黄土高原半湿润农作区春玉米土壤环境和产量对种植方式的响应

邓浩亮[1]，张恒嘉[1]，田建良[1]，肖 让[1]，张永玲[1]，李福强[2]，王玉才[2]

(1.河西学院土木工程学院，甘肃 张掖 734000；2.甘肃农业大学水利水电工程学院，兰州 730070)

摘要：为探讨黄土高原半湿润易旱区不同种植方式对土壤水热环境及春玉米生长动态变化，于 2017—2018 年在甘肃华亭农技推广中心开展田间定位试验，设平地全膜覆盖(WM)、平地半膜覆盖(HM)、隔沟覆膜垄播(MRM)、全膜双垄沟播(WRF)、秸秆覆盖(SM)和露地平播(CK)6 种种植方式，测定分析了春玉米各生育时期土层剖面水热状况、作物生长特征及收获期作物产量与构成因子。结果表明：覆盖种植方式对土壤温度的调节主要表现在苗期，地膜覆盖处理较 CK 具有增温效应，全生育期土壤平均增温 1.44～2.62 ℃，而 SM 表现为降温效应，平均降温 0.51 ℃；MRM、WRF、HM 和 SM 在春玉米整个生育期内保墒效果显著，而 WM 不利于降水收集，仅在春玉米生长前期具有保墒效果，而在中后期随作物耗水增加，土壤含水率低于 CK；地膜覆盖种植方式较 CK 均可提高春玉米产量和水分利用效率，其中以 WRF 和 MRM 效果最为显著，产量和水分利用效率较 CK 分别提高 32.96%，17.12%和 33.45%，18.66%，而 SM 表现出减产效应，较对照分别降低 11.84%和 9.93%。综合考虑土壤水热环境、春玉米生长特征、产量、水分利用效率等指标，黄土高原半湿润易旱区最佳种植方式为隔沟覆膜垄播种植方式。研究结果为黄土高原半湿润易旱区合理地选择覆盖耕作措施提供理论依据，同时对农田可持续性具有重要意义。

关键词：种植方式；垄沟集雨；秸秆覆盖；土壤水分；土壤温度；玉米产量；黄土高原

中图分类号：S513；S344 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2019)05-0257-09

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.038

Response of Spring Maize Soil Environment and Yield to Planting Patterns in Semi-humid Region of the Loess Plateau

DENG Haoliang[1], ZHANG Hengjia[1], TIAN Jianliang[1],

XIAO Rang[1], ZHANG Yongling[1], LI Fuqiang[2], WANG Yucai[2]

(1.*College of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye, Gansu* 734000; 2.*College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070)

Abstract: In order to explore the dynamic changes of soil hydrothermal environment and spring maize growth under different planting patterns in semi-humid and drought-prone areas of the Loess Plateau, field positioning experiments were carried out in Huating Agricultural Technology Promotion Center of Gansu from 2017 to 2018, and six planting patterns were set up, which were flat seedbed with film mulching (WM), flat seedbed with half film mulching (HM), ridge-furrow with polyethylene film and straw mulching (MRM), ridge-furrow with full film mulching (WRF), ridge-furrow with straw mulching (SM) and flat seedbed without mulching (CK), and the water and heat status of soil profiles in different fertility period of spring maize, crop growth characteristics, crop yield and components during harvest period were measured and analyzed. The results showed that the regulation of mulching planting pattern on soil temperature was mainly manifested in the seedling stage. The film mulching treatment had a warming effect compared with CK. During the whole growth period, the average soil temperature increased by 1.44～2.62 ℃, while the SM showed a cooling effect, with an average temperature lowering of 0.51 ℃. MRM, WRF, HM and SM had significant effect on moisture conservation during the whole growth period of spring maize. While, WM was not conducive to precipitation collection, it only had the effect of moisture conservation at the early stage of spring maize growth, with the increasing of crop water consumption at the middle and later stages, the soil moisture con-

收稿日期：2019-03-21

资助项目：甘肃省高等学校科研项目(2016A-078)；甘肃省旱作农业节水技术推广与耕地质量提升技术研究项目(H2018005)；国家自然科学基金项目(51669001)；甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073)

第一作者：邓浩亮(1988－)，男，博士，主要从事北方旱区作物生产装备工程研究。E-mail：denghaoliang521@163.com

通信作者：张恒嘉(1974－)，男，教授，博士生导师，主要从事农业水土工程与农业生态研究。E-mail：zhanghj@gsau.edu.cn

tent was lower than CK. Compared with CK, the mulching method could increase the yield and water use efficiency of spring maize, among them, the WRF and MRM had the most significant effect. The yield and water use efficiency of WRF and MRM increased by 32.96% and 17.12%, 33.45% and 18.66%, respectively. SM showed a reduction in yield, which was 11.84% and 9.93% lower than CK. Considering the soil hydrothermal environment, spring maize growth characteristics, yield, water use efficiency and other indicators, the ridge-furrow with polyethylene film and straw mulching was the best planting pattern in the semi-humid and drought-prone areas of the Loess Plateau. This study could provide a theoretical basis for rational selection of cover farming measures in the semi-humid and drought-prone areas of the Loess Plateau, and had important significance for the sustainability of farmland.

