

秸秆覆盖对沟灌夏玉米根系分布及产量影响

张寅¹, 鄂继芳², 孙明海¹

(1.河套学院, 内蒙古 巴彦淖尔 015000; 2.呼伦贝尔市地产管理所, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:【目的】探究夏玉米根系分布、水分利用效率及产量对沟灌种植下不同秸秆覆盖方式的动态响应。【方法】在河套灌区开展不同耕作模式的小区试验, 试验设常规垄覆膜沟灌(FM)、垄覆秸秆沟灌(FLJ)、沟覆秸秆沟灌(FGJ)、垄沟覆秸秆沟灌(FLGJ)4个处理。研究了夏玉米各土层的根长密度、作物耗水量、产量及其相关指标, 【结果】沟灌种植模式下不同秸秆覆盖方式显著($P<0.05$)影响夏玉米根系分布、产量和水分利用效率, 通过沟覆秸秆沟灌可改善夏玉米根系分布, 提高水分利用效率, 达到高产。沟覆秸秆促进了垄上大于40 cm土层根系发育, 根长密度较FM处理增加128.1%, 显著提高沟里大于20 cm土层根长密度, 促进对深层土壤水分养分吸收利用, 提高产量。与FM处理相比, FGJ和FLGJ处理的水分利用效率显著提高了51.9%和54.3%, 增产9.3%和9.0%, 但FGJ处理的收获指数显著高于其他处理($P<0.05$), 为0.48。【结论】沟灌种植模式下沟覆秸秆FGJ处理改善深层根系分布效果较好, 显著提高夏玉米水分利用效率及产量。

关键词: 沟灌; 秸秆; 根系; 产量; 夏玉米

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020423

OSID:



张寅, 鄂继芳, 孙明海. 秸秆覆盖对沟灌夏玉米根系分布及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 16-21.

ZHANG Yin, E Jifang, SUN Minghai. The Effect of Straw Mulching Coupled with Furrow Irrigation on Root Distribution and Yield of Summer Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 16-21.

0 引言

【研究意义】引黄水量锐减、水肥利用效率低等问题正在严重制约河套灌区农业的发展, 节水灌溉、提高水肥效率及作物产量是灌区面临的主要问题^[1]。适宜的耕作模式可提高土壤含水率和水分利用效率, 为作物生长创造和谐生长环境^[2], 秸秆覆盖改善土壤团聚体, 增大土壤通透性^[3], 提高土壤养分供应强度^[4], 减少土壤水分无效蒸发, 提高耕层含水率, 并能够改良根区环境^[5-6]。且秸秆覆盖可提高土壤有机质等养分量和微生物活性, 而普通地膜覆盖虽能提高土壤含水率, 但降低了土壤有机质量^[7]。因此, 改变耕作方式对水分利用效率及作物产量的提高具有重要意义。【研究进展】沟灌作为传统的地面灌溉方式, 在农业生产中应用广泛, 随着节水灌溉技术的不断发展, 沟灌也重新被重视。相关研究指出宽垄沟灌灌水效率显著高于常规沟灌, 与传统畦灌相比, 宽垄沟灌可显著提高水分利用效率^[8], 增产显著^[9-10]; 交替隔沟灌溉增大作物根系下扎深度, 较常规沟灌提高水分利用效率5%以上^[11-13], 覆膜沟灌有效促进作物生长并提高经济效益^[14]; 汪顺生等^[15]指出适量秸秆覆盖的沟灌有效增强雨水下渗, 蓄纳较

