

网络出版日期:2018-05-09
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20180509.1604.020.html>

沟垄集雨种植和氮肥对春玉米生长及产量的影响

刘璐璐, 张雪玲, 郝洛延, 张宁宁, 韩娟, 廖允成

(西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要 沟垄集雨种植以其良好的集雨增产效果而被广泛应用,为探索沟垄集雨种植下合理的氮肥施用模式,以春玉米为研究对象,分别在沟垄集雨种植(P)和平作(C)下设置尿素基施(F1)、尿素基施+追施(F2)、缓释肥基施(F3)3种施肥模式,探明沟垄集雨种植和氮肥对春玉米生长及产量的影响。结果表明,沟垄集雨种植相较于平作能显著促进玉米生长和干物质积累,在3种施肥处理下沟垄集雨种植较平作增加玉米最大叶面积指数7.18%~11.39%、增加成熟期干物质积累量15.45%~20.23%。PF2、PF3处理可有效提高春玉米生育后期叶绿素含量和光合效率,PF2、PF3处理较PF1处理提高穗粒数2.35%、2.10%,百粒质量提高6.08%、7.37%,产量提高0.8%、2.09%。沟垄集雨种植技术下缓释肥基施能够有效降低施肥劳动强度,提高产量。

关键词 春玉米;沟垄集雨;氮肥施用;生长;产量

中图分类号 S513;S365 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2018)05-0675-10

沟垄集雨种植技术是一种地块内集水农业技术,主要利用田间起垄、沟垄相间、垄面产流、沟内高效集雨,达到集雨、蓄水保墒、增温、抑蒸的效果,已成为旱区农业主要节水措施之一^[1-2]。该技术在玉米、小麦、马铃薯等大宗粮食作物上得到了广泛应用^[3-5]。大量研究表明沟垄集雨种植较传统平作能够显著增加玉米产量,不同降雨量下沟垄集雨种植玉米产量提高了37%~75%^[6-7],不同沟垄比下沟垄集雨种植使春玉米增产10%~27%^[8]。

氮素是玉米生长发育的重要影响因素^[9]。氮肥缺失或过量均会导致春玉米光合能力下降^[10],进而影响植株干物质积累和玉米产量。目前在沟垄集雨种植春玉米生产中,氮肥运筹主要为基肥一次性施入和基肥加追肥^[11],然而一次性氮肥基施容易造成作物生长前期氮素的浪费,生长后期一定程度上的氮素亏缺,降低氮素利用效率,并带来一系列的环境问题,而基肥加追施模式虽然合理分配氮肥提高氮肥利用率,但却增加了施肥的劳动强度和成本。与普通氮肥相比,缓释氮肥肥效释放周期长,能为作物生长提供长效养分^[12],

从时间尺度上提高土壤氮素供应与作物需氮的吻合度^[13],同时具有省工、高产的优势^[14]。Zheng等^[15]研究了小麦—玉米轮作体系下施用缓释肥处理的效果;Si等^[16]认为控释氮肥可以提高或稳定夏玉米产量,减缓氮损失。诸多研究表明,缓释肥料可以显著提高作物的产量和氮肥利用率,但是有关沟垄集雨种植条件下施用缓释肥对春玉米生长和产量的影响还有待进一步研究。

因此,本试验基于沟垄集雨种植技术,以速效肥为对照,研究缓释肥对春玉米株高、干物质积累和转运、光合特性、产量等方面的影响,以明确沟垄集雨种植下省工稳产的氮肥施用模式,为完善沟垄集雨种植技术在旱区农业中的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于西北农林科技大学斗口小麦玉米综合试验示范站(108°52'E,34°36'N),该区属于温带半湿润大陆性季风气候,全年太阳总辐射量为494.70 kJ·cm⁻²,年均气温为12.9℃,年

均降水量 527 mm。2015 年玉米生育期降雨量和日平均气温如图 1。试验地土壤为土娄土, pH 8.0, 有机质 8.43 g · kg⁻¹, 全氮 0.85 g · kg⁻¹, 速效磷 16.42 mg · kg⁻¹, 速效钾 367.06 mg · kg⁻¹, 硝态氮 16.54 mg · kg⁻¹, 铵态氮 4.79 mg · kg⁻¹。

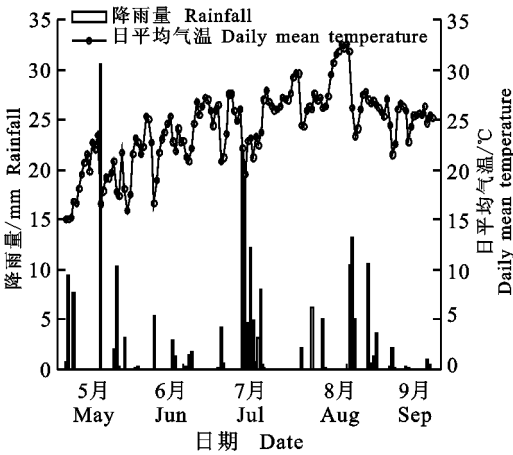


图 1 春玉米生育季内降雨量和日平均气温
Fig.1 Rainfall and daily mean temperature of spring maize in growing season

