

模拟不同雨量下沟垄集雨种植 对春玉米生产力的影响

任小龙¹, 贾志宽^{1,*}, 陈小莉², 韩清芳¹, 李 荣¹

(1. 西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探明沟垄集雨种植适宜的降雨量范围,使沟垄集雨系统更加有效,通过大田模拟降雨试验,研究了不同雨量下沟垄集雨种植对农田水温状况及春玉米个体发育、生物量积累、水分利用效率(*WUE*)和产量的影响。结果表明,在 230 ~ 440mm 雨量下,与平作处理相比,沟垄集雨种植处理后,沟内土壤 10cm 处温度增加了 0.7 ~ 1℃,沟内 120cm 土壤平均储水量增加了 5% ~ 12%,玉米的出苗期提前 1 ~ 2d,生育期普遍提前,株高、功能叶面积和生物量显著增加 ($P < 0.05$)。玉米籽粒产量及 *WUE* 在 230mm 雨量下分别增加了 82.8% 和 77.4%, 340mm 雨量下分别增加了 43.4% 和 43.1%, 440mm 雨量下分别增加了 11.2% 和 9.5%。沟垄集雨种植春玉米适宜的雨量上限可能在全生育期降雨量 440mm 以下。

关键词:模拟降雨;沟垄集雨种植;玉米生产力

文章编号:1000-0933(2008)03-1006-10 中图分类号:Q145, Q945 文献标识码:A

Effects of rainwater-harvested furrow/ridge system on spring corn productivity under different simulated rainfalls

REN Xiao-Long¹, JIA Zhi-Kuan^{1,*}, CHEN Xiao-Li², HAN Qing-Fang¹, LI Rong¹

1 Research Center of Agriculture in the Arid and Semiarid Areas, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1006 ~ 1015.

Abstract: A field experiment was conducted to determine the effects of rainwater-harvested furrow/ridge systems on soil water use efficiency (*WUE*) and grain yield of spring corn under differently simulated rainfall supplies. Our results showed that when rainfall supply ranged between 230 and 440mm, rainwater-harvested furrow/ridge system could increase the surface temperature at a depth of 10cm by 0.7—1℃ and water storage capacity in the 0—120cm soil layer by 5%—12%, as well as speeded up the emergence of seedlings compared with the control. In addition, this rainwater-harvested furrow/ridge system also enhanced grain yield and *WUE* of spring corn by 82.8% and 77.4% under rainfall of 230mm, by 43.4% and 43.1% under rainfall of 340mm and by 11.2% and 9.5% under rainfall of 440mm. The upper ceiling of rainfall for spring corn suitable for adopting this furrow/ridge system was considered to be about 440mm over the whole growth period of corn.

基金项目:国家“十一五”旱地农业支撑计划课题资助项目(2006BAD29B03)

收稿日期:2007-08-27; 修订日期:2007-12-20

作者简介:任小龙(1981~),男,甘肃正宁人,博士生,主要从事旱地农业研究. E-mail:rxlcxd@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:zhikuan@tom.com

Foundation item: The project was financially supported by “11th five year plan period” dry-land agriculture, China(No. 2006BAD29B03)

Received date: 2007-08-27; **Accepted date:** 2007-12-20

Biography: REN Xiao-Long, Ph. D. candidate, mainly engaged in dry-land agriculture. E-mail:rxlcxd@yahoo.com.cn

Key Words: simulated rainfall; rainwater-harvested furrow/ridge system; corn productivity

黄土高原是我国旱地农业的中心地带,水资源短缺严重制约着该区经济发展和农业生产力的提高^[1]。半干旱区 $\geq 80\%$ 保证率的年降水量为 250~400mm,降水量少且变率大,季节分配不均。已有的研究表明,半干旱区 60% 的年降水多集中在 7、8、9 三个月份^[2]。而该区的雨季与作物生育期不一致,且降雨形式以小雨或大暴雨为主,这不仅不利于作物对水分的有效吸收,而且会造成大面积水土流失,导致干旱频繁发生^[3]。因此,旱作农田产量的增加要从水分要素入手,通过集雨、蓄水等途径,利用该区有限的降水提高作物水分利用率,这是旱作农业发展的基本途径^[4,5]。许多研究发现,沟垄集雨系统既能起到改善土壤墒情和延长水分有效期的作用^[6,7],还可促进农作物、花卉和森林植物的生长,对于缺乏灌溉和灌溉成本高的干旱半干旱区非常适用^[8~10]。大田研究表明^[11,12],与传统平作相比,集雨结合膜垄和砂砾覆盖沟一方面提高了籽粒产量和水分利用效率,另一方面有助于更有效地利用小降雨。在沟垄比适宜的条件下,集雨系统不仅提高了沟垄作地表温度和养分利用效率,而且显著增加了马铃薯产量和水分利用效率^[13]。Pacey&Cullis^[14]指出冬季降雨区适合于雨水集流的最低年平均降雨量为 100mm,在热带夏季降雨区,适合于雨水集流的最低年平均降雨量为 150 mm。许多作者的研究表明,适合于雨水集流的最低年平均降雨标准都在干旱区范围内,而在年降雨量为 250~600mm 的我国中部半干旱区及黄土高原半干旱区,沟垄集雨种植适宜降雨量的研究则并不多见。所以本试验利用自制模拟降雨器,通过控制玉米(该区的主种作物)生育期内的雨量,比较不同降雨量水平传统平作和沟垄种植对玉米生长发育、生物量累积和产量的影响,为确定合理的集雨种植模式提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 年 3 月~2007 年 10 月在位于中国渭河谷地头道塬的西北农林科技大学(108°04'E,34°20'N)农作物标本区遮雨棚内进行,棚高 3m,呈“人”字型,棚顶用透光塑材覆盖,棚四侧通风。该地年蒸发量 993.2mm,平均降雨量 550 mm,干旱指数为 1.3~1.59,海拔 466.7m;年均气温 12.9℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温 -19.4℃,年均日照时数为 2196 h,无霜期 220d,光照充足,属暖温带半湿润偏旱型气候。供试土壤为壤土,耕层(0~30 cm)土壤有机质 11.97 g·kg⁻¹,全氮 1.31 g·kg⁻¹,全磷 0.83 g·kg⁻¹,全钾 6.18 g·kg⁻¹,速效氮 53.12 mg·kg⁻¹,速效磷 22.34 mg·kg⁻¹,速效钾 97.37 mg·kg⁻¹,pH 值 7.59,容重 1.25 g·cm⁻³;40cm 土层初始含水量:0~10cm,4.76%;10~20cm,6.21%;20~40cm,9.30%;2006 年上茬作物为夏玉米,2006 年 10 月~2007 年 3 月休闲。