Keywords: planting methods; ridge-furrow rainwater harvesting; straw mulching; soil moisture; soil temperature; maize yield; the Loess Plateau

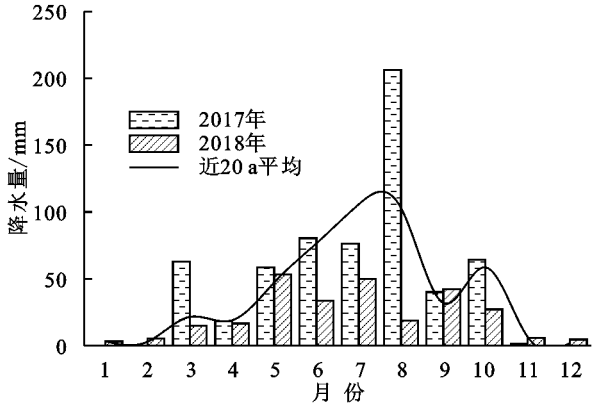
黄土高原包括甘肃、青海、宁夏、山西、陕西、内蒙、河南 7 省 285 个区县,总耕地面积 1 691 万 hm^2,是典型的雨养农业区,主要以粮食作物生产为主[1]。由于降雨时空分布不均,与作物需水之间供需错位,水土流失与风沙危害严重,土壤质量退化,与原生植被相伴的黑垆土几乎丧失殆尽,出现大面积有机质含量极低的黄绵土,造成粮食产量低而不稳,严重制约该地区的粮食生产和社会经济发展[2-3]。如何充分利用天然降雨、维持农田生态系统可持续性、确保粮食生产安全是长期以来难以解决的理论和实践难题,研发和推广高效、低廉的旱作栽培技术和耐旱作物品种是关键途径[4]。近年来,随着对黄土高原地区生态环境的关注,有关耕作和栽培模式的研究日益增多,栽培方式与土壤质量演化、土壤水热特性及农业可持续利用之间的关系较为密切[5-6]。合理地选择耕作和栽培措施可直接、有效地改变土壤水、肥、气、热的循环和供应,从而改善土壤结构,调节土壤肥力,提高田间土壤水分利用效率,促进农田生态系统的良性循环[7],有研究[8-9]发现。免耕覆盖具有增温、保墒、增加土壤有机质、增强微生物活性等作用,是旱作农业区增产的重要支撑,已在玉米、小麦、马铃薯等多种粮食及经济作物上广泛应用。在上世纪 80 年代,中国集水农业创始人——赵松龄教授[10]从首次系统地阐明适合西北地区集雨农业发展的新思路和新技术开始,田间微集雨技术在黄土高原雨养农业区经历了 30 年更新迭代,包括垄沟无覆盖、平地覆盖、垄沟半覆盖、垄沟全覆盖、免耕+秸秆覆盖等[11]。尤其是垄沟地膜全覆盖在近 10 年得到了长足发展,在甘肃推广面积已达 134 万 hm^2。目前研究者通过田间试验对不同种植模式下作物生长、产量和耗水特征进行了大量研究,然而研究结果根据区域、供试作物、管理措施等不同而有所差异,普遍认为采用地膜、秸秆等地面覆盖主要是通过集雨、保墒、增温、抑蒸等生态效应来提高产量。Li 等[12]研究指出,垄沟集雨种植方式可有效利用小于 5 mm 的无效降雨,其集雨效率能达到 87% 左右。周昌明[13]研究发现,与传统平作相比,垄沟集雨种植的蓄水效率可提高 8.2%~49.9%,平均贮水量提高 9.5%~13.2%,玉米增产 22.7%~41.4%,水分利用效率提高 32.5%~56.0%。孔维萍等[14]通过研究保护性耕作在黄土高原的应用和发展中指出,秸秆覆盖可减少土壤蒸发、保持土壤水分稳定性、提高表层土壤养分。然而长期单一的覆盖方式对作物生长也会产生一些弊端,例如膜下土壤易泥泞、板结,土壤深层水分耗竭严重,土壤肥力衰退,土地承载能力下降,秸秆覆盖降低土壤温度,影响出苗率[15]。随着黄土高原地区生态环境恶化和日益增加的粮食需求,该地区广泛推广的几种栽培方式对土壤耗水特性及作物农艺性状等影响亟待深入研究。基于此,本研究通过 2 年田间试验,研究 6 种种植方式下土壤剖面温度、水分分布与时间变化特点,以及对春玉米生长状况、产量和水分利用效率的影响,以期为黄土高原半湿润易旱区春玉米种植策略和农田可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年 4 月至 2018 年 10 月在甘肃省华亭市农业技术推广中心(106°65′E,35°21′N)进行。试验区属典型黄土高原半湿润易旱区,地势平坦、土层深厚,海拔约 1 485.2 m,年均气温 7.9 ℃,最高气温出现在 7 月,平均值为 20.19 ℃,最低气温出现在 1 月,平均气温 -6.14 ℃,≥10 ℃ 年均积温 2 670 ℃,无霜期 168 d,年均日照时间 2 136 h,年均降水量 579.6 mm,主要集中在 6—9 月,年蒸发量 1 338.4 mm,试验期降水量和气温状况见图 1。试验区土壤类型为黄绵土,肥力均匀,0—20 cm 土层基本理化性质为:土壤容重为 1.38 g/cm^3,有机质含量为 14.33 g/kg,全氮含量为 1.01 g/kg,全磷含量为 2.77 g/kg,碱解氮含量为 73.69 g/kg,速效磷含量为 25.04 g/kg,速效钾含量为 241.87 g/kg,pH 为 7.4。主要作物种植

模式为冬小麦－春玉米一年一熟制,无灌溉措施,为典型雨养农业区。



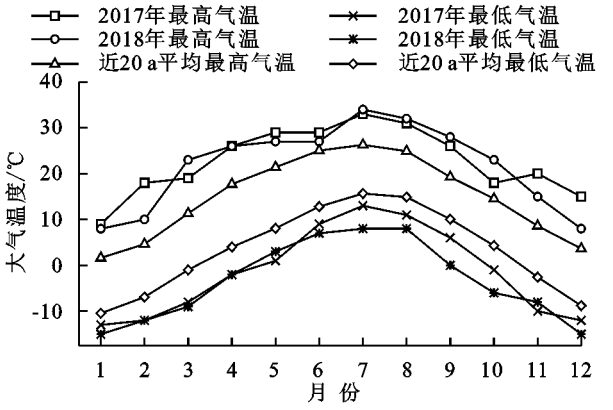


图 1　试验期各月降水量与月最低、最高气温

1.2　试验设计

供试作物为春玉米,品种为"金凯 3 号"。本研究设置平地全膜覆盖(WM)、平地半膜覆盖(HM)、全膜双垄沟播(WRF)、隔沟覆膜垄播(MRM)、秸秆垄沟覆盖(SM)、露地平播(CK)6 个处理,每个处理重复 3 次,共 18 个小区,小区面积 5 m×15 m,采用区组随机排列。播前均匀撒肥并进行机械翻耕(深度 30 cm),底肥肥料种类为尿素、磷酸二铵、复合肥,其中 N 总量为 276 kg/hm^2,P_2O_5 总量为 72 kg/hm^2,K_2O 总量为 75 kg/hm^2。东西行向,人工播种,播种密度为 50 400 株/hm^2。2 年的播种日期均为 4 月下旬,收获日期在 10 月 5—10 日。试验期内各小区均无灌水处理,人工除草,各处理其他农艺措施具体见表 1。

