垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响

查　丽　谢孟林　朱　敏　豆　攀　程秋博　王兴龙　袁继超　孔凡磊*
(四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130)

摘　要　通过设置田间试验,研究种植方式(垄作垄播、平作、垄作沟播)与覆膜措施对川中丘陵春玉米根系分布和玉米产量的影响.结果表明:垄作与覆膜对玉米根系形态影响显著,覆膜显著提高了玉米根长、根表面积和根体积,拔节期覆膜较不覆膜处理分别提高了 42.3%、50.0%和 57.4%.覆膜提高了各土层和各水平各层次根质量,扩大了根系在土壤垂直和水平方向上的分布,提高了拔节期 20~40 cm 土层和水平方向上宽行 0~20 cm 根系比例.种植方式对根系生长和分布的影响因覆膜而异,覆膜下垄作垄播显著提高了各土层根质量和 20~40 cm 土层根量分配比例,同时提高了水平方向上各层次根量和宽行根系分配比例,总根质量表现为:垄作垄播>平作>垄作沟播;不覆膜下垄作沟播显著提高了窄行 0~40 cm 根量,吐丝期总根质量表现为:垄作沟播>垄作垄播>平作.从玉米穗部性状和产量看,覆膜降低了玉米秃尖长,提高了穗长、穗粒数、千粒重和产量,覆膜下产量表现为:垄作垄播>平作>垄作沟播;不覆膜下则表现为:垄作沟播>平作>垄作垄播.覆膜下垄作垄播促进了根系特别是深层根质量的增加,同时增加了深层根系和水平 20~40 cm 根系比例,这是其增产的重要原因;而不覆膜下垄作沟播有利于根系生长,从而提高产量.

关键词　川中丘陵区; 春玉米; 垄作; 覆膜; 根系分布; 产量

Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root distribution and yield of spring maize in hilly area of central Sichuan basin, China. ZHA Li, XIE Meng-lin, ZHU Min, DOU Pan, CHENG Qiu-bo, WANG Xing-long, YUAN Ji-chao, KONG Fan-lei* (*College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Chengdu* 611130, *China*).

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of planting pattern (ridge culture, flatten culture, furrow culture) and film mulching on the distribution of spring maize root system and their influence on the yield of spring maize in the hilly area of central Sichuan basin. The results showed that ridge and film mulching had great influence on root morphology and root distribution of maize. The root length, root surface area and root volume of film mulching was 42.3%, 50.0%, 57.4% higher than those of no film mulching at jointing stage. The film mulching significantly increased the dry mass of root in vertical and horizontal distribution, and increased the root allocation ratio in deeper soil layer (20-40 cm) and the allocation ratio of wide row (0-20 cm) in horizontal direction. The effects of planting pattern on root growth and root distribution differed by film mulching. With film mulching, the ridge culture significantly increased the root dry mass in each soil layer and enlarged the distribution percentage of wide row (20-40 cm) in horizontal direction, as well as the dry mass of root in horizontal distribution and the root allocation ratio of wide row. The root mass under film mulching was in the order of ridge culture>flatten culture>furrow culture. Without film mulching, the furrow culture significantly increased root dry mass of narrow row (0-40 cm), and the root mass under no film mulching was in the order of furrow culture > ridge

本文由国家自然科学基金项目(31301282)和国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31301282) and the National Technologies R&D Program of China (2012BAD04B13).
2015-08-10 Received, 2016-01-02 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kflstar@163.com

culture >flatten culture. As for the spike characteristics and maize yield, the filming mulching measures reduced the corn bald length while increased the spike length, grain number, 1000-grain mass and yield. The yield under film mulching was in the order of ridge culture>flatten culture> furrow culture, while it was furrow culture > flatten culture > ridge culture under no film mulching. The reason for yield increase under ridge culture with film mulching was that it increased root weight especially in deep soil, and promoted the root allocation ratio in deeper soil and wide row (20-40 cm) in horizontal direction. The ridge-furrow culture without film mulching was helpful to root growth and increased the maize yield.

Key words: hilly area of central Sichuan basin; spring maize; ridge-cultivation; film mulching; root distribution; yield.