1.2 试验设计

1.2.1 模拟降水装置

该装置由供水和降雨系统两部分组成(如图 1 所示)。供水系统由 1 台潜水泵、2 根外接水管(进水管和余水排出管)以及备用储水水箱组成。降雨系统为底部密布(每 2cm×2cm 一枚)9 号医用注射针头的铁皮水箱(水箱上装有振动装置)及可拆卸式水箱支架,水箱底部降雨面积为 2m×1m,高度为 0.1m,外侧安装振动装置;支架高度为 2m,每小区两侧安装有移动轨道(高 0.05m),雨滴降落高度大于 2m,雨强为 30mm h⁻¹,有效降雨均匀度大于 90%。

1.2.2 降雨量的确定

春玉米全生育期总降雨量的确定主要参考了中国北方旱区 80% 保证率下多年降雨量及其时空分布特点。在玉米生长期,设定大(440mm)、中(340mm)、小(230mm) 3 个雨量范围,然后根据本区玉米各生育期雨量占全生育期雨量的百分率确定各生育时期的降雨量。各生育时期内各次的雨量范围定为 5~50mm,即最小为 5mm,最大不超过 50mm,对各次降雨量大于 10mm 的降雨过程,本试验以小于或等于 10mm 雨量再分次降入(再分次降入的时间间隔不短于 2h)。降雨时间间隔最短不少于 5d,最长不超过 15d,在满足以上条件的基础上,以尽量减少降雨次数为标准确定降雨次数和降雨时间表 1。

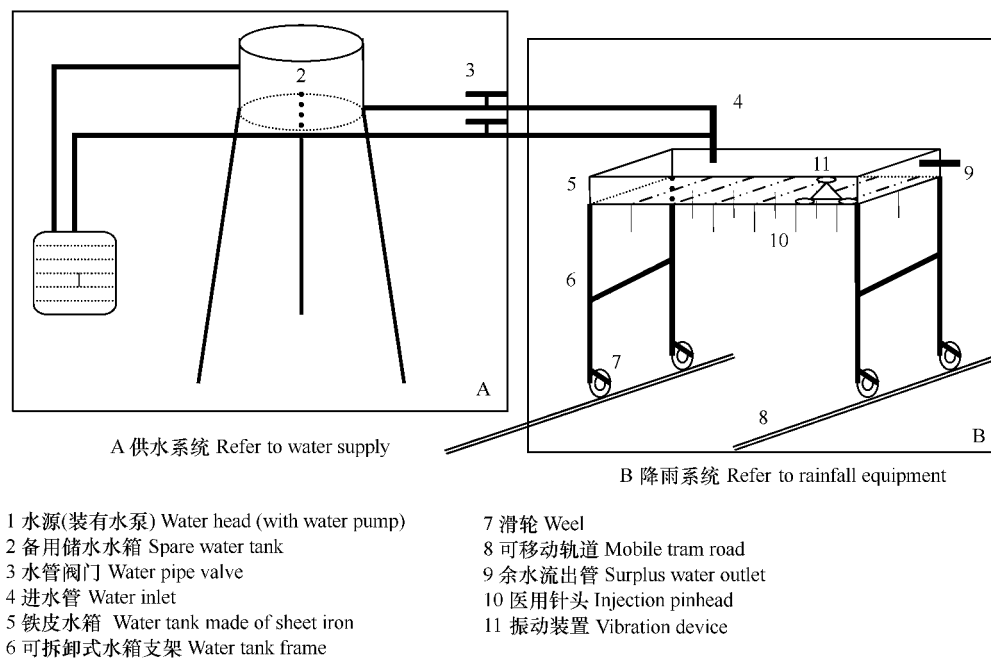


图1 模拟降雨装置示意图
Fig. 1 The plan of simulated rainfall equipment

1.2.3 设计方案

田间试验设3个降雨量水平:230、340mm和440mm,每个雨量水平下设2个种植方式处理:传统平作(T_1 ,对照)和沟垄作(T_2),随机区组,3次重复。田间试验中各种植小区面积为 $2\text{m} \times 10\text{m}$;沟垄作小区7沟8垄,沟垄宽之比为1:1,垄、沟宽都为60cm(图2),垄上覆盖0.08mm的塑料薄膜,产流区(垄)面积为 $2\text{m} \times 0.6\text{m}$,垄高15cm。沟中种植玉米,平作与沟垄作玉米的株距均为30cm,行距为60cm,各种植小区的单株数为112株,折合 5.6×10^4 株/ hm^2 。小区边行作为保护行。为了防止小区水分互渗,各小区边缘有埋深2m的塑料膜,作为水分隔离带。