表 1　试验设计

处理	代码	方法
平地全膜覆盖	WM	选用 120 cm 宽的地膜覆盖,膜与膜之间无空隙,相互重叠大约 5 cm,相接处用土压实,采用等行间距播种方式
平地半膜覆盖	HM	选用 120 cm 宽的地膜覆盖,膜间距 40 cm,每幅垄播种 3 行,播种位置为垄幅两侧与中间 70 cm 处
隔沟覆膜垄播	MRM	垄幅宽均为 35 cm、高 15 cm,垄幅两边分别形成明沟和暗沟,沟宽 20 cm,在明沟内覆盖麦草
全膜双垄沟播	WRF	每垄幅宽 110 cm,分大小两垄,大垄宽 70 cm、高 10 cm,小垄宽 40 cm、高 15 cm,薄膜宽度 120 cm,膜与膜之间无空隙,相接处用土压实,播种位置为大小垄相接处
秸秆垄沟覆盖	SM	起垄同 WRF 处理,用小麦秸秆进行全覆盖,按 4 000 kg/hm^2 的比例均匀覆盖,在大小垄相接处沟内穴播点种
露地平播	CK	采用等行间距播种方式,无覆盖

1.3　测定项目与方法

(1)试验前对土壤基本理化性质进行测定,测定土层厚度为 0—20 cm 土层。其中土壤容重采用环刀法测定,土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,土壤全磷含量采用硫酸－高氯酸消煮法测定,土壤碱解氮含量采用丙三醇替代碱性胶液法测定,土壤速效钾含量采用 NH_4OAc 浸提法测定,土壤速效磷含量采用碳酸氢钠法[16]测定。

(2)土壤温度采用直角水银地温计(－30～50 ℃、精度 1 ℃)进行测定,每个小区布置 3 套,采集位点为 2 株玉米中间,测定土层厚度分别为 5,10,15,20,25 cm。测定时间为播种至成熟期,每个生育期连续测定 5 天,每天分别在 8:00、14:00 和 20:00 进行采集。

(3)出苗率通过统计计算,当各小区玉米生长达到"三叶一心"时进行观察记录。统计各小区实际出苗数,并根据公式(1)计算出苗率,并对每个处理的 3 次重复求平均值。

$$出苗率(\%)=实际出苗数/实际播种数量\times 100\% \quad (1)$$

(4)叶面积扩展速率是衡量玉米叶面积在单位时间增加或减小速率的指标。待出苗后每个小区选取 5 株长势均匀一致植株叶片进行挂牌标记,播种后 15 天开始测定标记叶片的展开长、宽,每隔 15 天测定 1 次,至收获时结束,并根据公式(2)计算叶面积扩展速率。

$$LGR=(Q_2-Q_1)/\Delta D \quad (2)$$

式中:LGR 为叶面积扩展速率(cm^2/d);Q_1、Q_2 分别间隔测定的叶面积(cm^2);ΔD 为间隔测定时间(d)。

其中玉米植株的叶面积根据公式(3)计算得到。

$$Q=0.75L\times B \quad (3)$$

式中:L 为叶片长(cm);B 为叶片宽(cm)。

(5)根冠比是指地下和地上生物量的比值,在收获时从小区随机选取 5 株长势均匀植株,整株挖出,去除泥土,并从茎基部剪断,将样本标记并置于烘箱,

先 105 ℃杀青，再以 80 ℃恒温烘 48 h，烘至恒重后分别称取根、冠干物质量，最后进行比值计算。

(6)土壤含水率采用土钻烘干法，取样深度为 0—100 cm 土层，以 20 cm 为梯度取样，取样时间从播种前一天开始，每隔 15 天测定 1 次，每小区重复 3 次。播种前和收获后的土壤贮水量通过公式(4)进行计算。

$$W=10\sum_{i=1}^{n}\rho_i H\varphi_i \tag{4}$$

式中：W 为土壤贮水量(mm)；ρ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3)；H 为土层厚度(cm)；φ_i 为第 i 土层土壤含水率(%)。

(7)产量及其构成因子，待玉米达到生理成熟时，按小区随机选取 20 株进行收获，剔除边行植株，最后在室内人工考种，测定植株茎粗、株高、穗粒数、百粒重、产量等指标。

(8)作物耗水量与水分利用效率分别通过公式(5)和(6)进行计算。

$$ET=\Delta W+P+U+I-R-F \tag{5}$$

式中：ET 为作物耗水量(mm)；ΔW 为收后和播前 0—100 cm 土壤贮水量的差值(mm)；P 为生育期内降雨量(mm)；U 为地下水补给量(mm)；I 为生育期内灌水量(mm)；R 为地表径流量(mm)；F 为深层渗透量(mm)。由于生育期内无灌溉，试验区地势平坦、且处于黄土高原，地下水较深，因此不考虑灌溉、地表径流、地下水补给、深层渗透对作物耗水量的影响，其值等于 0。