玉米是我国第一大粮食作物,用途广、需求量大,提高玉米产量对确保我国粮食安全具有重要意义[1].川中丘陵区是四川玉米的主产区,玉米生长的生态条件有别于北方,主要表现为降水量丰富,但季节性干旱频发,而且土层浅薄,质地黏重[2],如何蓄水保墒促进玉米根系生长就显得尤其重要.垄作与覆膜措施是现代玉米产量提升的重要措施之一[3-4].垄作降低土壤容重,使土壤形成一种上虚下实的结构,土壤的熟化层加厚,在根系生长最旺盛的耕层,有利于吸收水分和养分[5].垄作沟播有更好地集蓄自然降雨和提高土壤蓄水能力的作用[6-7],可缓解季节干旱对作物生长的影响.覆膜有显著的增温保水效果,能增强植株从土壤中吸收水分和养分的能力[8-9].垄作与覆膜可有效协调土壤水、肥、热等的关系[10-11],为作物生长创造良好的环境.研究表明,垄作与覆膜措施均能在不同程度上促进玉米地上部、地下部生长和提升玉米产量[10,12].目前关于垄作与覆膜的研究主要集中在我国北方地区,研究内容以土壤理化特性、作物地上部生长和产量方面为主[7,12],从玉米根系垂直和水平分布角度分析与产量关系的文章尚未见报道.本研究通过设置田间试验,采用三维空间取样法,分析垄作覆膜下玉米根系形态及其在土壤中的空间分布差异,研究玉米根系特征及其与产量性状的关系,为川中丘陵地区春玉米高产耕作栽培途径选择提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

四川省简阳市芦葭镇英明村(30°16′ N, 104°26′ E)地处四川盆地腹地.该地海拔 430.22 m,多年平均降雨量 874 mm,平均气温 17 ℃,无霜期 311 d.当地传统种植方式为玉/豆宽窄行间作种植模式,土壤耕作方式以机械旋耕为主.土壤类型为黏质土,质地黏重.耕层土壤 pH 7.61、有机质 15.91 $g \cdot kg^{-1}$、全氮 1.28 $g \cdot kg^{-1}$、碱解氮 39.36 $mg \cdot kg^{-1}$、速效磷 3.69 $mg \cdot kg^{-1}$、速效钾 222 $mg \cdot kg^{-1}$.

1.2 试验设计

采用两因素随机区组试验设计,A 因素为覆盖方式,设地膜覆盖(A_1)和不覆盖地膜(A_2)2 个水平;B 因素为玉米种植方式,设垄作垄播(B_1)、平作(B_2)、垄作沟播(B_3)3 个水平(图 1);其中对照为平作不覆膜处理,共 6 个处理,重复 3 次,18 个小区,小区面积 32 m^2,行长 8 m.各种植方式的覆膜方法均为将薄膜沿垄型平铺,然后在薄膜边缘覆土.

1.3 主要栽培措施

2014 年 3 月 28 日直播玉米,玉米品种为‘正红 505’(四川农业大学正红种业有限责任公司提供),播种前旋耕整地并施底肥.宽窄行种植,宽行 160 cm,窄行 40 cm,播深 5 cm 左右,穴距 20 cm,单株种植(穴播 2 粒,5 叶期定苗).地膜为厚 0.008~0.015 mm、宽 100 cm 的普通地膜,底肥所有处理施 P_2O_5(过磷酸钙,含 $P_2O_5 \geq 12\%$)60 $kg \cdot hm^{-2}$;K_2O(氯化钾,含 $K_2O \geq 60\%$)90 $kg \cdot hm^{-2}$;玉米全生育期共施纯氮(尿素,含氮量≥46%)225 $kg \cdot hm^{-2}$,按底肥∶穗肥=6∶4 比例施用,底肥与穗肥均为中沟施肥,穗肥为大喇叭口期揭膜后追肥.其他栽培管理措施与当地高产田保持一致.

1.4 测定项目与方法

1.4.1 根系性状的测定 分别在玉米拔节期(5 月 8 日)、大喇叭口期(5月28日)、吐丝期(6月18日)

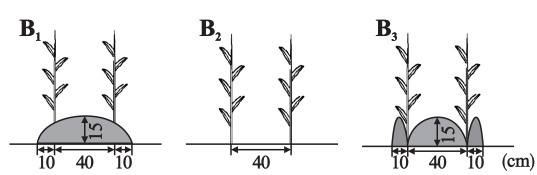

图 1 不同种植方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of different planting patterns.

B_1: 垄作垄播 Ridge culture; B_2: 平作 Flatten culture; B_3: 垄作沟播 Furrow culture. 下同 The same below.

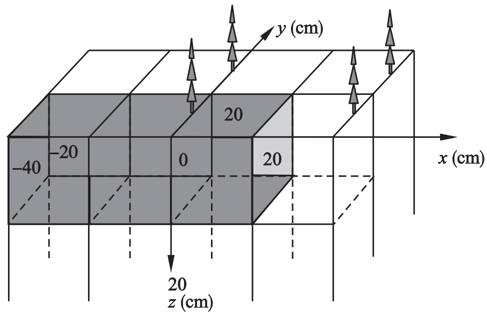

图 2　田间根系取样的三维坐标图

Fig.2　Three-dimensional chart of sampling root in the field.