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 主区因素为种植方式: 传统平作(C)和沟垄集雨(P)两种处理, 其中沟垄集雨处理沟垄比为 1 : 1, 垄高 15 cm, 垄上覆膜, 膜厚 0.008 mm, 沟内种植 2 行玉米。副区因素为肥料处理: 尿素[w(N)=46%]全部基施(F1)、尿素[w(N)=46%]基施+追施(3 : 2; F2)、缓释肥[w(N)=28%、w(P)=6%、w(K)=6%]全部基施(F3), 缓释肥为由史丹利农业集团股份有限公司提供的“史丹利缓释肥料”。试验共计 6 个处理(表 1)。所有处理施肥量均为 N 225 kg · hm⁻²、P₂O₅ 150 kg · hm⁻² (过磷酸钙)、K₂O 10 kg · hm⁻² (氧化钾), 缓释肥处理不足的磷、钾肥量分别以过磷酸钙、氧化钾补足, 磷、钾肥均于播种前整地过程中全部施入(施深 15 cm)。

每个处理 3 次重复, 共计 18 个小区, 每个小区长 9 m, 宽 7 m, 面积 63 m²。供试玉米品种为‘郑单 958’, 种植行距 60 cm, 株距 25 cm, 人工点播(播深 5 cm)。试验玉米于 2015 年 4 月 18 日播种, 9 月 2 日收获, 玉米全生育期无灌溉, 其他田间管理参照当地一般生产水平。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 玉米株高、叶面积指数、干物质积累量
分别于玉米苗期、拔节期、吐丝期采集每个小区有

代表性植株 3 株测定玉米株高; 分别于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期采集每个小区有代表性植株 3 株测定叶面积指数(LAI=长×宽×0.75); 分别于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期、成熟期采集每个小区有代表性植株 3 株, 105 ℃ 杀青, 80 ℃ 烘干至恒质量, 测定植株干物质积累量。

表 1 试验处理
Table 1 Treatment

处理 Treatment	基施氮肥 N application at sowing stage	大喇叭口期追施氮肥 N application at big flare opening period of maize
CF1	225 kg · hm ⁻²	—
CF2	135 kg · hm ⁻²	90 kg · hm ⁻²
CF3	225 kg · hm ⁻²	—
PF1	225 kg · hm ⁻²	—
PF2	135 kg · hm ⁻²	90 kg · hm ⁻²
PF3	225 kg · hm ⁻²	—

1.3.2 玉米穗位叶光合参数 分别在玉米吐丝期和灌浆期内, 于晴朗天气 9:30—12:00, 选取每个小区有代表性的 3 棵植株, 采用 Li-6400 便携式光合仪测定玉米穗位叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s), 每个叶片重复测定 3 次取平均值。

1.3.3 玉米穗位叶相对叶绿素含量 分别于玉米吐丝期和灌浆期, 选取每个小区有代表性的 3 棵植株, 采用 SPAD 仪测定玉米穗位叶相对叶绿素含量(SPAD 值), 每个叶片重复测定 3 次取平均值。

1.3.4 产量及产量构成因素 成熟期各小区随机选取 2 行(边行除外)玉米收获测产、考种。

1.3.4 干物质转运计算公式 吐丝期营养器官干物质转运率(%)=(吐丝期营养器官干质量—成熟期营养器官干质量)/吐丝期营养器官干质量×100%

吐丝期干物质转运量对籽粒的贡献率(%)=(开花期营养器官干质量—成熟期营养器官干质量)/总粒质量×100%

吐丝后干物质输入籽粒量(t · hm⁻²)= 收获期籽粒产量(t · hm⁻²)—吐丝前营养器官同化物转运量(t · hm⁻²)

1.4 数据分析与处理

采用 SPSS 23 软件分析试验数据, LSD 法进行显著性及方差分析, 并用 SigmaPlot12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期春玉米株高变化

沟垄集雨种植较平作显著提高春玉米株高(图 2);拔节期,与平作相比,沟垄集雨种植下各施肥处理春玉米株高提高 10.22%~14.88%($P<0.05$);吐丝期,沟垄集雨种植下春玉米株高较平作增加 3.59%~7.89%($P<0.05$)。全生育期内,相同种植方式下,各施肥处理间株高无显著差异。

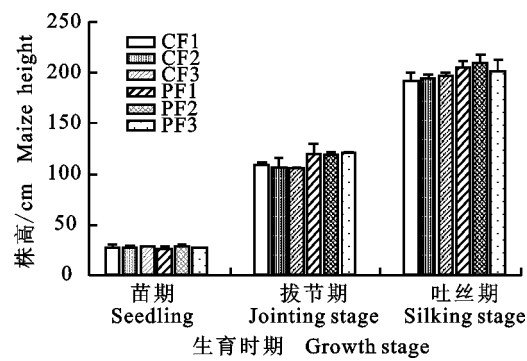


图 2 各处理下春玉米株高变化

Fig. 2 Plant height changes of spring maize under different treatments

2.2 不同生育时期春玉米 LAI 变化

各处理春玉米 LAI 先增加后降低,吐丝期达到最大值,沟垄集雨种植相较于平作处理显著增加春玉米 LAI 值(图 3)。吐丝期,沟垄集雨种植下春玉米 LAI 较平作增加 7.18%~11.39%,其中 PF2(4.39)LAI 最高,其次为 PF3(4.17),各施肥处理间差异不显著。灌浆期,与平作相比,沟垄集雨种植下春玉米 LAI 提高 6.31%~11.36%,其中平作下 LAI 表现为 CF3>CF2>CF1;沟垄集雨种植下 LAI 表现为 PF2>PF3>PF1,说明与尿素基施相比,追肥处理和缓释肥处理更有利于玉米叶片的建成与保持生育后期较高的绿叶面积。