$$\mathrm{WUE}=Y/ET \tag{6}$$

式中：WUE 为作物水分利用效率(kg/(hm^2 · mm))；Y 为作物产量(kg/hm^2)。

2 结果与分析

2.1 种植方式对土壤温度的影响

不同处理各生育期平均土壤温度和变化幅度分别见表 2 和表 3。可以看出，土壤温度随生育时段的递增呈逐渐降低趋势，其中拔节期至抽雄期土壤温度变化幅度较小，而其他生育期间土壤平均温度差异显著($P<0.05$)。地膜覆盖处理较 CK 具有增温效应，其中 MRM 增温效应最显著，2017 年和 2018 年平均增幅达 2.42，2.39 ℃，其次为 WM(1.95，1.92 ℃)、HM(1.64，1.35 ℃)、WRF(1.46，1.53 ℃)，而 SM 处理表现为降温效应，2017 年和 2018 年降温幅度分别为0.83，0.72 ℃，说明在半湿润易旱区覆膜有利于提高土壤温度，而秸秆覆盖抑制土壤温度升高，这与秸秆覆盖阻断了土壤对太阳辐射的吸收和热量传导有关。就整个生育期土壤温度变化而言，地膜覆盖增温效应可持续整个生育期，但在春玉米生长前期(苗期)增温效应最为显著，增幅可达 3.15～4.69 ℃，其余生育期增幅较小，为 0.40～2.44 ℃。秸秆覆盖在春玉米整个生长阶段表现为降温效应，与地膜覆盖增温效应相似，秸秆覆盖在春玉米生长前期(苗期)降温最为显著，降幅可达 1.67 ℃，其余生育期降幅较小，为 0.41～0.77 ℃。不同处理在春玉米全生育期内土壤温度的离散程度无显著差异，但不同降水年际间差异显著，2017 年变异系数为 22.05%～25.25%，2018 年为 15.83%～17.51%，可以看出年际间降雨量对土壤温度波动影响显著，土壤温度随降雨量增多而趋于平缓。

表 2 不同种植方式下春玉米不同生育期 0—25 cm 土层平均土壤温度 单位：℃

年份	处理	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	平均值	CV_s/%
	WM	31.51a	27.37ab	27.64a	20.13a	16.26ab	24.58	25.25
	HM	30.76ab	27.20ab	27.32a	19.95a	16.11ab	24.27	24.82
	MRM	31.83a	28.02a	27.80a	20.88a	16.71a	25.05	24.39
	WRF	30.26b	27.00b	26.92ab	19.77a	16.49a	24.09	23.75
2017	SM	24.98d	25.17c	25.43c	18.41b	15.00c	21.80	22.05
	CK	26.97c	25.76c	26.07bc	18.73b	15.62bc	22.63	22.62
	平均值	29.38	26.75	26.86	19.64	16.03		
	CV_t/%	9.44	4.00	3.48	4.67	3.92		
	极差	6.86	2.84	2.37	2.46	1.71		
	WM	28.55a	28.25b	23.41ab	23.03a	18.27a	24.30	17.51
	HM	26.57b	28.02b	23.25ab	22.93a	17.90ab	23.73	16.50
	MRM	28.14a	29.32a	24.00a	23.77a	18.64a	24.77	17.04
	WRF	26.73b	28.37ab	23.19ab	23.53a	17.73ab	23.91	17.08
2018	SM	22.37d	26.02c	22.09c	21.02b	16.81c	21.66	15.25
	CK	23.72c	26.71c	22.85bc	21.64b	17.00bc	22.38	15.83
	平均值	26.01	27.78	23.13	22.65	17.73		
	CV_t/%	9.47	4.33	2.74	4.80	4.01		
	极差	6.18	3.30	1.91	2.75	1.83		

注：同列不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

表 3　不同种植方式相比对照 0—25 cm 土层平均增温幅度

单位:℃

年份	处理	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	平均
2017	WM	4.54	1.61	1.57	1.81	1.26	2.16
	HM	3.79	1.44	1.24	1.62	1.11	1.84
	MRM	4.86	2.25	1.72	2.55	1.70	2.62
	WRF	3.29	1.24	0.85	1.44	1.49	1.66
	SM	−1.99	−0.59	−0.64	0.09	−0.01	−0.63
2018	WM	4.83	1.84	1.03	1.38	1.27	2.07
	HM	2.85	1.61	0.87	1.28	0.60	1.44
	MRM	4.42	2.91	1.62	2.12	1.64	2.54
	WRF	3.02	1.96	0.81	1.89	0.73	1.68
	SM	−1.35	−0.39	−0.29	0.05	0.06	−0.38

2.2　不同种植模式下土壤水分生育期变化特征

2017 年和 2018 年春玉米全生育期 0—100 cm 土层土壤平均含水率变化见图 2。从图 2 可以看出,所有处理水分变化趋势较为一致,播种期至苗期土壤水分逐渐增加且在 20 天左右时达到最大峰值,所有覆盖处理与 CK 相比,在苗期保墒效果显著,2017 年保墒效果依次为 HM>WRF>MRM>WM>SM,较 CK 分别提高 20.46%,16.15%,15.92%,10.09%,10.07%,且达到显著水平($P<0.05$),而 2018 年由于降水充沛,覆盖处理与 CK 间无显著差异($P>0.05$);随着大气温度逐渐升高,蒸发量增大,作物耗水增多,各处理土壤含水率显著下降,2017 年土壤含水率在 90 天时达到最低,为 8.45%～9.38%,2018 年土壤含水率在 105 天时最低,为 15.17%～18.34%,该时段内秸秆覆盖保墒效果优于地膜覆盖;105 天之后进入雨季,降水增多,土壤含水率开始递增。整体而言,HM、WRF、MRM 和 SM 较 CK 保墒效果显著,而 WM 不利于降水收集,仅在春玉米生长前期保墒效果显著,而在中后期随作物耗水增加,土壤含水率低于 CK。