多雨水。根是作物吸收养分水分关键营养器官^[16], 根系生长发育受土壤体积质量、含水率等多重因素影响^[17], 改善根系分布与结构是作物提效增产的关键。

【切入点】针对秸秆覆盖技术目前已研究较多, 主要集中在不同覆盖的方式、不同水分处理及不同材料^[18-19]间的比较分析, 耕作模式为常规畦灌, 而关于沟灌结合不同秸秆覆盖的耕作模式对夏玉米根系分布、水分利用效率及产量的影响鲜见报道。【拟解决的关键问题】基于此, 在河套灌区临河区气象试验站开展小区试验, 探究宽垄种植下不同秸秆覆盖处理对夏玉米根系分布、水分利用效率的影响, 旨在为秸秆覆盖技术在沟灌种植上的应用及提高河套灌区作物水分利用效率提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2018年5—10月在内蒙古巴彦淖尔市临河区农业气象试验站开展。地理位置为40°42'N、107°24'E, 海拔1040~1043 m, 属于典型的温带干旱大陆性季风气候, 冬季寒冷而漫长, 夏季炎热而短促, 多年平均气温7.1℃, 年平均降雨量为141 mm, 年平均蒸发量为2430 mm, 年均日照时间为3223.7 h, 无霜期为140 d左右。试验区根层土壤类型以壤土为主, 土壤体积质量为1.48 g/cm³。研究期间夏玉米生育期内试验区日降雨量和日平均温度变化如图1所示。

收稿日期: 2020-07-28

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZC17388); 河套学院科学研究项目(HYZQ201719)

作者简介: 张寅(1987-), 女, 讲师, 硕士研究生, 主要从事农业水利与节水灌溉的研究。E-mail: zhang_yin1987@163.com

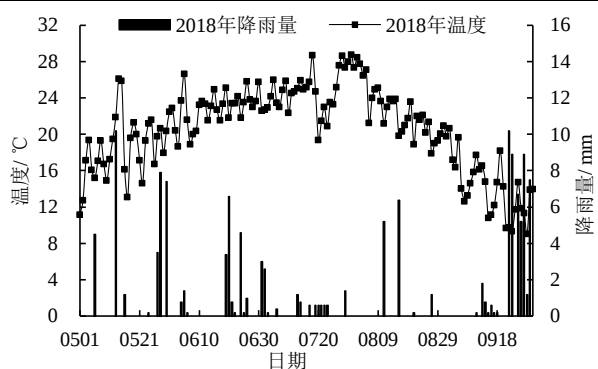


图1 夏玉米生育期温度及日降雨量

Fig.1 Daily rainfall and temperature during growing period of summer maize

1.2 试验设计

试验设常规垄覆膜沟灌 (FM)、垄覆秸秆沟灌 (FLJ)、沟覆秸秆沟灌 (FGJ)、垄沟覆秸秆沟灌 (FLGJ) 4 种处理, 3 个重复, 共 12 个小区, 试验小区的面积为 $4\text{ m} \times 6\text{ m}$, 采用混凝土浇筑的地下挡水板隔开, 防止相邻小区水肥影响, 小区外围种植玉米保护行, 田间管理与当地农户管理一致。各处理采用统一施肥水平 (施氮量 225 kg/hm^2 (以 N 计)、施磷量 150 kg/hm^2 (以 P_2O_5 计)、施钾肥 50 kg/hm^2 (以 KCl 计)), 磷肥和钾肥与 50% 氮肥在播种时

作为基肥施入, 剩余氮肥分别在第 1 次灌水和第 2 次灌水前平分施入; 各处理在夏玉米生育期灌溉 4 次水, 单次灌水定额为 70 mm , 采用渠水灌溉, 渠水矿化度为 0.628 g/L , 沟断面如图 2 所示。各处理覆膜的厚度均为 0.01 mm , 宽幅 80 cm , 秸秆覆盖厚度 5 cm , 覆盖量为 1.5 kg/m^2 , 供试材料采用当地玉米西蒙 6 号, 5 月 1 日播种, 9 月 30 日收获, 机械播种, 人工起沟, 人工分别在垄上和沟里铺设厚秸秆, 株距 0.3 m , 行距 0.40 m , 东西走向种植。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 考种测产

在收获期, 对夏玉米进行考种。每个小区随机取 5 株夏玉米, 测量夏玉米穗长、穗粗等指标; 随机选取 100 粒籽粒, 3 个重复, 称质量取平均值, 计算夏玉米百粒质量; 夏玉米籽粒干燥后称总质量并计算单位面积产量。