表1 模拟降雨方案设置
Table 1 The design scheme of simulated rainfall

生育期 Growth stages	降雨次数 Rainfall times	各次降雨量 Rainfall pertime(mm)			实际降雨时间(月-日) Actual rainfall time(month-day)
		230	340	440	
苗期 Seedling	1	12	26	35	04-10 ~ 04-11
拔节期 Jointing	3	10	20	30	04-25 ~ 04-26
		29	45	48	05-09 ~ 05-10
		5	5	5	05-23
孕穗期 Booting	4	45	47	50	05-28 ~ 05-29
		25	45	50	06-10 ~ 06-11
		20	35	45	06-22 ~ 06-23
		5	5	25	07-05
成熟期 Maturity	4	44	47	50	07-10 ~ 07-11
		20	40	47	07-19 ~ 07-20
		10	15	45	07-28 ~ 07-29
		5	10	10	08-06

玉米播种前 30d 开始整地、起垄、覆膜,基肥为优质农家肥和磷酸氢二铵,分别以 2×10^4 和 $5 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 撒播施入(平作区肥料均匀施入小区,而沟垄作区则以和平作区相同量的肥料只施在种植沟内)。春玉米播种日期为 2007 年 3 月 31 日,供试品种为新陕资 1 号,适于本试验区。为了保证出苗,采用坐水点种,每种穴先浇水 1000ml,播种 2 粒,播深 5cm 左右。整个生育过程中不施追肥,及时进行除草、防虫。为避免种植区中产生板结,每次降雨后及时松土。

1.3 测定方法和数据统计

1.3.1 土壤温度的测定

用曲管地温计定位观测沟垄种植区的沟中和平作种植区的行中 10cm 处地温变化,从玉米播种后开始观测,观测时间为每天的 8:00、14:00 点和 20:00,连续观测 60d;日平均地温为每天的 8:00、14:00 和 20:00 地温的平均值。

1.3.2 土壤水分含量的测定

土壤水分含量测定深度为 0~200 cm 土层,取样方法为 0~20 cm 每 10 cm 取 1 个土样,20 cm 以下每 20 cm 取 1 个土样,取样位置为沟垄种植区的沟中,垄侧及垄中,采用称重法测定,测定时间为玉米生长期内的每月的 15 号及播种和收获时,每次测定 3 个重复。

WUE 以单位蒸散量(ET)下的玉米籽粒产量表示^[13,15]:

$$\text{沟垄种植区} \quad ET = P + E_r \frac{n_1}{n_2} P + (W_1 - W_2) \quad (1)$$

$$WUE = \frac{Y}{ET \times \frac{n_2}{n_1 + n_2}} \quad (2)$$

$$\text{平作种植区} \quad ET = (W_1 - W_2) + P \quad (3)$$

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中, ET (mm)为蒸散量; WUE ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)为水分利用效率; W_1 、 W_2 (mm)分别为相邻两次取样时 200cm 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); E_r 为沟垄集雨种植垄面集雨效率(覆膜垄的平均径流效率是 0.87)^[13]; P (mm)为作物生长期的降水量; n_1 、 n_2 (cm)分别为垄宽和沟宽;沟垄作区 Y ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为沟垄总面积计算的籽粒产量,经计算得到籽粒产量水分利用效率。

土壤储水量采用(5)式计算:

$$W = h \times p \times b\% \times 10 \quad (5)$$

式中, W 为土壤储水量(mm); h 为土层深度(cm); p 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $b\%$ 为土壤水分重量百分数。

1.3.3 玉米生育期的观察

以小区内 70% 植株表现某生育期特征作为进入该生育期的标准。

1.3.4 株高、叶面积的测定

每小区选 5 株有代表性、长势一致植株进行挂牌标记,从进入拔节期开始,每隔 7d 测定一次株高并在第一片完全展开叶出现后同步测定其功能叶面积(某生育时期面积最大,光合速率最高的叶片,大喇叭口期前为第一片完全展开叶,后则为棒三叶,本试验中大喇叭口期后指穗位叶),共测 12 次;叶面积测定方法采用系数法,即单叶面积 = 叶片中脉长度(cm) × 叶片最大宽度(cm) × 系数(0.75)。

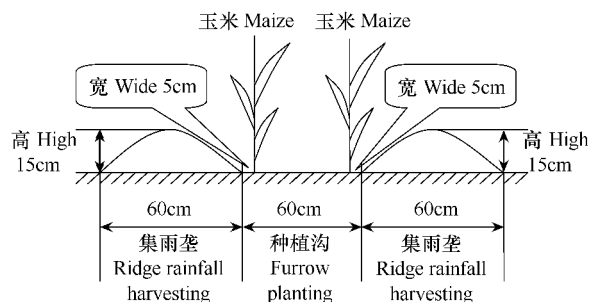


图 2 沟垄集雨种植示意图

Fig. 2 The sketch map of ridge and furrow planting of rainfall harvesting (PFPRH)