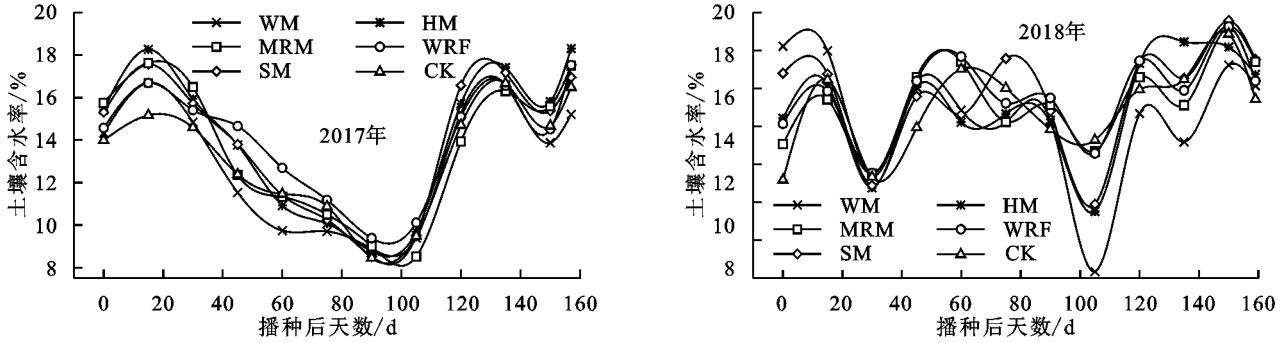


图 2　不同种植方式全生育期 0—100 cm 土层平均土壤含水率动态变化

2.3　种植方式对春玉米生长特征的影响

2.3.1　出苗率　春玉米出苗率对产量影响较大,2017 年和 2018 年不同种植方式下春玉米出苗率见图 3。2 年所有处理平均出苗率以 WRF 最高,达 98.8%,其次为 MRM(97.4%)、HM(97.3%)和 WM(97.0%),SM 出苗率最低,仅为 92.0%,说明地膜覆盖增温保墒有利于种子萌发,而秸秆覆盖产生抑制效应。可以看出,除秸秆覆盖处理以外,其他处理出苗率较高且无显著差异($P>0.05$)。通过年际间分析可以看出,2018 年的出苗率略高于 2017 年,这与 2018 年播前土壤底墒足,积温高等有关。

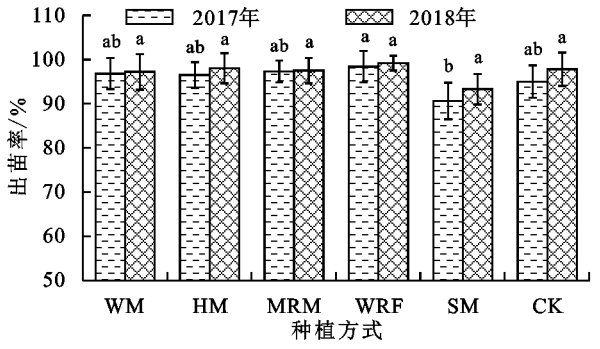


图 3　不同种植方式下春玉米出苗率的差异

2.3.2　根冠比　根冠比是指作物地下和地上生物量的比值,是衡量作物地下和地上部分是否协调生长的重要指标。根系是作物吸收营养物质的主要器官,也是养分和水分在植物体内运输的重要部位,在苗期根冠比越大,有利于作物对养分的吸收,但在生长后期,根冠比维持在较低水平,可以抑制光合产物向根系转移,有利于作物生殖生长。2017 年和 2018 年不同种植方式下春玉米收获期根冠比见图 4。2017 年所有处理收获后根冠比以 CK 最大,达 0.136,其次为 SM(0.132)、WM(0.132)、MRM(0.124)和 WRF(0.122),HM 根冠比最小,仅为 0.118,显著小于 CK、SM、WM 和 MRM 处理,WM、MRM、SM 与 CK 处理间根冠比无显著差异($P>0.05$);2018 年所有处理收获后根冠比以 WRF 最大,达 0.158,其次为 HM(0.154)、MRM(0.146)、WM(0.136)和 CK(0.134),SM 根冠比最小,仅为 0.122,显著小于其他处理。通过不同年际间比较,说明在平水年,地表覆盖可降低春玉米根冠比,而在丰水年,垄沟地膜覆盖能够显著增加春玉米根冠比,但秸秆覆盖不利于根冠比的提高。2018 年春玉米根冠比显著大于 2017 年,说明不同年份间降雨量对春玉米根冠比影响显著。

2.3.3　叶面积扩展速率　作物叶片的生长对外界环境反应极为敏感,叶面积扩展速率不仅能够体现作物

生长快慢，也可反映作物对生长环境的响应。由图 5 可知，春玉米叶面积生长进程主要有 4 个阶段：第 1 阶段为缓慢增长阶段（叶片展开后缓慢生长）；第 2 阶段为指数增长阶段（叶片生长迅速，叶面积指数显著增加）；第 3 阶段为线性增长阶段（当叶面积扩展速率达到顶峰后，叶面积增加开始减缓，直至叶片停止生长）；第 4 阶段为线性减少阶段（当叶面积达到最大值后逐渐枯萎）。在缓慢增长阶段，各处理间叶面积扩展速率无显著差异，随着生育进程的推进差异逐渐显著，在 60～80 天时叶面积扩展速率差异达到最大，且所有覆膜处理和 CK 的叶面积扩展速率达到峰值时间一致，而秸秆覆盖达到峰值的日期有所延后。2 年叶面积平均扩展速率在增加阶段大小顺序为 MRM＞WRF＞WM＞HM＞CK＞SM，而在减少阶段则相反。

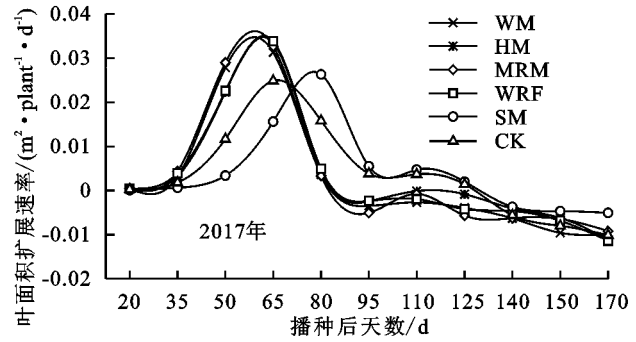


图 5 不同种植方式下春玉米叶面积扩展速率动态变化

整个生育期 2017 和 2018 年叶片扩展速率平均值分别为 0.002 75～0.004 06 m²/(株·d)和 0.00 238～0.00 478 m²/(株·d)，2 年间春玉米叶面积扩展速率无显著变化，说明叶面积扩展速率受年际差异的影响较小。