夏玉米收获指数^[20-21] (Harvest Index, HI) 指收获期夏玉米穗部籽粒质量与地上干物质质量之比, 计算式为:

$$HI = M_z / M_d, \quad (1)$$

式中: M_z 为夏玉米穗部籽粒质量 (g/株); M_d 为夏玉米地上干物质质量 (g/株)。

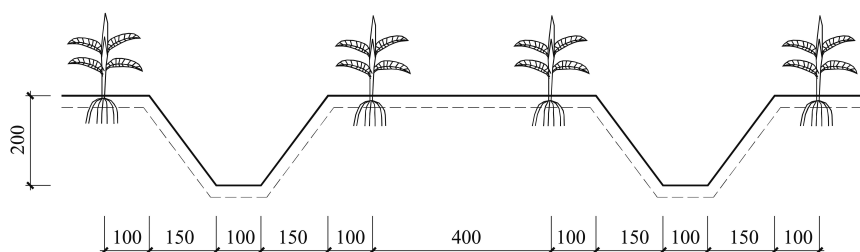


图2 沟断面示意图 (单位:mm)

Fig.2 The diagram of ditch section (unit:mm)

1.3.2 水分利用效率

作物耗水量 (ET) 计算式为:

$$ET = P + I + W_g - D - R - \Delta W, \quad (2)$$

式中: ET 为作物耗水量 (mm); P 为生育期降雨量 (mm); I 为灌溉量 (mm); W_g 为地下水补给量 (mm); D 和 R 分别是渗漏水量和地表径流, 夏玉米生育期的地下水埋深较浅, 约为 $0.8 \sim 1.8\text{ m}$, 地下水补给量远大于渗漏量, 且灌水定额较小, 因此渗漏量可忽略; 试验区地面平坦, 无地表径流, R 可忽略; ΔW 为试验初期到末期土壤储水量的变化量 (mm)。

地下水补给量: 在每个试验小区埋设 3 组 3 根负压计 (埋设深度分别为 80 、 60 、 40 cm), 每天读取负压计读数, 采用定位通量法计算地下水对土壤水的补给量, 根据达西定律计算该点处的流量 q , 计算式为:

$$q(z_{1-2}) = -k(\bar{h}) \left[\frac{h_2 - h_1}{\Delta z} + 1 \right], \quad (3)$$

$$\bar{h} = h_1 + h_2, \quad (4)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1, \quad (5)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为断面 Z_1 、 Z_2 处负压计的值 (hPa); Z_1 和 Z_2 为负压计安装的两点深度; k 为试验用沙壤土的渗透系数。

由此, 得到 t_1 至 t_2 时段内单位面积流过的土壤水流量 $Q(Z_{1-2})$, 并由 $Q(Z_{1-2})$ 可求得任一断面流量 $Q(z)$, 计算式为

$$Q(z) = Q(z_{1-2}) + \int_z^{z_{1-2}} Q(z, t_2) dz - \int_z^{z_{1-2}} Q(z, t_1) dz. \quad (6)$$

土壤含水率: 在播种前和每次灌水前、后 (下雨后 $2 \sim 3\text{ d}$ 加测 1 次), 采用土钻在田间取样, 测定土壤含水率。分别在 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100\text{ cm}$ 土层取土样, 采用干燥称质量测定土壤含水率, 即质量含水率。

水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 的

计算式为：

$$WUE=Y/ET, \tag{7}$$

式中： WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ mm})$)； Y 为玉米产量 (kg/hm^2)； ET 为作物耗水量 (mm)。

1.3.3 夏玉米根系取样

在夏玉米灌浆期采用剖面挖根法，随机取 3 株代表性植株取样。在垂直方向 60 cm 土层范围，垄上分别取 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~60 cm 共 5 层；沟上分别取 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 共 4 层，分别将各土层中所有根系取出，清洗干净并自然晾干，剔除杂质和死根。根样品采用 Epson Perfection 4870 根系扫描仪进行扫描，并用根系专用分析软件 Win RHIZO Pro 获得根长等指标。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 处理，应用 SPSS 22.0 进行方差分析，采用最小显著差异法(Least significant difference method, LSD)进行显著性检验 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 沟灌与不同秸秆覆盖对夏玉米根长密度的影响