2.3 春玉米干物质积累及转运特征

随玉米生育进程的推进,各处理下春玉米地上部干物质积累量逐渐递增(图 4)。春玉米生长前期,各处理间春玉米干物质积累量无显著差异。拔节期至成熟期,沟垄集雨种植相较于平作显著提高了玉米地上部干物质积累量。吐丝期,沟垄集雨种植下春玉米地上部干物质积累量较平作增加 13.95%~17.78%;成熟期,沟垄集雨种植下春玉米地上部干物质积累量较平作增加 15.45%~20.23%。相同种植方式下,各施肥处

理间干物质积累量在玉米苗期、拔节期呈现 $F1>F3>F2$ 的规律;大喇叭口期和吐丝期为 $F3>F1>F2$;吐丝期为 $F3>F2>F1$;在玉米灌浆期和成熟期为 $F2>F3>F1$ 。说明尿素基施处理 F1 有利于玉米生育前期的干物质积累,而追肥处理 F2 有利于玉米生育后期的干物质积累,缓释肥处理 F3 则在整个玉米生育季内的地上部干物质积累中均有优势。

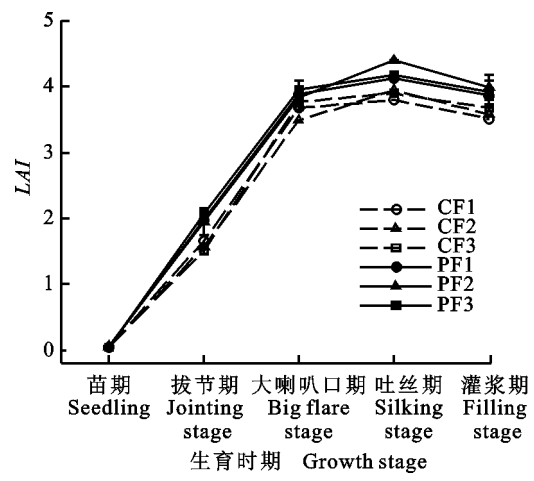


图 3 春玉米 LAI 变化

Fig. 3 LAI changes of spring maize

由表 2 可知,吐丝期营养器官干物质转运率为 13.01%~19.41%,种植方式和施肥处理间存在极显著交互效应。施肥处理 F1 的转运率在平作和沟垄集雨下均极显著高于 F2、F3,尿素基施处理具有更高的吐丝期营养器官干物质转运率。吐丝期干物质转运量对籽粒的贡献率为 12.10%~18.38%,在种植方式间无显著差异;施肥处理在沟垄集雨种植和平作下规律均为 $F1>F2/F3$,差异极显著($P<0.01$)。相比处理 F2 和 F3,处理 F1 吐丝期干物质转运量对籽粒的贡献率更高,而较高的花前干物质转运至籽粒量对玉米生长后期维持叶片生长及较高光合是不利的^[17]。吐丝后干物质积累量和吐丝后干物质输入籽粒量均表现出沟垄集雨极显著高于平作 9.06%~17.20% 和 15.03%~22.94% ($P<0.01$),其中吐丝后干物质输入籽粒量在施肥处理间差异显著:平作下,CF2、CF3 较 CF1 显著提高 12.93%、11.36%;沟垄集雨种植下 PF3 和 PF2 分别较 PF1 显著提高 5.08% 和 8.88%。吐丝后干物质同化量对籽粒的贡献率在沟垄集雨种植与平作间无显著差异,施肥处理 F2、F3 在平作和沟垄集雨种植下显著高于 F1 6.76%、6.18% 和

6.54%、7.26%。可见 F2 和 F3 处理相比较 F1 更有利于吐丝后的干物质积累和转运。

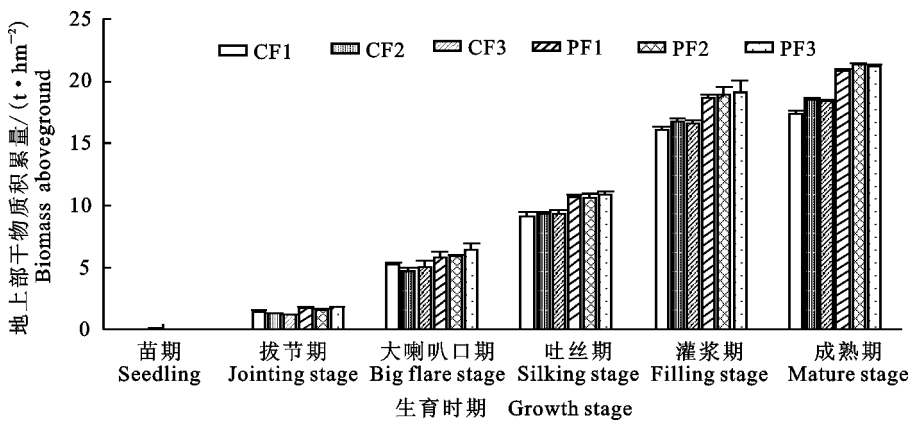


图 4 春玉米地上部干物质积累量动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of dry matter accumulation aboveground of spring maize