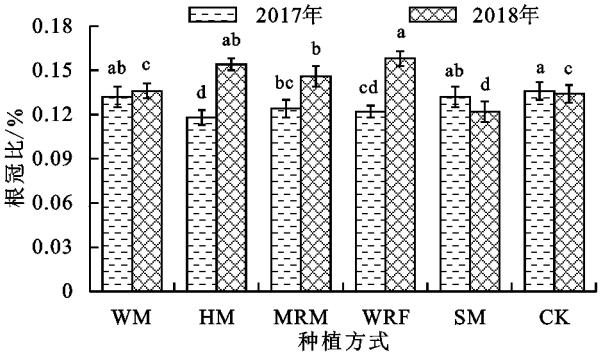


图 4 不同种植方式下春玉米根冠比的差异

2.3.4 地上生物量 不同种植方式下春玉米收获后地上生物量见图 6。2 年所有处理平均地上生物量以 MRM 最大，达 24 885.48 kg/hm²，其次为 WRF（24 083.14 kg/hm²）、HM（23 845.48 kg/hm²）、WM（22 840.52 kg/hm²）和 CK（21 377.60 kg/hm²），处理 MRM、WRF、HM、WM 分别较 CK 地上生物量显著增加 16.41%，12.66%，11.54%，6.84%（$P<0.05$），说明地膜覆盖能够促进地上生物量积累，其中尤以垄沟地膜覆盖最为显著。SM 地上生物量最小，2 年平均仅为 20 399.00 kg/hm²，较 CK 减少 4.58%，但与 CK 间无显著差异（$P>0.05$）。通过年际间比较可以看出，垄沟地膜覆盖处理 2018 年地上生物量低于 2017 年，这与 2018 年降雨充足，高土壤水分含量导致土壤温度降低有关，垄沟覆盖并未表现出较强的增温效应，而秸秆覆盖和露地平种 2018 年地上生物量高于 2017 年，这是由于 2018 年降雨充沛，土壤供水能力强，玉米生长旺盛，说明不同种植方式下年份间降雨量对地上生物量影响较大。

2.4 种植方式对春玉米耗水量、产量及水分利用效率的影响

由表 4 可知，不同降雨年份各处理间耗水量差异不同。2017 年，WM 与 WRF、SM、CK 耗水量差异显著（$P<0.05$），与 CK 相比，地膜覆盖处理耗水量均有所提高，耗水量大小依次为 WM＞MRM＞HM＞WRF，较 CK 分别增加 5.86%，2.26%，1.49%，0.66%，而 SM 处理耗水量较 CK 减少 1.41%。不同种植方式间产量差异显著（$P<0.05$），其中以 MRM 最大，达 9 974.87 kg/hm²，其次为 HM、WRF、WM，处理 MRM、HM、WRF、WM 产量分别较 CK 显著增加 40.61%，23.42%，22.49%，16.39%，而 SM 表现出减产效应，产量最小，仅为 6 309.51 kg/hm²，较 CK 显著降低 11.06%。不同种植方式间水分利用效率变化趋势和产量表现趋势基本一致，大小依次为 MRM＞WRF＞HM＞WM＞CK＞SM，与 CK 相比，地膜覆盖均可显著提高水分利用效率，提高幅度为 9.97%～40.61%，而秸秆覆盖不利于水分利用效率的提高，较 CK 减少 9.76%。2018 年，WM 与 MRM、WRF、SM、CK 耗水量差异显著（$P<0.05$），与 2017 年不同，耗水量大小依次 WM＞HM＞CK＞MRM＞WRF＞SM，平地覆膜处理 WM 和 HM 较 CK 耗水量均有所增加，增幅分别为 4.72%（$P<0.05$）和 1.30%（$P>0.05$），而 MRM、WRF、SM 处理耗水量较 CK 分别减少 1.83%，2.22%，2.72%，无显著差异（$P>0.05$）。产量和水分利用效率差异及排序与 2017 年

基本一致，与 CK 相比，地膜覆盖处理可增产 4.85%～26.20%，提高水分利用效率 0.14%～28.58%。所有覆盖处理中 MRM 依然表现出高产量和高水分利用效率优势，其次为 HM、WRF、WM，而 SM 对产量和水分利用效率产生负效应，较 CK 分别降低 12.52%，10.05%。比较发现，种植方式对黄土高原半湿润易旱区春玉米产量和水分利用效率影响显著，且该地区地膜覆盖增产和提高水分利用效果显著优于秸秆覆盖。

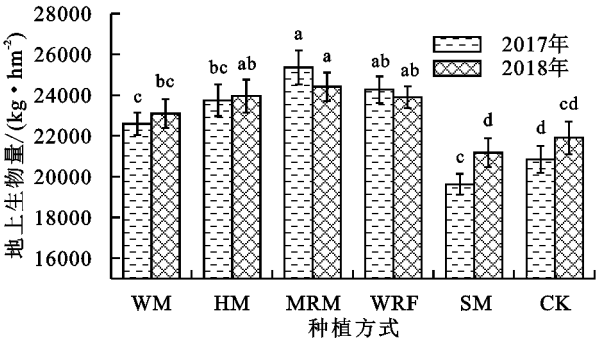


图 6　不同种植方式下春玉米地上生物量的差异

表 4　不同种植方式下春玉米耗水量、产量和水分利用效率的差异

年份	种植方式	耗水量/mm	产量/(kg·hm⁻²)	水分利用效率/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)	较对照		
					耗水量/%	产量/%	水分利用效率/%
2017	WM	480.36a	8256.66c	17.19c	5.86	16.39	9.97
	HM	460.52ab	8755.31b	19.01b	1.49	23.42	21.64
	MRM	464.00ab	9974.87a	21.50a	2.26	40.61	37.54
	WRF	456.75b	8689.49bc	19.02b	0.66	22.49	21.72
	SM	447.35b	6309.51e	14.10e	−1.41	−11.06	−9.76
	CK	453.76b	7094.05d	15.63d			
	平均值	460.46	8179.98	17.74			
	CV/%	2.46	15.94	14.98			
2018	WM	659.41a	8426.18c	12.78c	4.72	4.85	0.14
	HM	637.88ab	9354.04b	14.66b	1.30	16.39	14.92
	MRM	618.15c	10142.17a	16.41a	−1.83	26.20	28.58
	WRF	615.70c	9031.16bc	14.67b	−2.22	12.38	14.95
	SM	612.55c	7030.30e	11.48d	−2.72	−12.52	−10.05
	CK	629.70bc	8036.50d	12.76c			
	平均值	628.90	8670.06	13.79			
	CV/%	2.82	12.54	12.89			