图中灰色区域为 0~20 cm 土层的根系取样位点,包含 0~20 cm 土层中窄行 0~20 cm、宽行 0~20、20~40 cm 取样点 Gray area was the sampling points of 0-20 cm soil layers, containing the sampling point of narrow row 0-20 cm, wide row 0-20 and 20-40 cm.

参照小立方原位根土取样器[13],根据“3D monolith”[14]根系空间取样方法,对长势一致并且位置连续(种植行方向)的 4 株玉米植株及根系取样.以植株为中心,在取样土壤剖面中,垂直于种植行的为 x 轴方向,平行于种植行的为 y 轴方向,土壤深度方向为 z 轴方向,以体积为 20 cm×20 cm×20 cm 的土块为取样单位(图 2).水平横向(x 轴)取样标准:以植株为中心,窄行取 0~20 cm、宽行取 0~20、20~40 cm 处.水平纵向(y 轴)取样标准:以植株为中心,取样长度为 20 cm.垂直(z 轴)取样标准:垄作垄播以垄面为基面,垄作沟播以沟面为基面,平作以水平面为基面向下取样,取样土层深度分别为 0~20、20~40 cm.将每一土块中所有根系分别取出,把根系表面清洗干净后放入自封袋中,带回实验室.用 Epson Perfection V700 型根系扫描仪将根系样品扫描成图片文件,然后用根系分析软件(Epson Expression 1000xl,WinRHIZO 软件)测定根系长度、根系表面积和根系体积.

1.4.2 根系干物质的测定　根系扫描完成后,将根样置于烘箱,在 105 ℃下杀青 30 min,再 80 ℃烘干至恒量,计算单株根系干物质量.

1.4.3 测产与考种　收获(7 月 25 日)前,调查小区内收获穗数,均重法选取 20 个果穗考察穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、千粒重等,然后按小区实收计产.

1.5　数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据与作图,DPS v7.05 软件进行统计分析,LSD 法进行多重比较.

2　结果与分析

2.1　垄作与覆膜对玉米根系形态的影响

由表 1 可见,种植方式与覆膜对玉米根系形态均有不同程度的影响,其中覆膜方式对玉米各时期根系形态(根长、根表面积和根体积)的影响均达到极显著水平,而种植方式对根体积的影响显著;从交互作用看,覆膜与种植方式对拔节期玉米根表面积、根体积和大喇叭口期根体积影响的互作效应达到极显著水平.覆膜与不覆膜处理间的根系形态差异随玉米生长呈现缩小的趋势,但 3 个时期覆膜处理根长、根表面积和根体积均显著高于不覆膜处理,其中

表 1　垄作与覆膜对单株玉米根系形态的影响

Table 1　Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root morphology of maize plant

覆膜方式 Plastic film mulching mode	种植方式 Planting pattern	拔节期 Jointing stage			大喇叭口期 Teaseling stage			吐丝期 Silking stage		
		根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm^2)	根体积 Root volume (cm^3)	根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm^2)	根体积 Root volume (cm^3)	根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm^2)	根体积 Root volume (cm^3)
A_1	B_1	1884a	683a	20.0a	11530a	3398a	90.0a	12369a	4015a	106.8a
	B_2	1606a	519b	13.4b	12028a	3158a	70.4b	12237a	3895a	106.3a
	B_3	1468ab	458b	11.8bc	11844a	3104a	67.6b	12730a	3675a	88.5bc
	平均 Average	1653A	553A	15.1A	11801A	3220A	76.0A	12425A	3862A	100.6A
A_2	B_1	1058b	323c	8.1c	7352b	1928b	42.5c	7946bc	2300b	91.0b
	B_2	1057b	327c	8.2c	8515b	2259b	50.3c	8823c	2304b	83.4bc
	B_3	1369ab	457b	12.4b	8085b	2038b	42.2c	9578b	2902b	75.5c
	平均 Average	1162B	369B	9.6B	7984B	2075B	45.0B	8116B	2502B	83.3B
F 值	A	12.43**	36.48**	75.77**	46.18**	83.69**	120.03**	47.86**	69.13**	20.63**
F value	B	0.34ns	2.34ns	8.99**	0.75ns	0.42ns	5.32*	2.38ns	0.47ns	7.14*
	A×B	0.15ns	11.51**	32.67**	0.12ns	1.83ns	8.77**	1.05ns	3.26ns	0.60ns

A_1:地膜覆盖 Film mulch;A_2:不覆盖地膜 No film mulch;B_1:垄作垄播 Ridge culture;B_2:平作 Flatten culture;B_3:垄作沟播 Furrow culture. 不同大、小写字母分别表示同类处理间差异达到极显著($P<0.01$)和显著水平($P<0.05$). Different capital and small letters meant significant difference among treatments at 0.01 and 0.05 levels, respectively. * $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns:不显著 Not significant. 下同 The same below.