沟灌结合不同秸秆覆盖显著 ($P<0.05$) 影响夏玉米灌浆期 RLD 在垄和沟的土壤剖面的空间分布 (图 3)。从表 1 可以看出，夏玉米 RLD 与土层深度呈指数关系，随土层深度的增加 RLD 递减，垄上的 RLD 在 10~20 cm 土层锐减，幅度最大，40 cm 以下土层降幅较小；沟里的 RLD 变化趋势较平稳；垄上的 RLD 显著高于沟里 11.2% ($P<0.05$)。与 FM 处理相比，

秸秆覆盖显著提高垄上 0~10 cm 土层的 RLD ，尤其是 FLJ 和 FLGJ 处理显著增加了 24.6%和 27.4%，而在 40~60 cm 土层，FGJ 与 FLGJ 处理的 RLD 无差异，但较 FM 处理显著增大 128.1%和 122.7%；在沟里 0~10 cm 土层 RLD ，FGJ 处理最大，较 FM 处理增加 22.0%，FLGJ 较 FM 处理增加 9.7%，而在 30~40 cm 土层，FM 和 FLJ 处理未发现根系，FGJ 和 FLGJ 处理的 RLD 仍能达到 $0.18 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 。说明，沟覆秸秆有利于垄上深层 ($>40 \text{ cm}$) 和沟里深层 ($>20 \text{ cm}$) 土层根系生长发育，有利于夏玉米根系下扎，而垄上覆秸秆显著促进垄上表层根系发育，对垄上和沟里深层根系发育促进效果不显著。

表 1 不同处理夏玉米灌浆期根长密度拟合函数

Table 1 RLD fitting function at summer maize filling period under different treatments			
根系位置	处理	拟合趋势线函数	决定系数 R^2
垄	FM	$y = 64.857e^{-0.325x}$	0.984
	FLJ	$y = 62.795e^{-0.247x}$	0.978
	FGJ	$y = 76.119e^{-0.328x}$	0.980
	FLGJ	$y = 68.018e^{-0.263x}$	0.966
沟	FM	$y = 38.162e^{-1.160x}$	0.987
	FLJ	$y = 38.376e^{-1.255x}$	0.983
	FGJ	$y = 59.504e^{-1.170x}$	0.935
	FLGJ	$y = 54.549e^{-1.270x}$	0.935

注 y 为不同土层深度的根长密度 (cm/cm^3)； x 为土层深度 (cm)， $0 \leq x \leq 60$ 。

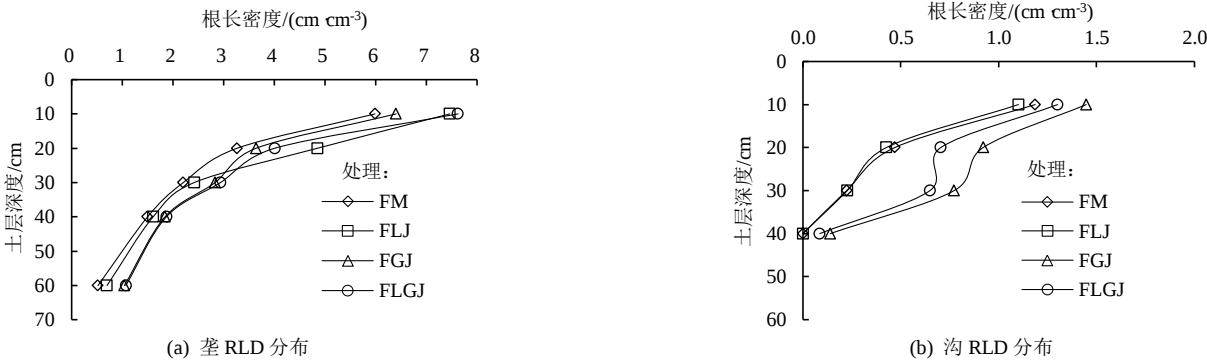


图 3 夏玉米灌浆期根长密度

Fig.3 RLD of summer maize at filling stage

2.2 各处理对夏玉米产量及收获指数的影响

沟灌种植模式下不同秸秆覆盖方式对夏玉米产量及其构成因素的影响如表 2 所示，各处理间夏玉米穗长、穗粗和百粒质量差异显著，均达到 5%显著水平。沟灌种植模式下，秸秆覆盖处理的穗长、穗粗、百粒质量和产量显著高于覆膜沟灌，较 FM 处理分别提高 3.6%~19.3%，6.3%~18.8%、12.5%~22.3%和 4.8%~9.3%，且 FGJ 和 FLGJ 处理间的夏玉米产量相关指标差异不显著 ($P>0.05$)。