表 2 春玉米吐丝期前后地上部干物质转运量和籽粒贡献率

Table 2 Dry matter accumulation and grain contribution of grain before and after silking stage in spring maize						
处理 Treatment	吐丝期营养器官 干物质积累量/(t·hm ⁻²) Accumulated dry matter in vegetative organ at silking stage	吐丝期营养器官 干物质转运率/% Transport rate of dry matter in vegetative organ at silking stage	吐丝期干物质转运量 对籽粒的贡献率/% Contribution of dry matter translocation amount to kernel at silking stage	吐丝后干物质 积累量/ (t·hm ⁻²) Accumulated dry matter after silking stage	吐丝后干物质 输入籽粒量/ (t·hm ⁻²) Transferring amount of dry matter after silking stage	吐丝后干物质 同化量对籽粒 的贡献率/% Contribution of dry matter assimilated to kernel after silking stage
CF1	9.11±0.34 c	14.90±0.60 b	15.91±0.59 b	8.21±0.15 e	8.03±0.12 f	81.81±0.02 cd
CF2	9.30±0.17 c	13.01±0.16 c	12.96±0.53 c	9.19±0.16 cd	9.07±0.10 de	87.33±0.59 a
CF3	9.35±0.28 bc	13.30±0.76 c	13.42±0.14 c	9.02±0.12 cd	8.95±0.09 e	86.86±1.50 ab
PF1	10.74±0.09 a	19.41±0.01 a	18.38±0.01 a	10.10±0.25 ab	9.41±0.01 c	81.07±0.27 d
PF2	10.60±0.36 a	13.67±0.02 c	13.33±0.02 c	10.76±0.36 a	9.89±0.02 b	86.37±0.90 ab
PF3	10.84±0.25 a	13.02±0.09 c	12.10±0.27 c	10.38±0.17 a	10.25±0.05 a	86.96±0.86 ab

注:数据为“平均值±标准差”,同列内不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著,表 3 同。
Note:Data was “mean±standard error”,different letters above the same column indicate significant difference($P<0.05$) among different treatments,the same as table 3.

2.4 春玉米 P_n 、SPAD 值、 G_s 和 T_r 变化

对玉米 P_n 分析可知(图 5-A):吐丝期沟垄集雨种植下的净光合速率显著高于平作处理5.88%~10.46%;施肥处理间规律为 F3>F2>F1,且以 PF3 和 PF2 处理 P_n 27.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 26.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 最高,显著高于其他各处理($P<0.05$)。灌浆期各处理的 P_n 在沟垄集雨种植下高于平作处理 16.09%~27.74% ($P<0.01$);在施肥处理间则为 F2>F3>F1,其中平作下 CF2 P_n 高于 CF3,沟垄集雨种植下 PF3 P_n 与 PF2 无显著差异,可见沟垄集雨种植可以缩小玉米生育后期缓释肥基施与追肥处理间的光合差异。

与吐丝期相比,灌浆期沟垄集雨种植下各处理玉米 P_n 的降低缓于平作处理,说明沟垄集雨种植更有利于维持玉米生育后期较高的光水平。平作下,缓释肥处理 CF3 的 P_n 降低程度与

CF1 相近;沟垄集雨种植下,缓释肥处理 PF3 P_n 降低程度则显著小于 PF1,与 CF2 降低幅度接近,可见沟垄集雨种植较平作更有利于缓释肥后期养分供应,以保证植株较高的光合水平。

玉米叶片 SPAD 值在种植方式和施肥方式间的变化规律与 P_n 相似(图 5-B)。吐丝期 SPAD 值以 PF3 处理 55.47 最高,高于其他各处理 3.5%~8.6%。与吐丝期相比,灌浆期沟垄集雨种植下 SPAD 值较平作降低程度小,且处理 PF2 和 PF3 相较于其他各处理始终保持着相对较高的 SPAD 值。

叶片 G_s 在吐丝期以 PF3 处理 0.163 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 最高;灌浆期以 PF2 处理 0.126 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 最高(图 5-C 和 5-D)。沟垄集雨种植在吐丝期和灌浆期分别比平作极显著提高叶片 G_s 19.64%和 20.68% ($P<0.01$)。施肥处

理 F2、F3 在吐丝期和灌浆期分别比 F1 显著提高叶片 G_s 5.04%、5.04% 和 12.87%、8.91% ($P<0.05$)。 T_r 在吐丝期和灌浆期均以 PF2 处理最高,分别为 5.6、3.8 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在吐丝期和灌浆期沟垄集雨种植分别比平作极显著提高

T_r 18.70% 和 12.86% ($P<0.01$)。施肥处理 F2、F3 在吐丝期和灌浆期分别比 F1 显著提高 T_r 5.30%、3.56% 和 11.65%、7.05% ($P<0.05$)。施肥处理 F2 和 F3 较 F1 提高了玉米吐丝期和灌浆期的叶片 G_s 和 T_r 。