拔节期覆膜较不覆膜处理分别提高 42.3%、49.9%和 57.4%.种植方式间玉米根形态的差异随玉米生长也呈缩小的趋势,且影响的趋势因覆膜与否而异.在覆膜条件下,拔节期和大喇叭口期根长、根表面积和根体积均表现为垄作垄播>平作>垄作沟播,且垄作垄播的根体积显著高于其他两个处理.不覆膜条件下,拔节期根长、根表面积和根体积均以垄作沟播最高,且显著高于平作和垄作垄播处理.这说明覆膜条件下垄作垄播和平作有利于根系生长,而不覆膜条件下垄作沟播有利于根系生长.

2.2 垄作与覆膜对根系垂直分布的影响

从图 3 可以看出,种植方式和覆膜对玉米根系垂直分布影响显著.在垂直方向上,玉米根系主要集中在 0~20 cm 土层,3 个时期 0~20 cm 土层的根干质量占总干质量比例平均为 88.4%、88.0% 和 83.4%.覆膜措施显著提高了各土层玉米根系干质量,扩大了根系在土壤垂直方向上的分布.与不覆膜处理相比,覆膜处理 0~20 cm 土层根质量在 3 个时期平均提高 59.3%、108.1%和 37.2%,20~40 cm 土层平均提高 115.6%、28.5%和 80.0%.拔节期覆膜处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的根系占总根质量比例分别为 87.3% 和 12.7%,不覆膜处理分别为 90.3%和 9.8%;大喇叭口期覆膜处理分别为 89.8%和 10.8%,不覆膜处理分别为 84.5%和 15.5%;吐丝期覆膜处理分别为 81.9%和 18.1%,不覆膜处理分别为 85.6%和 14.4%.可见,覆膜措施可增加拔节期 20~40 cm土层根系的分布比例,而不覆膜措施则有利于增加大喇叭口期和吐丝期深层根系的分布比例.

种植方式对玉米根系垂直分布也有显著影响,但因覆膜与否而异.覆膜条件下,0~20 cm 土层根质量各时期均表现为:垄作垄播>平作>垄作沟播,且垄作沟播均显著低于其他两个处理;20~40 cm 土层根质量以垄作垄播最高,拔节期显著高于其他两个处理.不覆膜条件下,种植方式间根系的差异随玉米生长逐渐变小,且 0~20 cm 土层的差异大于 20~40 cm 土层;拔节期 0~20 cm 土层根质量表现为:垄作沟播>平作>垄作垄播,垄作沟播显著大于垄作垄播,至吐丝期种植方式间差异不显著.垄作垄播结合覆膜措施可增加根质量,扩大根系在土层的分布,而不覆膜条件下垄作沟播有利于根系干质量的增加.种植方式对根系在不同土层的分配也存在影响,拔节期垄作垄播、平作、垄作沟播 0~20 cm 土层的根质量占总根质量比例平均为 85.4%、91.5%、89.8%;大喇叭口期则分别为 82.6%、88.3%、88.5%.这说明垄作垄播可增加根系在深层土壤的分配比例,有利于根系对深层土壤水分和养分的吸收.

2.3 垄作与覆膜对根系水平分布的影响

从玉米根系水平分布来看(表 2),覆膜对水平各层次根量的影响均达到显著或极显著水平,而种植方式对宽行 0~20 和 0~40 cm 根量的影响显著;从交互作用看,种植方式与覆膜对宽行根量和总根量的影响存在显著互作效应.玉米 2 个时期宽行 0~20 cm 根系占宽行总根量比例分别为 87.2% 和 88.4%,表明根系在水平方向上主要分布在植株 0~20 cm 范围内.大喇叭口期宽行 0~40 cm 和窄行 0~40 cm 根系所占比例平均为 51.2%和 48.8%,吐丝期分别为 54.9%和 45.1%,根系干质量表现为宽行>窄行,且随生育进程推进差异增大.

除宽行 20~40 cm 外,覆膜显著提高了其他各水平层次根量.与不覆膜相比,大喇叭口期覆膜处理宽行0~20、20~40和0~40 cm、窄行0~40 cm根量

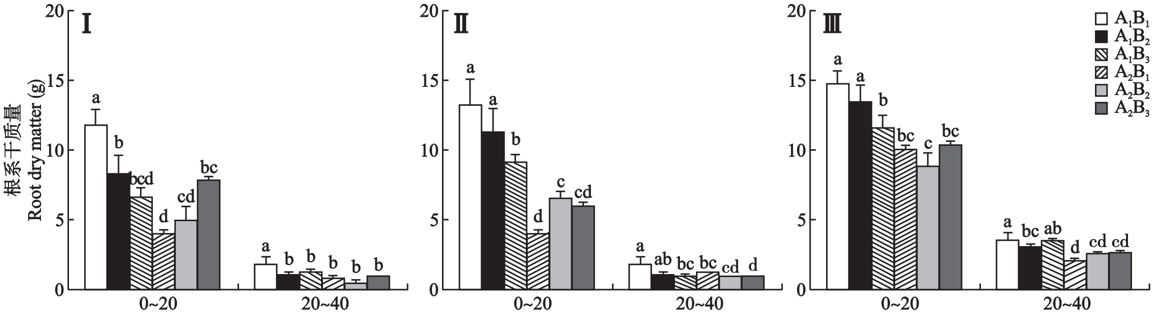

图 3 垄作与覆膜对玉米根系垂直分布的影响

Fig.3 Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root vertical distribution of maize.