1.3.5 根、茎和叶干重的测定

每小区选3株有代表性、长势一致的植株,对其根、茎、叶和穗进行分别取样,105℃杀青30min、80℃烘48h,测定其干重;测定从拔节期后期(出苗后30d左右)开始,每15d测定一次,共测8次。

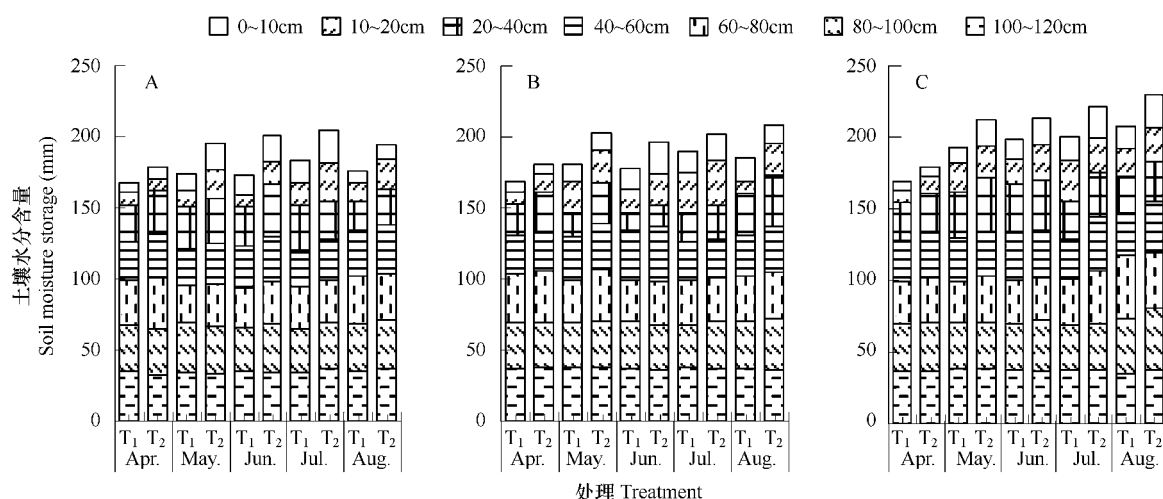
1.3.6 产量因素的测定

测定项目为收获后玉米籽粒、根、茎、叶、干重及穗部性状(千粒重、穗粒数和穗长),沟垄种植区籽粒产量以沟垄总平面面积计算。试验数据用统计分析软件DPSv3.11专业版处理。结果中图表所列数据为3次重复的平均值;对测定结果进行 F 检验,并用LSD法($P < 0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤水分含量

在玉米生育期内, T_2 种植沟中土壤储水量显著高于 T_1 ($P < 0.05$)。表层土壤水分变化比较剧烈,100cm土层以下,土壤水分变化已不明显,所以图3只列出了0~120cm各土层水分状况。在玉米全生育期230、340和440mm雨量下, T_2 沟中0~120cm土层土壤储水量较 T_1 分别增加了7%~12%、6%~11%和5%~10%;随着雨量的增大,增加幅度趋于减小。



T_1 传统平作区土壤储水量 Refers to soil moisture of flat cultivation; T_2 沟垄集雨种植区沟中土壤储水量 Refers to soil moisture in PFPRH; A、B、C 分别表示玉米在230mm、340mm和440mm降雨量下,下同 A、B and C represents respectively 230mm, 340mm, and 440mm rainfall, the same next below

图3 0~120mm各土层土壤水分含量

Fig. 3 Soil moisture contents at 0—120cm soil layer

2.2 土壤表层温度

在玉米播种后60d内, T_2 种植沟内土壤表层10cm处温度明显高于 T_1 ($P < 0.05$,图4),尤其是在晴朗天气,其增温效果更加明显。230、340和440mm雨量下,分别较 T_1 高出0.9~1.0℃、0.8~0.9℃和0.7~0.8℃,随着玉米全生育期雨量的增加, T_2 的增温效果趋于减小。

2.3 玉米的生育进程和植株性状

2.3.1 生育进程

不同降雨量下沟垄作较传统平作使春玉米的生育进程都有所提前,玉米出苗普遍提前2d,拔节期、开花期以及成熟期在230mm降雨量下,分别提前了14、11、13d;440mm降雨量下分别提前了10、9、8d;440mm降雨量下分别提前了2、2、5d(表2)。各降雨量下沟垄种植对玉米各生育时期的影响:230mm > 340mm > 440mm,随着降雨量的增大,影响逐渐变小。

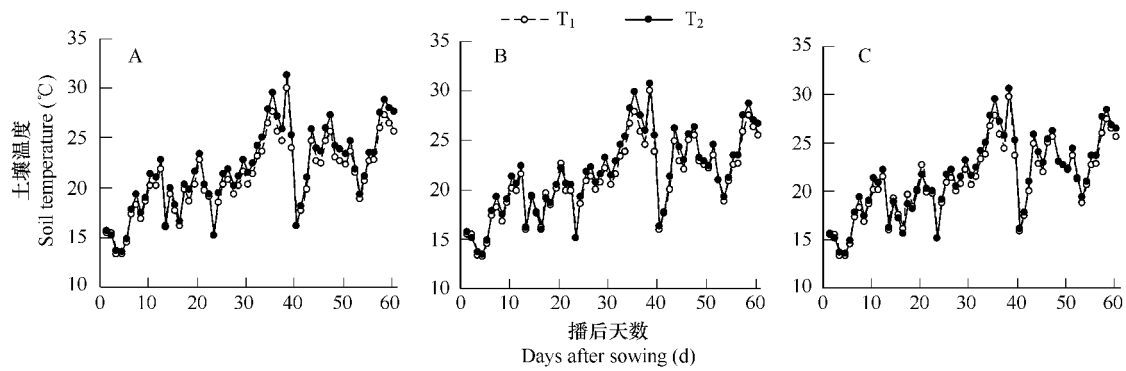


图4 土壤表层10cm处温度
Fig. 4 Temperature at 10cm soil layer

表2 玉米生育进程(月-日)
Table 2 Growth stages of corn (month-day)