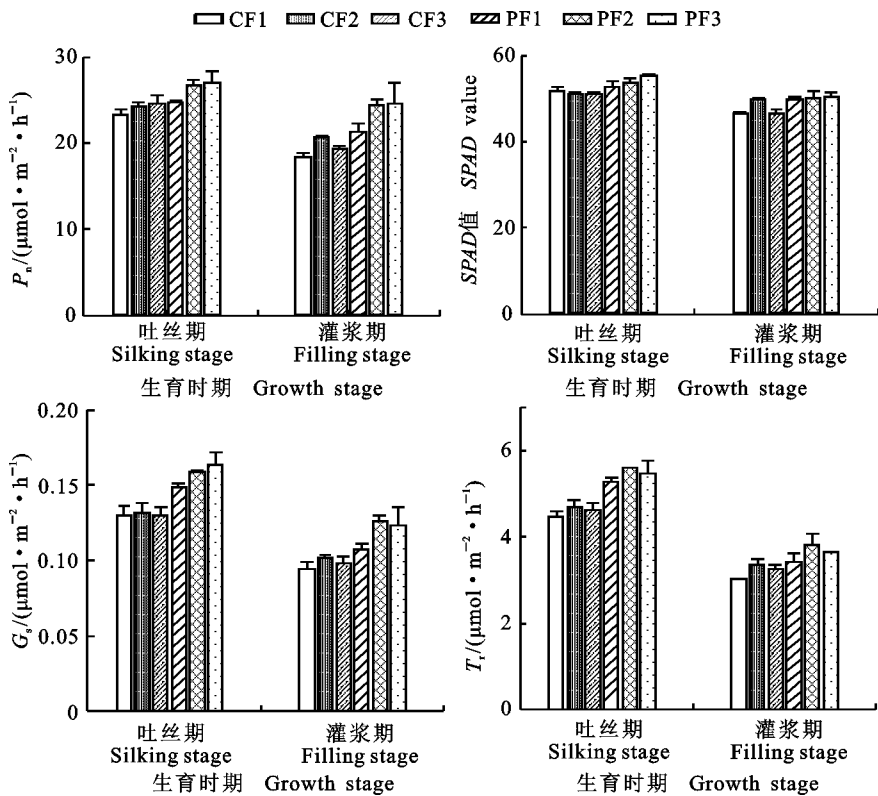


图 5 各处理下春玉米 P_n 、SPAD 值、 G_s 和 T_r

Fig. 5 P_n 、SPAD、 G_s and T_r of spring maize under different treatments

2.5 春玉米产量及产量构成要素

由表 3 可知,各处理间春玉米穗粒数无显著差异。与平作相比,沟垄集雨种植下 F1、F2、F3 处理春玉米百粒质量提高 9.51%、44.96%、12.34%,产量提高 7.43%、8.36%、10.89%。平作下施肥处理 F2、F3 相比对照 F1 提高百粒质量 3.76%、4.67%,但产量间无显著差异。沟垄集雨种植下施肥处理 F2、F3 相比对照 F1 显著提高百粒质量 6.08%、7.37%;产量增加了 0.80%、2.09%。

3 讨论

3.1 沟垄集雨种植和氮肥对春玉米生长的影响

良好的植株生长状况是干物质积累与合理分配的保障。多项研究表明,沟垄集雨种植有利于植株生长和干物质积累^[18]。植物营养生长的良好与否直接反映在株高上,同时一定范围内,作物

表 3 各处理下春玉米产量及产量构成要素

Table 3 Maize yield and yield components

处理 Treatment	穗粒数 Kernels per spike	百粒质量/g 100 kernel mass	实际产量/ (t·hm ⁻²) Yield
CF1	593±22 a	25.3±0.6 b	11.17±0.40 bc
CF2	594±29 a	26.2±0.3 b	11.16±0.25 bc
CF3	571±2 a	26.5±0.7 b	11.05±0.41 bc
PF1	604±4 a	27.7±1.1 ab	12.00±0.31 ab
PF2	619±5 a	29.4±0.6 a	12.10±0.12 ab
PF3	617±1 a	29.7±0.9 a	12.25±0.09 a

的产量随 LAI 的增大而提高^[19]。任小龙等^[20]研究表明相同施肥模式下沟垄集雨种植可以显著提高玉米株高 6.8%~27.1%,增加玉米叶面积 8.5%~73.9%,玉米干物质积累增加 12.1%~86.6%。李宗新等^[21]对玉米进行生长模拟发现控释肥处理下玉米干物质积累速率增长维持时间长。缓释肥处理下玉米花后 10~50 d 叶面积指

数高于尿素处理,缓释肥处理显著提高玉米生育后期植株 P_n [22]。大喇叭口期追肥有利于后期光合产物的形成和积累 [23]。付永强等 [24] 研究表明尿素基施后期生长脱靶,玉米干物质积累量低,尿素追施处理对吐丝后干物质积累增加显著,包膜尿素基施相比普通尿素处理增加吐丝前、后玉米干物质积累,显著提高玉米成熟期干物质积累量 5.85%。本试验结果表明沟垄集雨种植下玉米株高、 LAI 、干物质积累量较平作增加了 3.59%~9.38%、5.41%~11.39%、15.45%~20.23%,尿素追施处理有利于玉米生育后期的干物质积累,而缓释肥基施有利于整个玉米生育季内的地上部干物质积累。这是因为沟垄集雨处理对土壤水温环境的改善能够促进玉米生长,追肥与缓释肥基施满足玉米生育后期的氮素需求,有利于玉米干物质积累。

玉米抽雄后干物质生产和转运决定了籽粒干物质的 75%~90% [25],本试验研究结果表明玉米籽粒干质量的 81%~87% 由吐丝后转运而来,由此可见吐丝后玉米所积累的干物质转运至籽粒的量决定了玉米产量的高低。刘胜尧等 [25] 研究表明沟垄集雨种植增大了玉米籽粒库容,干物质转运量大,灌浆期籽粒干物质积累速率高出对照 17.84%。控释肥处理有利于花后干物质积累且营养器官干物质向籽粒中的转移量大,对籽粒的贡献率比较高 [26]。本试验研究表明沟垄集雨种植吐丝后干物质积累量和输入籽粒量均高于平作。追肥处理和缓释肥处理吐丝期干物质转运率显著低于尿素基施,为玉米生育后期的干物质积累转运提供了有利条件。沟垄集雨种植较平作有利于春玉米地上部干物质的转运,在沟垄集雨下吐丝后缓释肥处理和追肥处理较高的干物质积累量和输入籽粒量,是其产量增加的前提。