Ⅰ: 拔节期 Jointing stage; Ⅱ: 大喇叭口期 Teaseling stage; Ⅲ: 吐丝期 Silking stage. A_1: 地膜覆盖 Film mulch; A_2: 不覆盖地膜 No film mulch. 用根系干物质量表示根系在土壤中的分布 The root distribution in the soil was indicated by the root dry mass. 不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

表 2　垄作与覆膜对玉米根系水平分布的影响

Table 2　Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root horizontal distribution of maize (g · plant^{-1})

覆膜方式 Plastic film mulching mode	种植方式 Planting pattern	大喇叭口期 Teaseling stage					吐丝期 Silking stage				
		宽行 Wide row			窄行 Narrow row	总质量 Total mass	宽行 Wide row			窄行 Narrow row	总质量 Total mass
		0~20 cm	20~40 cm	0~40 cm	0-40 cm		0~20 cm	20~40 cm	0~40 cm	0-40 cm	
A_1	B_1	7.5a	1.10a	8.60a	7.35a	15.95a	9.41a	1.11a	10.51a	7.67a	18.18a
	B_2	5.95b	0.56b	6.51b	6.75ab	13.26b	7.21b	0.76b	7.97b	7.46a	15.43b
	B_3	4.25c	0.79ab	5.04c	5.11bc	10.15c	6.69bc	0.95ab	7.64b	6.00b	13.64bc
	平均 Average	5.90A	0.81A	6.72A	6.40A	13.12A	7.77A	0.94A	8.71A	7.04A	15.75A
A_2	B_1	1.74d	0.37b	2.11e	3.08d	5.20d	5.68cd	0.45c	6.13c	4.50c	10.63d
	B_2	3.67c	0.61ab	4.28cd	3.40cd	7.68cd	4.87d	1.06a	5.93c	4.46c	10.39d
	B_3	3.23c	0.46b	3.69d	3.07d	6.76d	5.07d	0.77b	5.84c	6.11b	11.95cd
	平均 Average	2.88B	0.48A	3.36B	3.18B	6.55B	5.21B	0.76A	5.96B	5.02B	10.99B
F 值	A	87.23^{**}	5.96^{*}	162.08^{**}	44.51^{**}	100.57^{**}	50.89^{**}	7.70^{*}	51.37^{**}	36.30^{**}	62.95^{**}
F value	B	4.14^{*}	0.42^{ns}	6.49^{*}	2.16^{ns}	4.40^{*}	8.7^{**}	1.51^{ns}	6.71^{*}	0.05^{ns}	3.00^{ns}
	A×B	19.22^{**}	2.65^{ns}	36.14^{**}	1.79^{ns}	11.08^{**}	2.93^{ns}	18.53^{**}	4.62^{*}	10.16^{**}	8.00^{**}

平均提高了 104.9%、70.3%、100.0%、101.3%；吐丝期平均提高了 49.1%、23.7%、46.1%、40.2%.从宽行根系分布看，大喇叭口期覆膜处理宽行 0～20 和 20～40 cm根系占宽行根系比例分别为 87.9%和 12.1%，不覆膜处理分别为 85.8%和 14.2%；吐丝期覆膜处理分别为 89.2%和 10.8%，不覆膜处理分别为 87.3%和 12.7%.可见，覆膜提高了宽行 0～20 cm 根系分布比例，降低了宽行 20～40 cm 分布比例.

种植方式对根系水平分布的影响因覆膜表现不同.覆膜下垄作垄播提高了水平方向上各层次根量和宽行各层次根系分配比例；总根质量均表现为：垄作垄播>平作>垄作沟播，且大喇叭口期处理间差异达显著水平，吐丝期垄作垄播也显著高于其他两个处理.不覆膜下平作提高了宽行 20～40 cm 根量和分配比例，而垄作沟播显著提高了吐丝期窄行 0～40 cm 根量，吐丝期总根质量表现为：垄作沟播>垄作垄播>平作，但处理间差异不显著.

