

秸秆量对垄沟二元覆盖夏玉米农田耗水及产量的影响

申胜龙^{1,2},李援农^{1,2},银敏华^{1,2},张 敏^{1,2},方 恒^{1,2}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:于 2015—2016 年通过两年夏玉米大田试验,设置 4 个秸秆覆盖量水平 2 500、5 000、7 500、10 000 kg · hm⁻²(分别记为 M1、M2、M3、M4),以不覆盖秸秆为对照(CK),探索了垄沟二元覆盖下不同秸秆量对土壤水分及夏玉米生育期耗水量、干物质累积量、产量及水分利用效率的影响。结果表明:与 CK 相比,4 个处理均增大了玉米生育期耗水量,2a 中各处理夏玉米成熟期平均土壤贮水量较对照分别减少 1.93、5.23、9.47 mm 和 11.54 mm,生育期耗水量分别增大 0.51、3.37、8.78 mm 和 11.01 mm,其中,M2 处理的土壤贮水量及生育期耗水量在 2016 年与对照差异显著($P<0.05$),M3、M4 与对照 2 a 均差异显著($P<0.05$);干物质质量在苗期覆盖处理小于对照,中后期显著大于对照,2 a 平均增加 4.67%、16.58% ($P<0.05$)、21.99% ($P<0.05$) 和 23.36% ($P<0.05$);M3 处理 2 a 平均产量及水分利用效率表现较优,分别较 CK 增加 18.80% ($P<0.05$)、14.80% ($P<0.05$),较 M1 增加 14.13% ($P<0.05$)、10.92% ($P<0.05$),较 M2 增加 8.14% (2016 年, $P<0.05$)、5.11% (2016 年, $P<0.05$),虽然较 M4 处理 2 a 平均减少 1.77%、0.26%,但均差异不显著。综合而言,在干旱半干旱地区垄膜沟播条件下,7 500 kg · hm⁻²为合理的秸秆覆盖量。

关键词:秸秆量;垄沟二元覆盖;产量;土壤水分;夏玉米

中图分类号:S513 **文献标识码:**A

Effects of straw mulching rates on water consumption and yield of summer maize under dual-mulching of ridge and furrow

SHEN Sheng-long^{1,2}, LI Yuan-nong^{1,2}, YIN Min-hua^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, FANG Heng^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shannxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the effect of straw mulching rates on soil moisture, summer maize water consumption, upper dry matter, yield and water use efficiency, a two-year field experiment with the method of ridge covered by film and furrow covered by straw was carried out from June to October in 2015 and 2016. Straw mulching application rates of 0 (CK), 2 500 (M1), 5 000 (M2), 7 500 (M3) kg · hm⁻² and 10 000 (M4) kg · hm⁻² were used in field plots. The results showed that soil moisture decreased and water consumption increased under all of the straw mulching treatments compared with that under CK. The average soil moisture in two years under the four different rates of straw mulching were 1.93, 5.23, 9.47 mm and 11.54 mm lower than that of CK, at the same time, water consumption were 0.51, 3.37, 8.78 mm and 11.01 mm higher than that of CK, especially M3, M4 in two years and M2 in 2016 were significant ($P<0.05$) than CK. Upper dry matter with mulching was lower than CK at seedling period, while higher for other periods. The average upper dry matter in two years were 4.67%、16.58%、21.99% and 23.36% higher than that of CK, especially M2, M3 and M4 were significant than CK. The yield and water use efficiency of M3 were better when the effective use of straw was taken into consideration. When compared with CK, M1

and M2, the average yield under the treatment of M3 increased by 18.80%, 14.13% and 8.14%, average water use efficiency was increased by 14.80%, 10.92% and 5.11%, respectively. Although the average yield of M4 was increased by 1.77% and water use efficiency increased by 0.26% than M3, the results of the analysis showed that M3 and M4 did not have significant difference in two years, which mean that the rate more than 7 500 kg · hm⁻² had no significant effect on increasing the efficiency of straw. Overall, it could be concluded that the treatment with 7 500 kg · hm⁻² of straw mulching under dual-mulching of ridge and furrow was preferable in arid and semi arid areas and also helpful to improve the efficiency of straw utilization.