2.5　各指标相关性分析

耗水量（*ET*）与株高（*PH*）、茎粗（*SD*）、穗粒数（SPE）、百粒重（HGW）、水分利用效率（WUE）、地上生物量（*B*）、秸秆产量（*SY*）、产量（*Y*）等各指标相关性分析结果见表 5。受种植方式的影响，整个生育期 *ET* 与 *PH*、SPE、HGW、*Y* 均呈显著正相关（$P<0.01$ 或 $P<0.05$），相关系数 r 分别为 0.783，0.696，0.866，0.581，这说明春玉米生育期耗水量对株高、穗粒数、百粒重、产量影响显著。*ET* 与 WUE 呈显著负相关（$P<0.05$），r 为 −0.642，即耗水量越多，水分利用效率越低。此外春玉米形态指标 PH 与 SPE、HGW 呈极显著正相关（$P<0.01$），r 分别为 0.873，0.858，与 *B* 呈显著负相关（$P<0.05$），r 为 −0.619。春玉米产量与 SPE、HGW、WUE 均呈显著正相关，r 分别为 0.629，0.797，0.533，由此可进行产量的预测和评估。

表 5　春玉米产量形成因素与耗水量之间相关性

指标	*PH*	*SD*	SPE	HGW	WUE	*B*	*SY*	*Y*	*ET*
PH	1								
SD	−0.018	1							
SPE	0.873**	−0.091	1						
HGW	0.858**	−0.153	0.698*	1					
WUE	−0.185	0.804**	−0.205	−0.196	1				
B	−0.619*	0.632*	−0.596*	−0.642*	0.850**	1			
SY	0.097	0.364	−0.010	0.322	0.650*	0.420	1		
Y	0.383	−0.161	0.629*	0.797*	0.533*	−0.150	0.018	1	
ET	0.783**	−0.199	0.696*	0.866**	−0.642*	−0.221	−0.067	0.581*	1

注：*PH* 为株高；*SD* 为茎粗；SPE 为穗粒数；HGW 为百粒重；WUE 为水分利用效率；*B* 为地上生物量；*SY* 为秸秆产量；*Y* 为产量；*ET* 为耗水量；** 表示相关程度在 $P<0.01$ 显著性水平；* 表示相关程度在 $P<0.05$ 显著性水平。

3 讨 论

自 20 世纪 80 年代开始,地膜覆盖对黄土高原旱作农业高产和稳产做出了重大贡献,垄沟覆膜栽培技术尤为显著,但长期、连续、单一的耕作模式导致作物早衰,产量增幅下降,土壤生态环境恶化[17]。已有研究[18]表明,覆膜增产以过度消耗土壤中的水分和养分为代价,且随着长期连续耕作,土壤耗水量和耗水深度也逐渐增加,造成深层土壤干燥化,严重阻隔了土层间水气交换,这种恶性循环给农业可持续生产带来了巨大的挑战。土壤水分也是影响作物生长和产量的重要环境因子之一,在雨养农业区主要受降雨、地表覆盖物类型和作物需水等因素影响。垄沟覆盖集雨栽培系统通过垄面产流、沟内集流,使有限降水得到高效利用,同时地表覆盖可以显著抑制水分蒸发[19]。本研究发现,所有覆盖处理与 CK 相比,保水效果显著,其中地膜覆盖在苗期保墒效果优于秸秆覆盖,而在中后期则表现为秸秆覆盖优于地膜覆盖,这可能是由于玉米生育期前期降水少,秸秆覆盖增加了地表粗糙度,减缓了雨滴流速,集雨效果低于垄沟覆膜,而玉米生长后期降水充足,秸秆覆盖能够显著提高降雨入渗量,同时改变了土壤结构,增加了土壤的导水功能[20]。

土壤温度直接影响着作物的生长、发育和土壤中各种生物化学过程,普遍认为覆膜栽培对表层土壤增温效应显著,尤其在作物苗期,通过降低黄土高原昼夜温差,促进种子正常萌发和生长[21],这与本研究结果一致。与传统露地平种相比,覆膜种植玉米苗期平均增温 4.12 ℃,其他生育期平均增温 1.51 ℃,这是由于地膜覆盖后与土壤表层形成“温室”,夜间“温室”内水分能有效减少长波辐射从而减小降温幅度。而秸秆覆盖表现出降温效应,苗期降温幅度达 1.67 ℃,不利于黄土高原地区春播作物出苗、建苗、壮苗,而且影响作物后期生长发育,延迟生育时长。同时有研究[11]发现,秸秆覆盖具有调节地表温度敏感性的作用,本研究中整个生育期秸秆覆盖变异系数最低,平均为 18.65%,进一步证实了之前的研究结论。