3.2 沟垄集雨种植和氮肥对春玉米光合的影响

光合作用产物决定玉米干物质积累量的 90%~95% [27],可见光合作用对玉米生产的重要性。张玉等 [28] 研究结果显示沟垄集雨处理较平作显著增加小麦各生育时期的 $SPAD$ (42%~64%) 和光合速率 (22%~67%); 苏旺等 [29] 研究表明糜子各生育时期的 P_n 和 G_s 在沟垄集雨种植下均显著提高; 李尚中等 [30] 研究表明垄盖膜际种植较平作提高了玉米功能叶光能转化效率; 任小龙等 [20]、韩娟等 [31] 在模拟降雨下研究发现沟垄集雨种植显著增加玉米 P_n 、 G_s 和 $SPAD$; 李永平

等 [32] 研究表明沟垄集雨种植方式下玉米 P_n 、 T_r 和 $SPAD$ 较平作增加 10%、16% 和 17%。氮肥施用会显著改善光系统间协调性 [33-34]。控释尿素相比常规尿素有利于玉米生长后期叶片光合能力表现在增加叶片 G_s , 提高叶片 $SPAD$ 等 [33]; 赵斌等 [26] 研究发现控释肥处理花后的光合速率始终较高; 刘朝巍等 [35] 研究不同施氮方式对玉米光合特性的影响发现在开花期和灌浆期追肥处理和缓释肥处理的 G_s 、 T_r 及 P_n 较高。本研究结果显示玉米吐丝期和灌浆期,沟垄集雨种植下各处理穗位叶的 $SPAD$ 值、 G_s 及光合强度均高于平作下各处理,尿素基施的 P_n 均低于同等种植条件下的追肥处理与缓释肥处理,与前人研究结果一致。水肥条件是影响光合作用的重要因素 [36-37], 玉米生育后期根系吸收氮素受限,植株衰老加快 [38], 沟垄集雨种植良好的水分供应为玉米光合创造有利条件,沟垄集雨种植下缓释肥和尿素追施处理于玉米生育后期较好的氮肥供应有效地抑制植株衰老过程,为玉米保持较高光合的能力提供保障。

黄智鸿等 [39] 对高产玉米品种的研究发现玉米籽粒产量主要源于玉米后期光合产物的积累,玉米生育后期较高的 LAI 和 $SPAD$ 是玉米高光和功能的象征,沟垄集雨种植和追肥、缓释肥处理结合改善田间水肥条件,可以维持玉米后期较高的 $SPAD$ 、 G_s 和 T_r ,从而提高了玉米生育后期的光合能力。

3.3 沟垄集雨种植和氮肥对春玉米产量的影响

作物产量在一定程度上与植株 LAI 呈正相关 [19], 并与各生育时期的 P_n 呈极显著相关 [40], 玉米籽粒形成更与其合理的干物质转运特征密不可分。本试验结果表明沟垄集雨种植下玉米株高、 LAI 、 P_n 及干物质积累量均显著高于平作,百粒质量及产量分别较平作提高了 9.51%~12.34%、7.43%~10.89%; 尿素追施及缓释肥基施相较于尿素基施更有利于玉米保持较高的光合水平和较高的干物质积累及转运量,为玉米籽粒形成奠定了物质基础,相较于尿素基施提高了玉米百粒质量。李宗新等 [21] 研究表明施用控释肥显著提高夏玉米穗粒数和千粒质量达 3.6% 和 8.4%, 比尿素基施增产 4.3%, 沟垄集雨种植通过增加玉米穗粒数和千粒质量而增加产量 [41], 与本研究结果一致。沟垄集雨种植下尿素追施或缓释肥基施保持了春玉米较高的光合水平,是作物稳产的生理保障。

4 结 论

沟垄集雨种植下氮肥追施或缓释肥基施结合,能够有效抑制玉米生育后期植株衰老进程,保证玉米籽粒形成期较高的光合水平,促进玉米植株干物质积累并合理协调库源平衡,构建良好的干物质转运特征,取得较尿素基施更好的产量效果。基于缓释肥减少劳力、稳定产量的优势,缓释肥基施的肥料管理模式在沟垄集雨种植下值得推广应用。

参考文献 Reference:

- [1] GAN Y, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, *et al.* Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429-476.
- [2] 吴 伟, 廖允成. 中国旱区沟垄集雨栽培技术研究进展及展望[J]. 西北农业学报, 2014, 23(2): 1-9.
WU W, LIAO Y CH. The research progress and prospects of ridge and furrow rainwater harvesting system in arid regions of China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(2): 1-9.
- [3] 李 荣, 侯贤清, 王晓敏, 等. 北方旱作区沟垄二元覆盖技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1314-1322.
LI R, HOU X Q, WANG X M, *et al.* Research progress on the dual-mulching of ridge and furrow technology in dry faeming regions of northern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1314-1322.
- [4] NIU J Y, GAN Y T, HUANG G B. Dynamics of root growth in spring wheat mulched with plastic film[J]. *Crop Science*, 2004, 44(5): 1682-1688.
- [5] WANG Q, ZHANG E, LI F, *et al.* Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas[J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(10): 1431-1443.
- [6] REN X, JIA Z, CHEN X. Rainfall concentration for increasing corn production under semiarid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(12): 1293-1302.
- [7] 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.
REN X L, JIA ZH K, CHEN X L, *et al.* Effects of ridge and furrow planting for rainfall harvesting on photosynthetic characteristics and yield in corn in semi-arid regions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 838-845.
- [8] 刘 志, 肖继兵, 崔丽华. 垄膜沟种不同沟垄比对春玉米水分利用和产量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 38-43.
- LIU ZH, XIAO J B, CUI L H. Effects of different ratios of furrow to ridge under ridge film mulching and furrow seeding on water use and yield of spring corn[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 38-43.
- [9] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [10] 王 帅, 杨劲峰, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(6): 23-27.
WANG SH, YANG J F, HAN X R, *et al.* Effects of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize [J]. *Soil and Fertilizer Science*, 2008(6): 23-27.
- [11] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861-868.
ZHAN X M, LI T T, HAN X R, *et al.* Effects of nitrogen fertilization methods on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 861-868.
- [12] MA F L, SONG F P, GAO Y, *et al.* Effects of sulfur and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 67.
- [13] 周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 等. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2129-2140.
ZHOU B Y, SUN X F, DING Z S, *et al.* Effects of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2129-2140.
- [14] 史桂芳, 董 浩, 衣文平, 等. 不同用量长效控释肥对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(7): 95-98.
SHI G F, DONG H, YI W P, *et al.* Effect of different application of long-term controlled-release fertilizer on growth, development and yield of summer maize[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(7): 95-98.
- [15] ZHENG W, LIU Z, ZHANG M, *et al.* Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system [J]. *Field Crops Research*, 2017 (205): 106-115.
- [16] SI D X, CUI Z L, CHEN X P, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer application on dry matter accumulation and nitrogen balance of summer maize[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1745.
- [17] 阎翠萍, 张 虎, 王建军, 等. 沟谷地春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 67-71.
YAN C P, ZHANG H, WANG J J, *et al.* Study on law of

- biomass accumulation, distribution and transference of spring corn in the gully region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(1): 67-71.
- [18] 李玉玲,张 鹏,张 艳,等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084-1096.
- LI Y L, ZHANG P, ZHANG Y, *et al.* Effects of rainfall harvesting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature, and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in semi-arid areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1084-1096.
- [19] 王 勇,高育锋. 旱地秋覆膜玉米干物质积累、分配与转移的特性研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(1): 76-78.
- WANG Y, GAO Y F. Study on the characteristics of dry matter accumulation, distribution and transfer in dry land autumn covering Spring maize[J]. *Journal of Maize Science*, 2004, 12(1): 76-78.
- [20] 任小龙,贾志宽,陈小莉,等. 模拟不同雨量下沟垄集雨种植对春玉米生产力的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1006-1015.
- REN X L, JIA ZH K, CHEN X L, *et al.* Effects of rainwater-harvested furrow/ridge system on spring corn productivity under different simulated rainfalls[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1006-1015.
- [21] 李宗新,王庆成,刘 霞,等. 控释肥对夏玉米的应用效应研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 89-92.
- LI Z X, WANG Q CH, LIU X, *et al.* Studies of applying effect of controlled-release fertilizer on summer maize [J]. *Journal of Maize Science*, 2007, 15(6): 89-92.
- [22] SHAO G L, LI Z, NING T, *et al.* Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and grain yield of maize to controlled-release urea and irrigation after anthesis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(4): 595-602.
- [23] 丁民伟,崔彦宏,刘梦星,等. 氮肥用量与施用时期及分配比例对夏玉米干物质积累的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(6): 1-4.
- DING M W, CUI Y H, LIU M X, *et al.* Effect of N application rate, time and ratio on dry matter accumulation of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2007, 30(6): 1-4.
- [24] 付永强,豆 攀,郭 萍,等. 尿素种类与施肥方式对川中丘陵区春玉米产量及氮素利用的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 115-119.
- FU Y Q, DOU P, GUO P, *et al.* Effects of urea types and fertilization methods on yield and nitrogen utilization in Spring maize in the hilly area of Sichuan [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 115-119.
- [25] 刘胜尧,范凤翠,李家曦,等. 华北旱地春玉米不同水分管理下干物质和氮生产与分配特征[J]. 华北农学报, 2015, 30(5): 214-222.
- LIU SH Y, FAN F C, LI J X, *et al.* Dry matter and nitrogen production and allocation of spring maize on dryland of north China in different farmland water management patterns [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(5): 214-222.
- [26] 赵 斌,董树亭,张吉旺,等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1760-1768.
- ZHAO B, DONG SH T, ZHANG J W, *et al.* Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(10): 1760-1768.
- [27] 陈传永,赵 明,董志强,等. 多雨年寒地覆膜对玉米干物质积累与分配及产量的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(1): 88-91.
- CHEN CH Y, ZHAO M, DONG ZH Q, *et al.* The influence of polythene mulch on dry matter accumulation and yield of maize in cold region in rainy year [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(1): 88-91.
- [28] 张 玉,丁瑞霞,韩清芳,等. 沟垄集雨种植补灌对冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 146-152.
- ZHANG Y, DING R X, HAN Q F, *et al.* Effects of ridge and furrow rain harvesting with supplemental irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in winter wheat flag leaf[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 146-152.
- [29] 苏 旺,屈 洋,冯佰利,等. 沟垄覆膜集水模式提高糜子光合作用和产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 137-145.
- SU W, QU Y, FENG B L, *et al.* Photosynthesis characteristics and yield of broomcorn millet under film mulching on ridge-furrow for harvesting rainwater model in semi-arid region of Northern Shaanxi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 137-145.
- [30] 李尚中,樊廷录,王 勇,等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 458-466.
- LI SH ZH, FAN T L, WANG Y, *et al.* Effects of plastic film mulching and rain harvesting modes on chlorophyll fluorescence characteristics, yield and water use efficiency of dryland maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 458-466.
- [31] 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.
- HAN J, JIA ZH K, REN X L, *et al.* Effect of water micro-