Key words: straw rate; yield; soil moisture; summer maize

中国是一个农业大国,水资源短缺一直是制约农业发展的主要瓶颈,尤其是在西北干旱半干旱地区^[1]。同时,中国又是世界第一秸秆大国^[2],秸秆的有效利用对保护环境,增加农民收入具有重要作用。自1936年由Hallsted^[3]提出秸秆覆盖以来,大量相关研究逐渐展开。研究表明,秸秆覆盖在抑制土壤盐分表聚^[4-5],减少土壤蒸发^[6-7],降低土壤呼吸^[8],蓄水保墒^[9],平抑土温^[10]等方面有重要作用。目前,国内有关秸秆覆盖的研究主要集中于冬小麦^[11-12]和春玉米^[13-14],而很少涉及夏玉米,且目前的研究主要针对平作条件下一元覆盖^[15-16]的秸秆覆盖量,或垄沟条件下不同覆盖材料及覆盖方式的居多,而对垄沟二元覆盖条件下秸秆覆盖量的研究相对较少。不同学者将垄沟二元覆盖条件下作物产量、土壤水分等与其他种植方式对比得出的结论存在较大差异^[17-19],这种差异的来源可能是不同地区气候条件或降雨量情况的不同导致,但通过大量调研发现,多数可能由于在进行沟中秸秆覆盖时凭借经验方法,对于该地区适宜的秸秆覆盖量无法获取理论指导所造成的。

本文基于2 a田间试验,通过分析比较垄沟二元覆盖种植模式下秸秆量对夏玉米土壤水分、生育期腾发量、作物产量及水分利用效率的影响,以期获得该地区垄沟种植模式下适宜的秸秆覆盖量,为秸秆的有效利用及夏玉米高产稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年和2016年的6—10月在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学旱区农业工程教育部重点实验室的灌溉试验站(34°17'38"N、108°04'08",海拔521 m)进行。试验站年均日照时数2 163.8 h、年均气温13℃,年均蒸发量1 510 mm,年均降水量632 mm,属大陆性暖温带季风气候。试验田土壤为壤土,田间持水率(质量含水率 θ_m)为24%,土壤干容重为1.35 g · cm⁻³,pH值为8.14。

1.2 试验材料

试验所用地膜由山东天壮环保科技有限公司生产,膜宽100 cm,膜厚0.008 mm,秸秆为前茬小麦秸秆,粉碎为约5 cm长。供试品种为“漯单9号”,由河南金屯种业有限公司生产,属中早熟品种。试验所用钾肥为农业用硫酸钾,K₂O质量分数≥51.0%;磷肥为过磷酸钙,有效P₂O₅质量分数≥16%;氮肥为尿素,总氮质量分数≥46.4%。

1.3 试验设计

采用垄沟种植方式,垄覆地膜、沟覆秸秆且沟内播种。共设置4个秸秆覆盖量水平:2 500(M1)、5 000(M2)、7 500(M3)、10 000(M4) kg · hm⁻²,以沟中不覆盖为对照(CK),共5个处理,3次重复,随机区组排列。小区面积为20 m²(4 m×5 m),所有小区均为南北种植。试验田基肥氮肥150 kg · hm⁻²,磷肥60 kg · hm⁻²,钾肥80 kg · hm⁻²;分别于2015年6月15日和2016年6月11日按照株距28 cm、行距60 cm进行种植。所有小区出苗后及时放苗、间苗,生育期末进行灌溉、追肥。夏玉米全生育期降水量为2015年271.0 mm,2016年321.0 mm。

1.4 测定项目及方法

土壤含水率测定:于夏玉米播种前及苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期分别测量0~200 mm土层土壤含水率,采用土钻法取土,取样间隔10 cm,用烘干法测定含水率,取土位置为小区中间同一行相邻2株玉米中间区域。

产量测定:在成熟期,于各小区中间选定12株进行室内考种,测定穗长、穗粗、穗行数、百粒重,并计算籽粒产量。

干物质量测定:在夏玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期分别在每小区采集3株玉米地上部植株,放入干燥箱在105℃下杀青30 min,再75℃干燥至恒定重量,用电子天平称量干物质量。