夏玉米收获指数 (HI) 反映作物同化产物在夏玉

米营养器官和籽粒上的分配效率，是重要的植物学参数之一。沟灌种植模式下，不同秸秆覆盖方式的 HI 差异显著 ($P<0.05$ ，表 2)，在 0.38~0.48 间变化，表明夏玉米收获指数不稳定，易受沟灌与秸秆覆盖等外界条件影响。秸秆覆盖处理的 HI 较 FM 处理分别提高 7.9%、26.3%和 15.8%，沟覆秸秆提高最多，说明沟灌下秸秆覆盖有利于夏玉米 HI 的提高，以沟覆秸秆效果较好。分析表 2 发现，沟灌种植模式下，随灌浆期垄上深层 ($>40 \text{ cm}$) 和沟深层 ($>20 \text{ cm}$) 土层根长密度的增加，夏玉米收获指数也显著提高 ($P<0.05$)，深

层根长与夏玉米收获指数的变化趋势基本一致，表明 分的吸收，提供给夏玉米中后期生长所需养分，促进夏玉米深层根长密度的增加有利于根系对深层土壤养 同化产物在籽粒上的分配，从而提高夏玉米收获指数。

表 2 不同处理夏玉米产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of summer maize

处理	穗长/cm	穗粗/cm	百粒质量/g	产量/(kg hm ⁻²)	收获指数	水分利用效率/(kg hm ⁻² mm ⁻¹)
FM	19.7±0.99 c	4.8±0.24 b	33.7±1.69 b	7 497.3±354.9 b	0.38±0.02 c	20.8±1.04 a
FLJ	20.4±1.02 bc	5.1±0.26 ab	37.9±1.90 ab	7 859.2±392.0 ab	0.41±0.02 bc	24.3±1.22 b
FGJ	22.8±1.14 ab	5.4±0.27 ab	39.5±1.98 a	8 193.6±409.7 a	0.48±0.02 a	31.6±1.58 c
FLGJ	23.5±1.18 a	5.7±0.28 a	41.2±2.06 a	8 174.5±408.7 a	0.44±0.02 ab	32.1±1.61 c
<i>F</i>	8.613	6.504	8.499	5.127	11.894	48.617
<i>R</i> ²	0.993	0.985	0.993	0.971	0.997	0.919

2.3 各处理对夏玉米水分利用效率的影响

沟灌结合不同秸秆覆盖处理对夏玉米水分利用效率的影响如表 2 所示。沟灌种植模式下，秸秆的不同覆盖方式影响着夏玉米全生育期水分利用效率，各处理间存在差异。与常规覆膜沟灌 FM 处理相比，FLJ、FGJ 和 FLGJ 处理水分利用效率分别提高 4.8%、51.9% 和 54.3%，表明沟灌下沟覆秸秆可有效提高水分利用效率，较垄覆秸秆效果好。

3 讨论

根系是提高作物水分养分吸收率的限制因子，特别是大于 40 cm 土层的深层根^[22]，当土壤中 $RLD < 0.8 \sim 1.0 \text{ cm/cm}^3$ 时，作物生长因根系不足受限^[23]。在本研究中，仅 FGJ 和 FLGJ 处理垄上大于 40 cm 和沟里大于 20 cm 土层的 RLD 达到 $0.74 \sim 1.07 \text{ cm/cm}^3$ ，这有利于夏玉米根系吸收深层土壤水分养分，而垄上覆秸秆的 RLD 明显不足，限制夏玉米根系对深层土壤水分养分的吸收。试验结果表明，沟灌下不同位置秸秆覆盖改变根系分布模式，沟覆秸秆显著促进垄和沟的深层根系生长，且深层根系越多，产量越高。有关研究指出深层根系是提高旱地作物籽粒产量的功能根系^[24-25]。本试验中，在大于 40 cm 土层，沟覆秸秆 FGL 和 FLGJ 处理的根长密度较 FM 处理提高 128.1% 和 122.7% ($P < 0.05$)，但 FGL 和 FLGJ 处理间的 RLD 无差异，说明旱地农田沟灌结合秸秆覆盖促进夏玉米深层根系发育，有利于吸收更多的深层土壤水分养分。这可能是因为秸秆覆盖具有保水的作用，且秸秆覆盖特有的“降温效应”有利于提高夏玉米中后期根系活性、延缓植株衰老^[26]，对灌浆后的吸收及光合作用同化产物的转移具有促进作用^[27]，从而实现提效增产的目的。夏玉米干物质和光合作用同化产物的分配是产量形成的重要因素，适当减少表层土层根长密度，在一定程度减少了根系冗余^[28]，降低了同化产物在根系的分配比例，进而提高夏玉米产量。