生育时期 Growth stage	230mm		340mm		440mm	
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
播种 Sowing	03-31	03-31	03-31	03-31	03-31	03-31
出苗 Seedling emergence	04-14	04-12	04-14	04-12	04-14	04-12
拔节 Elongating	05-20	05-06	05-14	05-04	05-06	05-04
开花 Flowering	06-16	06-05	06-12	06-03	06-04	06-02
成熟 Maturing	08-20	08-07	08-13	08-05	08-04	07-30

2.3.2 株高

在各自不同降雨量下 T₁与 T₂株高从出苗以后便开始出现差异(图5)。T₂株高明显高于 T₁($P < 0.05$),玉米播种后 95d 内,全生育期 230、340mm 和 440mm 雨量下,T₂平均株高比对应降雨量下 T₁的高出 27.18%、20.50%和 6.81%。说明在玉米整个生育期内,沟垄作对株高影响的大小随雨量变化而异,其中 230mm 雨量下,沟垄作对玉米植株的影响最大,依次为 340mm 和 440mm 处理。

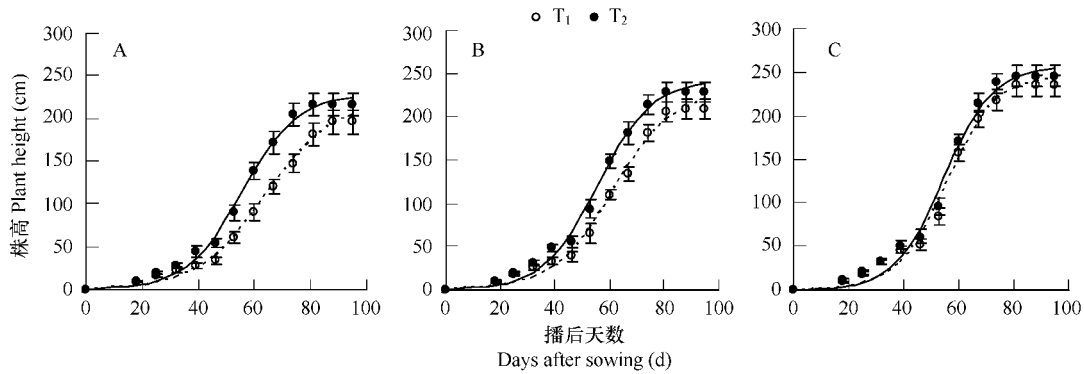


图5 株高动态
Fig. 5 Plant height dynamics

2.3.3 叶面积

不同降雨量下 T₂植株叶面积明显大于 T₁($P < 0.05$,图6)。玉米播种后 95d 内,总生育期 230、340mm 和 440mm 降雨量下 T₂植株叶面积平均比对应降雨量下 T₁高出 73.91%、24.03%和 8.45%。说明 T₂与 T₁植株叶面积的差异随雨量变化而异,其中 230mm 降雨量下,T₂与 T₁植株叶面积差异最大,依次为 340mm 和 440mm

处理。

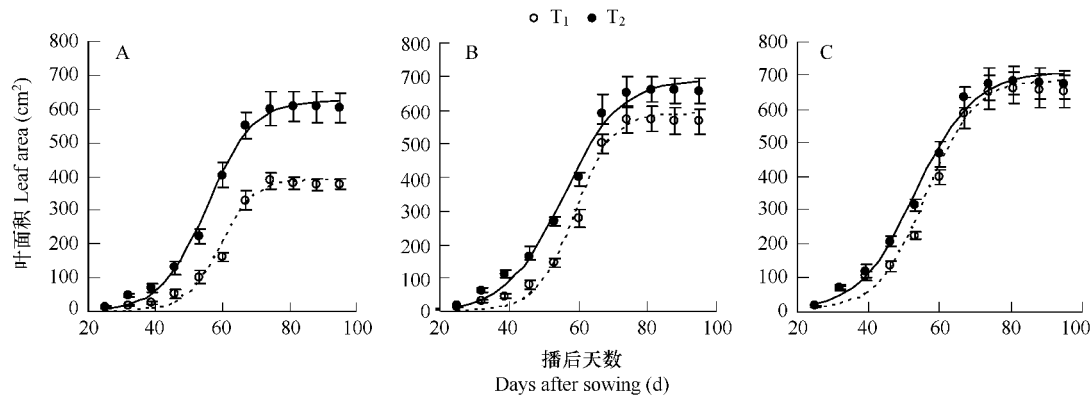


图6 叶面积动态

Fig. 6 Leaf area dynamics

2.4 生物量累积

随着生育进程的推进,玉米单株生物量递增,全生育期 230、340、440mm 降雨量下, T_2 植株生物量累积速率明显大于 T_1 ($P < 0.05$, 图 7)。230、340、440mm 降雨量下,玉米收获时, T_2 植株干重分别比 T_1 高 86.57%、59.66% 和 12.14%。在玉米整个生育期内, T_2 与 T_1 植株干物质积累量的差异随雨量变化而异,其中 230mm 降雨量下, T_2 与 T_1 植株干物质积累量差异最大,依次为 340mm 和 440mm 处理。