土壤贮水量 W (mm)计算公式^[20]:

$$W = \theta_m \times \rho_b \times h$$

式中, θ_m 为土壤含水率(g · g⁻¹); ρ_b 为土壤容重(g ·

cm^{-3}); h 为土层深度 (mm); $0 \sim 200 \text{ mm}$ 土层贮水量为各层土壤贮水量之和。

作物阶段耗水量 $ET(\text{mm})$ 计算公式^[21]:

$$ET = R + \Delta W$$

式中, R 为阶段降雨量 (mm); ΔW 为阶段内土壤贮水量变化 (mm); 由于地下水位较深, 故不考虑地下水补给。

作物水分利用效率 $WUE(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1})$ 计算公式^[16]:

$$WUE = Y/ET$$

式中, Y 为产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据整理,SPSS 21.0 进行数据统计分析,方差分析使用最小显著差异 (LSD) 法;采用 Origin 9.0 进行绘图处理。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆覆盖量对土壤贮水量的影响

土壤贮水量是不同覆盖处理效果的直接反应。可以通过调控生育前期覆盖量差异下棵间蒸发作用及中后期长势差异下植株蒸腾作用的强弱来影响土壤水分的变化。不同秸秆覆盖量条件下,由于棵间蒸发和植株蒸腾强度存在差异,同时受 2 a 生育期降水量分布的影响使得各处理土壤贮水量有所

不同,2015、2016 年两年夏玉米生育期降水情况见图 1。

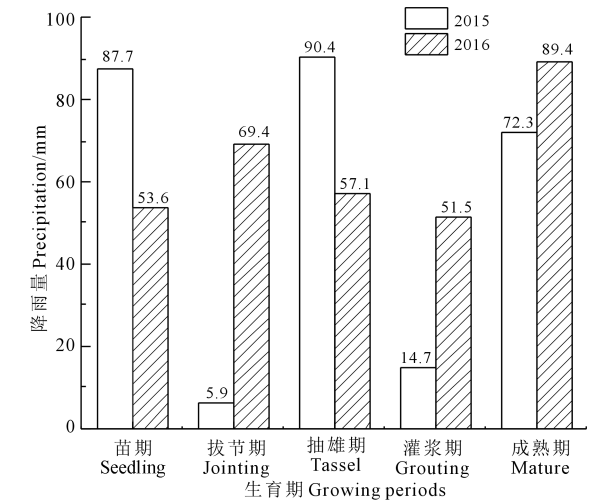


图 1 试验区 2015–2016 年夏玉米各生育期降雨量
Fig.1 Precipitation of experiment sites in summer maize period

由图 1 分析知,2 a 降雨量分布极不均匀,其中 2015 年夏玉米拔节期 5.9 mm、灌浆期 14.7 mm,2016 年抽雄期 57.1 mm、灌浆期 51.5 mm,均小于生育期内玉米正常需水量。由统计分析知,各处理间 0~200 cm 土壤贮水量存在明显差异,表现为生育前期随覆盖量增加而增加,生育后期随覆盖量增加而减少,具体变化见表 1。

表 1 不同秸秆覆盖量对夏玉米不同生育期土壤贮水量的影响/mm

Table 1 Effects of different straw mulching rates on soil water storage in various growing periods of maize

年份 Year	覆盖量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Straw mulching rates	播种前 Before sowing	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽雄期 Tassel period	灌浆期 Grouting period	成熟期 Mature period
2015	0(CK)	411.41±2.30a	455.61±2.91b	394.5±2.36c	412.73±1.41c	384.08±1.57a	394.23±1.88a
	2500(M1)	410.37±1.41a	457.21±1.50b	396.97±2.53bc	415.74±1.30b	385.13±1.71a	393.67±0.61a
	5000(M2)	409.74±1.79a	458.82±1.66b	401.05±2.75b	414.02±1.47bc	382.05±2.47ab	391.47±1.96a
	7500(M3)	412.41±2.52a	464.38±1.26a	407.23±2.22a	416.82±1.91a	382.59±1.96ab	388.23±1.16b
	10000(M4)	410.07±1.26a	462.42±0.88a	408.25±1.55a	418.5±1.40a	380.24±1.01a	385.46±2.13b
2016	0(CK)	401.15±3.48a	424.33±1.25c	416.28±0.83c	400.13±1.58b	391.55±1.08a	424.32±1.03a
	2500(M1)	399.35±1.96a	425.08±1.66c	420.22±3.01c	401.56±2.62ab	391.56±1.05a	421.03±1.67ab
	5000(M2)	399.10±2.51a	427.55±0.98b	426.09±2.44b	402.98±1.86ab	387.68±0.73b	416.63±1.47b
	7500(M3)	398.77±2.97a	429.41±1.52b	429.26±1.76ab	404.59±2.66a	384.75±1.29c	411.39±4.49c
	10000(M4)	401.44±1.01a	433.15±1.20a	433.03±2.15a	404.18±1.08a	383.57±2.22c	410.01±2.45c