- collecting planting on corn (*Zea mays* L.) photosynthesis rate and water use efficiency under simulated rainfall conditions [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 81-85.
- [32] 李永平, 杨改河, 冯永忠, 等. 黄土高原土壤风蚀区玉米起垄覆盖集水效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 59-65.
- LI Y P, YANG G H, FENG Y ZH, *et al.* Catchment effect of ridging and mulching in maize field in soil wind erosion area of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(4): 59-65.
- [33] 郑 宾, 赵 伟, 徐 铮, 等. 不同耕作方式与氮肥类型对夏玉米光合性能的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 925-934.
- ZHENG B, ZHAO W, XU ZH, *et al.* Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer types on photosynthetic performance of summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 925-934.
- [34] 王 帅, 韩晓日, 战秀梅, 等. 氮肥水平对玉米灌浆期穗位叶光合功能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(2): 280-289.
- WANG SH, HAN X R, ZHAN X M, *et al.* Effect of nitrogenous fertilizer levels on photosynthetic functions of maize ear leaves at grain filling stage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014(2): 280-289.
- [35] 刘朝巍, 张恩和, 谢瑞芝, 等. 不同施氮方式对宽窄行交替休闲种植玉米产量和光合特性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(1): 34-42.
- LIU CH W, ZHANG E H, XIE R ZH, *et al.* Effect of different nitrogen supply methods on yield and photosynthesis of maize under the alternative fallow high stubble about narrow row and wide row [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(1): 34-42.
- [36] 张秋英, 刘晓冰, 金 剑, 等. 水肥耦合对玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2001, 9(2): 64-67.
- ZHANG Q Y, LIU X B, JIN J, *et al.* Effect of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristic and yield in corn [J]. *Journal of Maize Science*, 2001, 9(2): 64-67.
- [37] 綦 伟, 谭 浩, 翟 衡. 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 835-838.
- QI W, TAN H, ZHAI H. Photosynthetic characters and fluorescence parameters of different grape stocks under water stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 835-838.
- [38] MENG Q, CHEN X, ZHANG F, *et al.* In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(3): 294-303.
- [39] 黄智鸿, 王思远, 包 岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 95-98.
- HUANG ZH H, WANG S Y, BAO Y, *et al.* Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(3): 95-98.
- [40] 张丽娟, 杨升辉, 杨恒山, 等. 高产栽培下氮肥运筹对春玉米光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2598-2601.
- ZHANG L J, YANG SH H, YANG H SH, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application schemes on spring maize (*Zea mays* L.) photosynthetic characteristics under hyper-yield cultivation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(5): 2598-2601.
- [41] 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.
- REN X L, JIA ZH K, HAN Q F, *et al.* Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zea mays* L.) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(10): 45-50.

Effects of Ridge-Furrow with Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on Growth and Yield of Spring Maize

LIU Lulu, ZHANG Xueling, XI Luoyan, ZHANG Ningning,

HAN Juan and LIAO Yuncheng

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract Planting of ridge-furrow rainwater harvesting can effectively increase yield. In order to explore the proper planting modes of nitrogen fertilizer application under the ridge-furrow rainwater harvesting condition, spring maize was used as the research object, three kinds of fertilization modes: single urea-basal application (F1), urea-basal application + topdressing (F2) and single slow-release fertilizer basal application (F3) were respectively set under ridge-furrow with plastic film mulching (P) and flat planting (C) to ascertain the effect of maize growth and yield. The results showed that furrow-ridge rainwater harvesting could significantly promote the growth and biomass accumulation of maize. Under the three kinds of fertilization treatments, the furrow-ridge rainwater harvesting treatment was more suitable than flat planting in increasing maximum LAI by 7.18%–11.39%, increasing the accumulation of dry matter during maturity 15.45%–20.23%. PF2 and PF3 could effectively increase the chlorophyll content and photosynthetic efficiency at late stage of spring maize fertility. Compared with PF1, PF2 and PF3 increased the kernels per spike by 2.35% and 2.10%, the hundred kernel weight by 6.08% and 7.37%, and the grain yield by 0.8% and 2.09%. Under planting of the ridge-furrow rainwater harvesting, the slow-release fertilizer basal application can effectively reduce the labor intensity of fertilization and increase the yield.

Key words Spring maize; Ridge-furrow with plastic film mulching; Nitrogen fertilizer application; Growth; Yield

Received 2018-01-04

Returned 2018-03-01

Foundation item the National Natural Science Foundation of China (No. 31401349); National Science and Technology Support Program of China (No. 2015BAD22B03).

First author LIU Lulu, female, master student. Research area: efficient farming system and crop cultivation in arid areas. E-mail: liululu_lola@163.com

Corresponding author HAN Juan, female, associate professor, master supervisor. Research area: efficient use of water and fertilizer in arid areas, crop yield simulation. E-mail: hjepost@nwsuaf.edu.cn

LIAO Yuncheng, male, professor, doctoral supervisor. Research area: efficient farming system, crop cultivation and physiology. E-mail: yunchengliao@163.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)