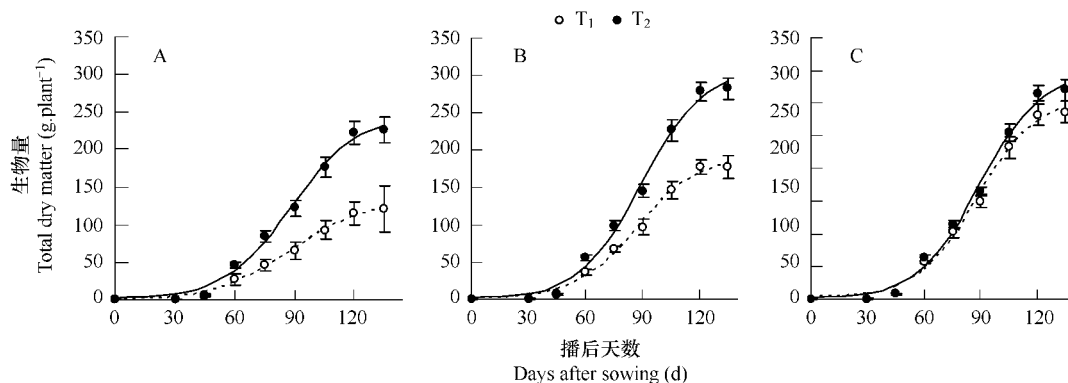


图7 单株生物量累积动态

Fig. 7 The cumulative biomass production per plant

2.5 干物质分配

生长前期 T_2 单株根干重所占生物量比重明显增大,在孕穗期以后(指 7 月 16 日以后), 230 和 340mm 雨量下,穗干重所占生物量比重也明显增大 ($P < 0.05$, 图 8)。其中玉米在出苗后 90d 内(指 7 月 16 日以前), 230、340mm 和 440mm 雨量下,玉米根干重所占生物量比重较 T_1 分别增加了 3.0~4.5、1.3~3.7 和 0.2~1.6 个百分点;孕穗期以后, 230mm 和 340mm 雨量下,春玉米根干重所占生物量比重较 T_1 分别增加了 5.49~8.96 和 3.68~4.01 个百分点,而当全生育雨量增加到 440mm,在玉米成熟时(8 月 15 日)穗所占整株干重的比重则趋于减小。

2.6 产量和水分利用效率

玉米在 230、340mm 和 440mm 雨量下, T_2 籽粒产量、穗粒数和穗长较 T_1 显著增加 ($P < 0.05$, 表 3),其中籽粒产量分别提高了 82.8%、43.4% 和 11.2%,穗长分别增加了 49.1%、18.5% 和 15.6%,穗粒数分别增加了 75.4%、27.2% 和 6.9%,WUE 分别提高了 77.4%、43.1% 和 9.5%。 T_2 的增产幅度随雨量变化而异,其中

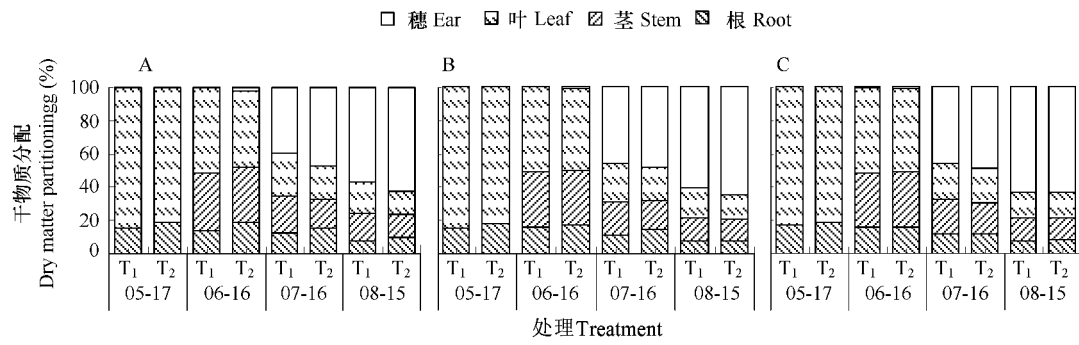


图8 植株干物质分配

Fig. 8 Dry matter partitioning in plants

230mm 降雨量下, T_2 增产幅度最大, 依次为 340mm 和 440mm。随着降雨量的递增, T_2 增产幅度逐渐减小 (图9)。

表3 玉米产量及产量构成因素

Table 3 Corn yields and yield components

处理 Treatments	产量 Yields ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重 Weight per 1000 grains(g)	穗粒数 Number of grains per ear	穗长 Ear length (cm)	ET (mm)	WUE ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
230mm						
T_1	3179b	286.1b	199.9b	11.4b	218.7	14.6b
T_2	5811a	298.1a	350.7a	17.0a	224.5	25.9a
340mm						
T_1	5413b	277.0b	351.6b	15.7b	311.9	17.4b
T_2	7760a	312.1a	447.4a	18.6a	320.3	24.9a
440mm						
T_1	7665b	314.2b	439.0b	17.3b	426.7	17.9b
T_2	8526a	326.9a	469.4a	20.0a	435.8	19.6a

注:相同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异不显著 the same letter represented no significant difference at $\alpha = 0.05$ level