2.4　垄作与覆膜对玉米产量及构成因素的影响

由表 3 可知，种植方式与覆膜对玉米穗部性状和产量均有显著影响.覆膜对玉米秃尖长、穗粒数、千粒重和产量的影响达显著或极显著水平；种植方式对玉米穗部性状和产量的影响受覆膜措施的影响而不同.覆膜措施与种植方式对玉米穗粒数、千粒重和产量的影响存在极显著的交互作用.覆膜措施降低了玉米秃尖长，提高了穗长、穗粒数、千粒重和产量，其中秃尖长、穗粒数和产量变化与不覆膜相比差异达到显著水平.与不覆膜相比，覆膜处理的秃尖长平均降低了 0.97 cm，穗粒数平均增加 15.2%，最终产量平均提高 17.3%.种植方式对玉米产量的影响因覆膜与否而异.覆膜条件下种植方式间产量差异显著，表现为垄作垄播>平作>垄作沟播；不覆膜下则表现为垄作沟播>平作>垄作垄播，且垄作沟播产量显著高于其他两个处理.总体上看，覆膜下垄作垄播产量最高，而不覆膜下垄作沟播产量最高.

表 3　垄作与覆膜对玉米产量及构成因素的影响

Table 3　Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on yield and yield components of maize

覆膜方式 Plastic Film mulching mode	种植方式 Planting pattern	穗长 Spike length (cm)	穗粗 Spike diameter (cm)	秃尖长 Bald tip length (cm)	穗粒数 Grain number per ear	千粒重 1000-kernel mass (g)	产量 Yield (kg · hm^{-2})
A_1	B_1	20.18a	53.77a	2.29bc	698.6a	271.3a	9476.0a
	B_2	19.61a	53.45a	1.62c	679.7b	270.0a	9175.8b
	B_3	19.98a	54.04a	3.02ab	682.7ab	260.8b	8916.9c
	平均 Average	19.92A	53.75A	2.31B	687.3A	267.4A	9189.6A
A_2	B_1	19.57a	53.55a	3.16a	574.6d	261.9b	7520.9e
	B_2	19.41a	53.62a	3.34a	601.3c	257.7b	7745.8e
	B_3	19.92a	53.56a	3.35a	614.0c	268.5a	8239.3d
	平均 Average	19.63A	53.58A	3.28A	596.6B	262.7B	7835.3B
F 值	A	1.24^{ns}	0.48^{ns}	19.98^{**}	449.14^{**}	14.58^{**}	533.21^{**}
F value	B	1.11^{ns}	0.36^{ns}	3.55^{ns}	2.85^{ns}	1.88^{ns}	1.39^{ns}
	A×B	0.41^{ns}	0.54^{ns}	3.39^{ns}	15.46^{**}	26.28^{**}	39.96^{**}

表 4 玉米产量与根系特性的相关性

Table 4 Correlations between yield and root characters of maize

性状 Character	相关系数 Correlation coefficient			回归方程 Regression equation		
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Teaseling stage	吐丝期 Silking stage	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Teaseling stage	吐丝期 Silking stage
根长 Root length	0.771**	0.776**	0.673*	$y=6369.45+1.52x$	$y=6101.71+0.24x$	$y=7264.08+0.14x$
根表面积 Root surface area	0.849**	0.822**	0.776**	$y=6363.23+4.66x$	$y=6167.12+0.89x$	$y=6143.81+0.79x$
根体积 Root volume	0.839**	0.815**	0.567ns	$y=6700.89+146.95x$	$y=6652.01+30.76x$	$y=5792.27+29.59x$
根干质量 Dry mass of root	0.788**	0.810**	0.834**	$y=6891.71+204.09x$	$y=7180.09+135.49x$	$y=5943.96+192.08x$

2.5 玉米产量与根系性状的相关分析

由表 4 可知,玉米产量与根系形态和根干质量之间呈显著线性正相关.拔节期和大喇叭口期玉米根系形态(根长、根表面积、根体积)与产量均呈极显著相关,吐丝期根长与玉米产量呈显著正相关,根表面积与玉米产量呈极显著正相关.3 个时期玉米根干质量与产量均呈极显著相关关系,且随着生育进程的推进相关系数呈升高趋势.通过栽培措施改善玉米根系生长状况,提高根系干质量,对玉米产量的提高具有重要作用.

3 讨 论

适宜的栽培措施可以促进玉米根系生长,提高水分利用效率,实现增产目标[15].覆膜是旱地作物常用的保水、保温措施,覆膜能促进根系生长,增加根系总生物量[16].垄作有改善土壤结构、降低土壤容重的作用,促进玉米根系向深处生长[5],有利于各土层根系干质量的增加[17].本研究表明,覆膜处理能极显著提高玉米的根长、根表面积、根体积和根干质量;覆膜条件下垄作垄播的根长、根表面积、根体积和根干质量均最高,垄作沟播最低;不覆膜条件下则相反,以垄作沟播最高,垄作垄播最低.覆膜可提高土壤水分含量[18],垄作后土壤耕层增厚[12],覆膜下垄作垄播更有利于根系生长;而不覆膜下土壤水分成为限制根系生长的主要因子,垄作沟播可提高玉米植株根系土壤水分含量[6-7],促进根系生长.可见,种植方式对玉米根系生长的作用受覆膜措施的影响而不同.