本研究表明，在河套灌区半干旱农业中沟灌通过适宜的秸秆覆盖可获得高产并提高水分利用效率。沟覆秸秆和垄沟覆秸秆显著提高夏玉米产量，较 FM 处

理分别增产 9.3% 和 9.0%，二者差异不显著；沟覆秸秆较 FM 处理显著提高夏玉米收获指数 26.3%，且夏玉米产量和收获指数与垄、沟大于 40 cm 深层土壤 RLD 变化趋势一致，呈显著正相关，而与总根长密度之间无显著关系。因此，在干旱区夏玉米获得高产的关键因子是植株具有发达的深层根系^[29]，而干旱条件下，沟覆秸秆促进垄 (>40 cm) 和沟 (>20 cm) 深层土壤根长密度的增加是根向水性的典型反应^[30]，能够提高根系提水作用^[31]。因此，针对河套灌区夏玉米，在沟灌种植模式下，控制垄上表层土层根长，通过覆盖秸秆增大沟土层含水率，诱导夏玉米根系下扎，提高垄和沟深层土壤根长密度，增强深层根系提水作用，实现深层土壤的水分和养分在时间空间上的协调，以水肥促根，以根调水肥^[32]，促进夏玉米生长，提高夏玉米水分利用效率及产量，考虑到实际可操作性，沟覆秸秆结合沟灌 (FGJ) 有利于实现这一目标，既能实现秸秆资源化利用，又显著增产 9.3%，水分利用效率提高 51.9%。

4 结论

1) 与常规垄覆膜沟灌 FM 处理相比，沟灌结合沟覆秸秆 (FGJ) 和垄沟覆秸秆 FLGJ 处理提高垄上大于 40 cm 深层土层根长密度 128.1% 和 122.7%；在沟里 30~40 cm 土层，FM 和 FLJ 处理未发现根系，而 FGJ 和 FLGJ 处理的根长密度仍能达到 0.18 cm/cm^3 。沟覆秸秆改善了夏玉米根系分布，提高深层根长密度。

2) 垄和沟的深层根长密度与水分利用效率和产量的变化趋势一致，沟覆秸秆 FGJ 处理和垄沟覆秸秆 FLGJ 处理显著提高水分利用效率 51.9% 和 54.3%，增产 9.3% 和 9.0% ($P < 0.05$)，但 FGJ 处理收获指数较其他处理显著增大 ($P < 0.05$)，为 0.48，效果较佳。

3) 建议将沟覆秸秆作为河套灌区沟灌的耕作模式。

参考文献:

- [1] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao irrigation district:

- Current state and future prospect[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 1-17.
- [2] SARKAR S, PARAMANICK M, GOSWAMI S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus* L. var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 94-101.
- [3] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 41-49.
- [4] 于博, 于晓芳, 高聚林, 等. 秸秆全量深翻还田和施加生物炭对不同土壤持水性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5): 25-32.
- YU Bo, YU Xiaofang, GAO Julin, et al. Change in hydraulic properties of soils amended with biochar following plough of straw stalk into deep soil horizon[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 25-32.
- [5] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 垄覆黑膜沟覆秸秆促进夏玉米生长及养分吸收[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 122-130.
- YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow enhancing summer maize's growth and nutrient absorption[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 122-130.
- [6] 仲昭易, 张瑜, 冯绍元, 等. 秸秆深埋结合地膜覆盖土壤水盐运移模拟试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 25-30.
- ZHONG Zhaoyi, ZHANG Yu, FENG Shaoyuan, et al. Incorporating straw coupled with film mulching to ameliorate soil salinization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 25-30.
- [7] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(5): 1 069-1 075.
- BU Yushan, MIAO Guoyuan, ZHOU Naijian, et al. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 1 069-1 075.
- [8] 袁宁宁, 白清俊, 张明智, 等. 温室番茄在宽垄覆膜沟灌下水分调亏下限指标研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(1): 17-23.
- YUAN Ningning, BAI Qingjun, ZHANG Mingzhi, et al. Optimizing the soil moisture threshold for scheduling deficit furrow irrigation of greenhouse tomato grown in raised bed with film mulching[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(1): 17-23.
- [9] 汪顺生, 高传昌, 王兴, 等. 不同灌溉方式下冬小麦耗水规律及产量的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 11-14.
- WANG Shunsheng, GAO Chuanchang, WANG Xing, et al. Experimental study on the water consumption characteristic and yield of winter wheat under different irrigation methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(4): 11-14.
- [10] 高传昌, 李兴敏, 汪顺生. 垄作小麦产量及水分生产效率的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 10-12.
- GAO Chuanchang, LI Xingmin, WANG Shunsheng. Yield and WUE of winter wheat in bed-planting[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(4): 10-12.
- [11] 李彩霞, 周新国, 孙景生, 等. 交替隔沟灌溉下玉米根长密度分布及水分利用[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(6): 81-83.
- LI Caixia, ZHOU Xinguo, SUN Jingsheng, et al. Distribution of root length density and water use efficiency of maize with alternative furrow irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(6): 81-83.
- [12] 曹琦, 王树忠, 高丽红, 等. 交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 47-53.
- CAO Qi, WANG Shuzhong, GAO Lihong, et al. Effect of alternative furrow irrigation on growth and water use efficiency of cucumber in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 47-53.
- [13] 漆栋良, 胡田田, 白雪. 交替隔沟灌溉制度对制种玉米耗水规律和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 64-70.
- QI Dongliang, HU Tiantian, SONG Xue. Effect of irrigation regime on water consumption pattern and grain yield of seed maize under partial root zone irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 64-70.
- [14] 李波, 屈忠义, 王昊. 河套灌区覆膜沟灌对加工番茄生长效应与品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 43-47.
- LI Bo, QU Zhongyi, WANG Hao. Effect of mulching and furrow irrigation on growth and processing quality of tomato in Hetao irrigation district[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6): 43-47.
- [15] 汪顺生, 王康三. 沟灌种植下秸秆覆盖对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(7): 18-23.
- WANG Shunsheng, WANG Kangsan. Effect of straw mulching on water consumption characteristics and yield of summer maize under furrow irrigation planting[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(7): 18-23.
- [16] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 26-32.
- LIANG Zongsuo, KANG Shaozhong, SHI Peize, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water saving benefit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 26-32.
- [17] 汪可欣, 付强, 姜辛, 等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 181-186.
- WANG Kexin, FU Qiang, JIANG Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 181-186.
- [18] 胡彬, 程东娟, 张洁. 秸秆条施对土壤水分运移分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(1): 29-32.
- HU Bin, CHENG Dongjuan, ZHANG Jie. Influence of straw row application on moisture migration distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(1): 29-32.
- [19] 张万锋, 杨树青, 姜帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 117-124.
- ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(7): 117-124.
- [20] 康利允, 沈玉芳, 岳善超, 等. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 140-147.
- KANG Liyun, SHEN Yufang, YUE Shanchao, et al. Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 140-147.
- [21] 余卫东, 冯利平, 胡程达, 等. 苗期涝渍对黄淮地区夏玉米生长和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2 161-2 166.
- YU Weidong, FENG Liping, HU Chengda, et al. Effects of waterlogging during seedling stage on the growth and yield of summer maize in Huang-Huai Region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2 161-2 166.
- [22] 王志刚, 王俊, 高聚林, 等. 模拟根层障碍条件下不同深度玉米根系与产量的关系研究[J]. *玉米科学*, 2015, 23(5): 61-65.
- WANG Zhigang, WANG Jun, GAO Julin, et al. Relationship of roots in different soil strata and yield of maize under simulated obstacle of root layer[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(5): 61-65.
- [23] BARRACLOUGH P B. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop[J]. *Plant and Soil*, 1989, 119(1): 59-70.
- [24] ASSENG S, RITCHIE J T, SMUCKER A J M, et al. Root growth and