沟垄集雨种植春玉米增产趋势与全生育期降雨量之间的关系符合方程:

$$W_e = -0.0584P^2 + 30.669P - 1334.9$$
$$R^2 = 0.9998 \quad (6)$$

式(6)中, W_e 表示所增加产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P 表示玉米生育期降雨量 (mm), R^2 为决定系数; 此关系在 0.0005 水平显著相关。

3 讨论与结论

3.1 土壤水温状况及玉米生育进程

光、温、水和肥为农业生产四大要素。沟垄集雨种植可以改善作物生长的水温状况, 进而影响其生长发育。Li^[16]的试验表明, 沟垄集雨种植沟中 0~140cm 土层贮水量明显高于平作, 10cm 土层的土温比平作的高 0.9℃, 而且沟垄集雨种植的玉米比平作提前出苗 3d。段喜明^[17]研究表明, 旱地玉米垄膜沟种集雨种植系统中玉米出苗比平作种植提前 2~3d, 成熟比平作提前 15d 左右。本试验结果表明, 由于沟垄集雨系统中膜垄的保温及集雨作用, 在玉米各生育期, 0~120cm 土层贮水量比平作高 5%~12%, 而且, 在玉米生长前期, 种植沟内土壤表层 10cm 处温度平均提高 0.7~1℃, 尤其是在晴天, 增温效果更加明显。但是, 这种水温优势在全生育期雨量较小时最显著, 随着雨量的增加, 有减小趋势, 而正是由于此原因, 在玉米生育期雨量为 230mm

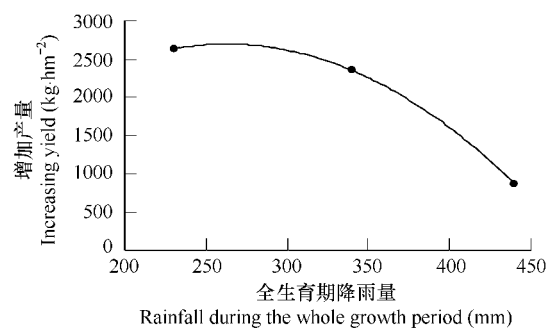


图9 不同降雨量下集雨种植较平作种植增产趋势

Fig. 9 The yield increase trend in PFPRH system compared to the flat planting system under different rainfall supplies

时,沟垄集雨种植对玉米生育进程的影响最大,340mm 时次之,440mm 最小。

3.2 株高、叶面积及生物量累积

已有研究表明,沟垄集雨种植条件下,糜子幼苗期的干重及株高较平作都有较大的提高,干重提高 31.6% ~ 126.3%,株高增加 26.0% ~ 75.7%^[18]。本试验结果表明,在全生育期 230mm 雨量下,沟垄作玉米株高、叶面积和单株生物累积量较对照提高幅度最大,440mm 雨量下较对照提高的幅度最小,但是在 440mm 雨量下,沟垄作对玉米的生长仍然有明显的促进作用。这可能是由于在玉米全生育期雨量较大(440mm)时,平作种植条件下,水分对玉米生长的限制作用有所减弱,虽然该雨量下,沟垄集雨种植也能明显的提高种植沟中的土壤贮水量,但此时即使在平作种植条件下,较大的降雨量也可能使玉米生长的水分条件达到较理想的状态,沟垄集雨种植下,土壤水分优势在增加玉米的株高、叶面积及促进生物量累积方面得不到较明显的体现。

3.3 籽粒产量及水分利用效率

Reij^[19]在撒哈拉荒漠区使用沟垄集雨方法种植高粱和谷子,获得 1900.95 和 3101.6kg·hm⁻²产量,较平作种植增产显著。Li 等^[15]的研究表明,膜垄集雨种植下,作物产量增加 21% ~ 92%。本试验结果表明,在全生育期 230 和 340mm 降雨量下,沟垄集雨种植可使玉米籽粒产量大幅度提高,此结果与大田条件下的研究结果相似,但是在 440mm 降雨量下,只有 11.2% 的增产效应。这正是由于当雨量较大时,水分不足因素对玉米生长的限制作用减弱,这种效应的最终结果表现在籽粒产量上即为 440mm 雨量下增产效果较小。本试验中,在 230、340mm 和 440mm 雨量下,玉米的 WUE 分别提高了 77.4%、43.1% 和 9.5%,这可能是由于沟垄集雨种植系统中的膜垄抑制了玉米棵间的无效蒸发而促进了蒸腾,从而使 WUE 有所提高,但当雨量增大时,沟垄作较平作的籽粒产量增产效应减弱或者消失,从而使 WUE 提高的优势减弱或者消失。

3.4 沟垄集雨种植玉米适宜的生育期雨量

沟垄集雨种植模式减少了播种面积,在降水及其偏少、无雨可集的情况下,增产效果一般无法补偿因种植面积减少引起的作物减产;如果在降水比较充沛的地区,水分不再是限制农作物生长的关键因子,沟垄集雨种植也将失去其意义,因而该技术适宜的区域为半干旱地区。Boers 等^[20~23]合作研究了集雨区集雨(Micro-Catchments Water Harvesting)方式,利用水量平衡的原理从理论上进行了定量研究,建立了设计集雨系统的模型,提出了集雨种植适合于在年降雨量为 250 mm 左右,且有黄土分布的荒漠区使用。Li 等^[24]从资源利用的有效性和经济的可行性角度考虑,提出年平均降雨量在 250 mm 以上的半干旱地区(包括半湿润易旱区),属最适宜发展集雨农业的地区。综合分析试验结果可知,沟垄集雨种植玉米,不是在任何降雨量下都适用,其适宜的雨量上限可能在全生育期 440mm 左右。从其增产效果来看,在玉米全生育期雨量为 230 ~ 440mm 时,都有显著的增产效应,并且随着降雨量的增大,增产幅度变小。其原因是由于玉米为高喜水作物,且对水分较敏感,所以沟垄集雨种植玉米适宜的雨量上限可能要高一些。但考虑到沟垄种植中修垄所付出的人力及垄上覆膜的费用,当雨量为 440mm 时,春玉米 11.2% 的增产量可能难以弥补,所以沟垄集雨方式种植玉米适宜的雨量范围可能在全生育期雨量 440mm 以下。