良好的根系分布有利于地上植株生长,不同土层根量是体现玉米根系分布的重要指标[19-21].由于川中丘陵区土壤黏重紧实,耕层浅,玉米根系主要分布在 0~40 cm 土层.这与北方地区玉米根系在垂直方向上分布更深不同[22].土壤耕层浅薄,质地黏重紧实可刺激上层根系生长[23-25].本研究区玉米根系主要集中在 0~20 cm 土层,占总根量的 80%左右.覆膜下各土层的根量较不覆膜显著增加,其中覆膜下垄作垄播处理的根量和根系在 20~40 cm 土层分配比例显著高于其他处理.覆膜对玉米根系水平分布影响显著,总体上覆膜显著提高了水平方向上各层次的根量和宽行 0~20 cm 根系分布比例,降低了宽行 20~40 cm 分布比例.覆膜下垄作垄播提高了宽行 20~40 cm 根量和分配比例;不覆膜下平作提高了宽行 20~40 cm 根量和分配比例,而垄作沟播提高了总根量.这主要是由于覆膜后土壤中较高的水分含量与温度对根系生长有显著的促进作用,结合垄作后土壤耕层增厚、土壤疏松,进一步促进了根系根量增加和根系在深层土壤中的分布;而不覆膜垄作沟播改善了土壤水分的供应效果,促进了根系生长.

玉米产量与根系形态和根量存在显著正相关关系.这与前人得出的玉米根长、根干质量与土壤水分、养分的吸收具有显著正相关关系[13,26],促进玉米生长的结论相符.另外,玉米根系的分布对玉米生长及产量形成具有重要作用[14,27-29],更多的深层和宽行土壤根系有利于玉米吸收更多的土壤水分和养分,保持根系对地上部营养和水分的供应,更有利于玉米获得高产.本研究表明,覆膜措施有利于玉米地下根系的生长和根系在土壤中的空间分布,促进了玉米穗部生长,减小了秃尖,增加了穗粒数和千粒重,显著提高了玉米产量.种植方式间产量表现受覆膜措施的影响而不同,垄作虽增加了耕层土壤,改善了土壤的通气性和疏松程度,但不覆膜情况下不利于保水,影响根系的生长;而不覆膜下垄作沟播可积蓄雨水,促进玉米根系生长;最终玉米产量覆膜下垄作垄播最高,而不覆膜下垄作沟播最高.

4 结 论

覆膜措施显著影响玉米根系分布特征和产量,而垄作等种植方式对根系和玉米产量的影响因覆膜与否而不同.在川中丘陵旱地,垄作垄播与覆膜相结

合有显著促进根系生长和提高根量的作用,有利于提高深层根系比例,进而提高根系对土壤空间的利用率,促进玉米植株生长和籽粒的灌浆结实,最终提高产量.在不覆膜条件下,垄作沟播可促进玉米根系的生长,进而促进玉米植株生长和提高产量.

参考文献

［1］ Weng L-Y (翁凌云). Study on the production status and development countermeasures of maize in China. *Food and Nutrition in China* (中国食物与营养), 2010 (1): 22-25 (in Chinese)

［2］ Liu D-H (刘定辉), Zhao B-J (赵燮京), Li Y (李勇), *et al*. Technology of efficient utilization and control measurements of soil-water resources in hilly area in southwest China. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2005, **18**(suppl.): 74-78 (in Chinese)

［3］ Dang J-Y (党建友), Zhang D-Y (张定一), Pei X-X (裴雪霞), *et al*. Moisture and temperature effects of different tillage and film-mulching techniques for spring maize in the gully region of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2006, **14**(3): 75-77 (in Chinese)

［4］ Liu M-X (刘目兴), Wang J-A (王静爱), Yan P (严平), *et al*. Field observation about the influence of ridge tillage on the growth of rape in rainfed cropland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2005, **23**(5): 1-6 (in Chinese)

［5］ Zhou S-M (周苏玫), Li C-H (李潮海), Chang S-M (常思敏), *et al*. Effects of ridge culture on summer maize ecological environment and growth development. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2000, **34**(3): 206-209 (in Chinese)

［6］ Han J, Jia ZK, Han QF, *et al*. Application of mulching materials of rainfall harvesting system for improving soil water and corn growth in Northwest of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**: 1712-1721