种植方式改善了作物生长土壤环境,造成作物耗水量、产量和水分利用效率有所差异,为了寻求黄土高原春玉米最优水分生产函数模型,使有限水资源利用最大化,Lin 等[22]提出了 Y/ET 边界方程概念并建立了黄土高原春玉米 Y/ET 边界方程,表明露地和覆膜的潜在水分利用效率分别为 4.75,6.05 kg/m^3,说明覆膜处理可以显著提高水分利用效率。覆膜处理在旱作农业区增产效果已经毋庸置疑,本研究中覆膜较露地产量增幅达 16.39%~40.61%,但同时耗水量也相应增加 0.66%~5.86%,这与谢军红等[23]研究结果一致。通过产量和耗水量数据计算得到黄土高原半湿润易旱区在不同覆膜种植方式下水分利用效率较 CK 可提高 9.87%~37.54%,这与以往研究结果较为一致。秸秆覆盖培肥地力的观点已经被普遍接受,但对作物产量影响观点不一,邱野等[20]利用秸秆覆盖大豆发现,与露地相比,大豆产量和水分利用效率分别增加 26.74%和 20.61%,但殷涛等[24]对春玉米秸秆覆盖和传统露地耕作种植比较发现,秸秆覆盖能够显著改善土壤水分条件,但由于早春土壤温度较低,作物出苗困难,最终导致产量降低,这与本研究结果一致,秸秆覆盖较露地平种春玉米减产 11.06%,水分利用效率减少 9.76%。因此,秸秆覆盖是否具有增产效应可能与种植作物品种有关,也可能与秸秆覆盖量、粉碎程度有关,还需进一步验证。

4 结 论

(1)黄土高原半湿润易旱区种植方式对土壤温度调节效应主要表现在春玉米生长前期(苗期),全生育期所有覆膜方式平均土壤温度较对照增加 1.44~2.62 ℃,而秸秆覆盖呈降温效应,平均降温 0.51 ℃。

(2)垄沟地膜覆盖、平地半膜覆盖和秸秆覆盖方式在春玉米整个生育期内保墒效果显著,而平地全膜覆盖不利于降水收集,仅在春玉米生长前期具有保墒效果,而在中后期随作物耗水增加,土壤含水率低于露地平种。

(3)地膜覆盖种植方式能够提高春玉米种子出苗率,较对照增加 0.6%~2.4%,而秸秆覆盖较对照降低 4.4%,但各种植方式间无显著差异。

(4)地膜覆盖种植方式可提高春玉米叶面积扩展速率,促进地上生物量积累,分别较对照显著增加 39.56%~63.72%和 6.84%~16.41%,而秸秆覆盖降低了叶面积扩展速率,延迟叶片生长,不利于地上生物量积累,分别较对照降低 45.68%和 4.58%。

(5)地膜覆盖种植方式较对照均可提高春玉米产量和水分利用效率,其中以 MRM 和 WRF 效果最为显著,产量和水分利用效率较对照分别提高 32.96%,17.12%和 33.45%,18.66%,而 SM 表现出降低趋势,较对照降低 11.84%和 9.93%。

综合考虑土壤水热环境、春玉米生长特征、产量、水分利用效率等指标,黄土高原半湿润易旱区最佳种植方式为隔沟覆膜垄播种植方式。然而,本试验只对土壤水热环境进行了分析研究,而隔沟覆膜垄播种植方式对土壤质量的影响是否更具有优势还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 俄胜哲，丁宁平，李利利，等.黄土高原黑垆土施肥的作物累积产量及土壤肥力贡献[J].土壤学报，2018，59(1)：1-13.

[2] 罗珠珠，黄高宝，蔡立群，等.黄土高原旱地土壤质量评价指标研究[J].中国生态农业学报，2012，20(2)：127-137.

[3] Zhou L M，Jin S L，Liu C A，et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interaction：Opportunities and challenges in a semiarid agro-ecosystem [J]. Field Crops Research，2012，126：181-188.

[4] 孙东宝.北方旱作区作物产量和水肥利用特征与提升途径[D].北京：中国农业大学，2017.

[5] Page K，Fang Y，Dalal R. Impacts of conservation tillage on soil quality，including soil-borne crop diseases，with a focus semi-arid grain cropping systems [J]. Australasian Plant Pathology，2013，42(3)：363-377.

[6] 庞绪，何文清，严昌荣，等.耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响[J].生态学报，2013，33(4)：1308-1316.

[7] 张涛，孙伟，孙步功，等.不同种植模式下旱地春玉米产量对降雨和气温变化的响应[J].农业工程学报，2017，33(20)：127-135.

[8] Wang X K，Li Z B，Xing Y Y，et al. Effects of mulching and nitrogen on soil temperature，water content，nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management，2015，161(1)：53-64.

[9] Zhao H，Xiong Y C，Li F M，et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem [J]. Agricultural Water Management，2012，104(2)：68-78.

[10] 赵松岭.集水农业引论[M].西安：陕西科学技术出版社，1996：1-20.

[11] 莫非，周宏，王建永，等.田间微集雨技术研究及应用[J].农业工程学报，2013，29(8)：1-17.

[12] 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 [J]. Agricultural Water Management，2002，54(3)：243-254.

[13] 周昌明.地膜覆盖及种植方式对土壤水氮利用及夏玉米生长、产量的影响[D].陕西 杨凌：西北农林科技大学，2016.

[14] 孔维萍，成自勇，张芮，等.保护性耕作在黄土高原的应用和发展[J].干旱区研究，2015，32(2)：240-250.

[15] 杜社妮，白岗栓，于健，等.沙封覆膜种植孔促进盐碱地油葵生长[J].农业工程学报，2014，30(5)：82-90.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[J].北京：中国农业出版社，2000.

[17] 郭天文，谢永春，张平良，等.不同种植和施肥方式对旱地春玉米土壤水分含量及其水分利用效率的影响[J].水土保持学报，2015，29(5)：231-238.

[18] 张绪成，宋尚有，王红丽.半干旱区旱地不同覆盖种植方式玉米田的土壤水分和产量效应[J].植物生态学报，2011，35(8)：825-833.

[19] 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及展望[J].干旱地区农业研究，2010，28(3)：83-89.

[20] 邱野，王瑄.耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J].农业工程学报，2018，34(22)：128-137.

[21] 陈玉章，柴守玺，范颖丹，等.覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J].中国农业气象，2014，35(4)：403-409.

[22] Lin W，Liu W Z. Establishment and application of spring maize yield to evapotranspiration boundary function in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management，2016，178：345-349.

[23] 谢军红，李玲玲，张仁陟，等.一膜两年覆盖条件下耕作方法对旱作玉米产量及土壤物理性状的影响[J].水土保持学报，2016，30(3)：184-189.

[24] 殷涛，何文清，严昌荣，等.地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J].农业工程学报，2014，30(19)：78-87.