References:

- [1] Xiao G J, Wang J. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5), 1003 - 1011.
- [2] Li F R, Zhao S L, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China. *Agric. Ecosyst Environ*, 2000, 79:129 - 142.
- [3] Li X Y, Gong J D. Effect of different ridge, furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches. *Agricultural Water Management*, 2002, 54:243 - 254.
- [4] Yao J M, Yin H S. Rainfall resources validation and dryland farming. *Resources Science*, 1999, 21(4):47 - 50.
- [5] Li X Y, Gong J D. Rainfall-runoff Characteristics of Artificial Micro-catchments for Rainwater Harvesting. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1):1 - 4.

- [6] Evenari M, Shanan L, Tadmor N H. Runoff farming in the desert I. Experimental layout. *Agron. J.*, 1968, 60(1):29—38.
- [7] Kayombo B, Hatibu N, Mahoo H F. Effect of Micro-Catchment Rainwater Harvesting on Yield of Maize in a Semi-Arid Area. *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions*, 2004. July, 1—4.
- [8] Li X Y, Gao Q Z. Experimental Study on Rainfall Harvesting and Micro-catchment Model for Ecosystem Rehabilitation in the Transitional Zone Between Arid and Semiarid Regions. *Journal of the Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, 2004, 21 (2):282—287.
- [9] Tian Y, Derong Su, Li F M, Li X L. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. *Field Crops Research*, 2003, 84:385—391.
- [10] Li F M, Yan X, Li F R, Guo A H. Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agric. Water Manage.*, 2001, 47: 25—35.
- [11] Li X Y, Gong J D, Wei X H. *In situ* rainwater harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China. *J. Arid Environ*, 2000, 46, 371—382.
- [12] Li F M, Wang J, Zhao S L. The Rainwater Harvesting Technology Approach For Dryland Agriculture in Semi Arid Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (2):152—157.
- [13] Li X Y, Gong J D, Li F R. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. *Agric. Water Manage.*, 2001, 50(3), 173—183.
- [14] Pacey A, Cullis A. Rainwater harvesting; the collection of rainfall and runoff in rural areas. IT publication, London, UK, 1986.
- [15] Wang X L, Li F M, Yu J, Shi W Q. Increasing potato yields with additional water and increased soil temperature. *Agric. Water Manage.*, 2005, 78:181—194.
- [16] Li F M, Wang J, Zhao S L. The rainwater harvesting technology approach for dryland agriculture in semi-arid loess plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2):152—157.
- [17] Duan X M, Wu P T, Bai X M, *et al.* Micro-ra in water Catchment and Planting Technique of Ridge Film Mulching and Furrow Seeding of Corn in Dryland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):143—146.
- [18] Hu X Y, Tao S X, Wang L X. Research on Ridge and Furrow Planting of Proso in Semi arid and Drought inclined Areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1):45—47.
- [19] Reij C, Mulder P, Begeman L. Water harvesting for plant production. World Bank Technical paper91. Washington: World Bank, 1988. 123.
- [20] Boers T. M, Zondervan K, Ben-Asher J. Micro-catchments water harvesting (*MCWH*) for arid zone development. *Agric. Water Manage.*, 1986a, 12: 21—39.
- [21] Boers T M, De-Groaf M, Feddes R A, *et al.* Linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones. *Agric. Water Manage.*, 1986b, 11: 187—206.
- [22] Boers T M, Ben-Asher J A. Review of rainwater harvesting. *Agric. Water Manage.*, 1982, 5: 145—158.
- [23] Ben-Asher J, Warrick A W. Effect of variations in soil properties and precipitation on microcatchment water balance. *Agric. Water Manage.*, 1987, 12(3): 177—194.
- [24] Li F R. Studies on Arid Agricultural Ecosystems, Shaanxi Sci. and Tec. Press, Xian, 1998.

参考文献:

- [1] 肖国举,王静. 黄土高原集雨农业研究进展. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003~1008.
- [4] 姚建民,殷海善. 降水资源有效化与旱地农业. *资源科学*, 1999, 21(4): 47~50.
- [5] 李小雁,龚家栋. 人工集雨面降雨径流观测实验研究. *水土保持学报*, 2001, 15 (1): 1~4.
- [12] 李凤民,王静,赵松岭. 半干旱黄土高原集雨高效旱地农业的发展. *生态学报*, 1999, 19 (2): 152~157.
- [17] 段喜明,吴普特,白秀梅,等. 旱地玉米垄膜沟种微集水种植技术研究. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 143~146.
- [18] 胡希远,陶士衍,王立祥. 半干旱偏旱区糜子沟垄径流栽培研究初报. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 45~47.
- [24] 李锋瑞. 干旱农业生态系统研究. 西安:陕西科学技术出版社,1998.