡杨与灰叶胡杨气体交换特性对比研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(12): 2506-2511.
- [18] 李宏, 张志刚, 郑朝辉, 等. 南疆红枣林地不同流量对滴灌土壤水分运移特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(8): 171-174.