［7］ Bing H-Y (邴昊阳), Zhang Y (张　艳), Jia Z-K (贾志宽), *et al*. Effect of rainfall harvesting planting combined with water-saving irrigation on soil moisture and yield of spring corn. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2013, **32**(5): 30-33 (in Chinese)

［8］ Chen Y-Y (陈迎迎), Shen Y-F (沈玉芳), Bai X-B (白翔斌), *et al*. Effect of different nitrogen rates on nitrogen absorption and allocation of spring maize in double ridges mulched with plastic film. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2013, **33**(11): 2278-2285 (in Chinese)

［9］ Jia Z-K (贾志宽), Ren X-L (任小龙), Ding R-X (丁瑞霞). Study on Planting Technology of Dry Farmland in Root Catchment. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)

［10］ Liu X-W (刘晓伟), He B-L (何宝林), Guo T-W (郭天文), *et al*. Study on the different modes of plastic mulching for maize in the semiarid. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2012, **20**(2): 107-110 (in Chinese)

［11］ Song Z-W (宋振伟), Guo J-R (郭金瑞), Ren J (任军), *et al*. Effects of tillage patterns on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of maize in rainfed area of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(7): 1900-1906 (in Chinese)

［12］ Ma L (马　丽). Study on the Physiological and Ecological Effects of Wheat-Summer Maize Ridge. Master Thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008 (in Chinese)

［13］ Zhao M (赵　明). Crop Yield Performance and High Yield Technology. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese)

［14］ Wang X-B (王新兵), Hou H-P (侯海鹏), Zhou B-Y (周宝元), *et al*. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2014, **40**(12): 2136-2148 (in Chinese)

［15］ Liang J-F (梁金凤), Qi Q-Z (齐庆振), Jia X-H (贾小红), *et al*. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19**(4): 945-950 (in Chinese)

［16］ Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). The physiological characteristics of winter wheat roots and its spatial distribution under mulching plastic film condition. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24**(6): 1-6 (in Chinese)

［17］ Xu C-Z (徐成忠), Kong X-M (孔晓民), Wang C (王　超), *et al*. Effect of sowing in ridge on root system, leaves and yield components of summer maize. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2008, **16**(1): 101-103 (in Chinese)

［18］ Wang H-L (王红丽), Zhang X-C (张绪成), Song S-Y (宋尚有). Effects of mulching methods on soil water dynamics and corn yield of rain-fed corpland in the semi-arid area of China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(8): 825-833 (in Chinese)

［19］ Qi W-Z (齐文增), Liu H-H (刘惠惠), Li G (李耕), *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of super-high-yield summer maize root. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(1): 69-76 (in Chinese)

［20］ Wang Q (王　群), Li C-H (李潮海), Li Q-Z (李全忠), *et al*. Effect of soil compaction on spatio-temporal distribution and activities in maize under different soil types. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(10): 2039-2050 (in Chinese)

［21］ Qi H (齐　华), Liu M (刘　明), Zhang W-J (张卫建), *et al*. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2012, **27**(4): 191-196 (in Chinese)

［22］ Wang Q-X (王启现), Wang P (王　璞), Yang X-Y

(杨相勇), *et al*. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(12): 1469-1475 (in Chinese)

[23] Zhang R- F (张瑞富), Yang H-S (杨恒山), Gao J-L (高聚林), *et al*. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2015, **31**(5): 78-84 (in Chinese)

[24] Zhang Y-Q (张玉芹), Yang H-S (杨恒山), Gao J-L (高聚林), *et al*. Root characteristics of super high-yield spring maize. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(4): 735-743 (in Chinese)

[25] Fan X-Y (范秀艳), Yang H-S (杨恒山), Gao J-L (高聚林), *et al*. Effects of phosphorus application on root characteristics of super-high-yield spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(3): 562-570 (in Chinese)

[26] Mu Z-X (慕自新), Zhang S-Q (张岁岐), Hao W-F (郝文芳), *et al*. The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **35**(11): 103-108 (in Chinese)

[27] Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). Effects of root growing space of on maize: Its absorbing characteristics. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(8): 899-904 (in Chinese)

[28] Lu H-D (路海东), Xue J-Q (薛吉全), Ma G-S (马国胜), *et al*. Soil physical and chemical properties and root distribution in high yielding spring maize fields in Yulin, Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(4): 895-900 (in Chinese)

[29] Jackson RB, Sperry JS, Dawson TE. Root water uptake and transport: Using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, 2005, **10**: 44-50

作者简介 查 丽,女,1990 年生,硕士. 主要从事种植制度和区域农业理论与技术研究. E-mail: 610346478@ qq.com

责任编辑 张凤丽

查丽, 谢孟林, 朱敏, 等. 垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 855-862

Zha L, Xie M-L, Zhu M, *et al*. Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root distribution and yield of spring maize in hilly area of central Sichuan basin, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(3): 855-862 (in Chinese)