- water uptake during water deficit and recovering in wheat[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2): 265-273.
- [25] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[J]. *生态学报*, 1996, 16(3): 256-264.
- LIANG Yinli. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root system growth of wheat and water use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 256-264.
- [26] 申胜龙, 李援农, 银敏华, 等. 秸秆覆盖对夏玉米土壤温度和硝态氮的影响[J]. *节水灌溉*, 2018(2): 29-33.
- SHEN Shenglong, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of straw mulching on soil temperature dynamic and nitrate nitrogen distribution of summer maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(2): 29-33.
- [27] 战秀梅, 李秀龙, 韩晓日, 等. 深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(4): 461-466.
- ZHAN Xiumei, LI Xiulong, HAN Xiaori, et al. Effects of subsoiling and straw-returning on yield and post-anthesis dry matter and nitrogen accumulation and root characteristics of spring maize[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(4): 461-466.
- [28] 李话, 张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 3-5.
- [29] WANG X B, ZHOU B Y, SUN X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status[J]. *Plos One*, 2015, 10(6): e0129231.
- [30] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 开发利用土壤深层水资源的一种有效途径: “以肥调水”的大田试验研究[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 423-429.
- LIU Gengshan, GUO Anhong, AN Shunqing, et al. A scientific approach of using water resources in deep soil layer: farmland experimental studies of utilizing water by fertilizer[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 423-429.
- [31] 张永清, 苗果院. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 72-75.
- ZHANG Yongqing, MIAO Guoyuan. Biological response of winter wheat root system to fertilization depth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 72-75.
- [32] 张杨, 沈玉芳, 李世清. 施肥对干旱胁迫下夏玉米根系提水的调节作用研究[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 535-541.
- ZHANG Yang, SHEN Yufang, LI Shiqing. Regulation of different fertilizer treatments on hydraulic lift of summer maize under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 535-541.

The Effect of Straw Mulching Coupled with Furrow Irrigation on Root Distribution and Yield of Summer Maize

ZHANG Yin¹, E Jifang², SUN Minghai¹

(1. Hetao University, Bayannur 015000, China; 2. Hulunbuir Real Estate Management Office, Hulunbuir 021000, China)

Abstract: 【Objective】 Root growth and its consequence for yield is modulated by water and nutrient distribution in soil, as well as soil resistance for roots to grow. The objective of this paper is to explore how straw mulching and furrow irrigation combine to affect root growth, as well as the ultimate yield and water use efficiency of summer maize. 【Method】 The experiments were conducted at a field in Hetao irrigation district, Inner Mongolia (China), with the site ridge tilled. It consisted of four treatments: furrow irrigation coupled with film mulching (FM), furrow irrigation with the ridge-top mulched by straws (FLJ), furrow irrigation with the depression mulched by straws, and furrow irrigation with both ridge top and depression mulched by straws (FLGJ). For each treatment, we measured root length, water consumption, yield and traits of the summer maize. 【Result】 Straw mulching had a significant impact on root distribution, yield and water use efficiency. Mulching the depression with straws improved root distribution, water use efficiency and the yield as it increased root growth into soil deeper than 40 cm in the ridge top by 128.1% compared with FM, and root density in soil deeper than 20 cm in the depression. Compared with FM, FGJ and FLGJ increased water use efficiency by 51.9% and 54.3% respectively, and yield by 9.3% and 9.0% respectively, despite that the harvest index of FGJ was 0.48, significantly higher than that of other treatments. 【Conclusion】 Integrating furrow irrigation with straw mulching of the depression in ridge tillage was most efficient for promoting deep roots growth, thereby increasing water use efficiency and yield of summer maize. It can be used as a cultivation method to improve water use efficiency of summer maize in the Hetao irrigation district and its adjacent regions.

Key words: furrow irrigation; straw mulching; root system; yield; summer maize

责任编辑: 白芳芳