注:不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters indicate significant difference ($P<0.05$)。

由表 1 分析知,夏玉米播种前土壤贮水量不存在显著差异,但随着生育进程的推进,不同秸秆覆盖处理下土壤贮水量的差异逐渐显著。苗期由于植株矮小,土壤水分消耗主要以棵间蒸发为主,不同覆盖量均对土壤蒸发有抑制作用,表现为随覆盖量的增加抑制作用逐渐增强,其中 M4 处理效果最明显 ($P<0.05$),M3 处理次之 ($P<0.05$),各处理 2 a

平均土壤贮水量分别较 CK 增加 1.17、3.22、6.93 mm 和 7.81 mm。拔节期各处理土壤贮水量差异有所增大,除 M1 外,其余各处理与对照相比均达到显著性差异 ($P<0.05$),分别增加 8.18、12.85 mm 和 15.25 mm。进入抽穗期后,夏玉米处于由营养生长向生殖生长过渡阶段,叶面积指数基本达到峰值,覆盖对棵间蒸发的抑制作用减弱,且由于前期覆盖量大的

处理保水效果较好,水分充足,因此植株生长旺盛,蒸腾作用较强,虽然 M3 和 M4 两年土壤贮水量仍显著高于对照 ($P<0.05$),但较 CK 差值减小至 4.27 mm 和 4.91 mm。灌浆期植株生殖生长旺盛,覆盖量与土壤贮水量呈负相关,2 a 中 M4 较 CK 达到显著性差异 ($P<0.05$),除 M1 土壤贮水量较 CK 增加 0.53 mm 外,其余处理分别减少 2.95、4.15 mm 和 5.91 mm。当进入成熟期后,各覆盖处理的平均土壤贮水量均较 CK 减少,M3、M4 与对照相比达到显著性差异 ($P<0.05$),各处理分别较 CK 减少 1.93、5.23、9.47 mm 和 11.54 mm。

表 2 不同秸秆覆盖量对夏玉米不同生育期耗水量的影响/mm

Table 2 Effects of different straw mulching rates on water consumption in various growing periods of maize

年份 Year	覆盖量/(kg·hm ⁻²) Straw mulching rates	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽雄期 Tassel period	灌浆期 Grouting period	成熟期 Mature period	全生育期 Full growth period
2015	0(CK)	43.5±1.29a	67.01±1.09a	72.27±1.92b	43.35±1.18c	62.15±1.84b	288.27±3.12b
	2500(M1)	40.86±1.46ab	66.14±1.25a	71.73±1.79b	45.31±1.41bc	63.76±1.28b	287.80±1.45b
	5000(M2)	38.62±2.96bc	63.67±1.10b	77.53±1.53a	46.67±2.50bc	62.88±1.98ab	289.37±1.20b
	7500(M3)	35.73±2.76c	63.05±1.73b	80.92±3.36a	48.93±3.37ab	66.66±2.56a	295.28±1.66a
	10000(M4)	35.35±1.96c	60.07±1.44c	80.25±2.00a	52.95±2.40a	67.08±1.14a	295.71±1.82a
2016	0(CK)	30.42±2.82a	77.45±0.74a	73.25±1.12c	60.08±1.97c	56.63±1.82b	297.83±3.92c
	2500(M1)	27.87±0.98ab	74.26±2.05ab	75.76±0.60c	61.50±2.18c	59.93±2.08ab	299.32±1.21bc
	5000(M2)	25.15±1.53bc	70.86±3.17bc	80.21±1.42b	66.80±2.27b	60.45±1.12ab	303.47±1.33b
	7500(M3)	22.96±1.53c	69.56±2.67c	81.76±2.15b	71.34±2.01a	62.76±3.49a	308.38±2.62a
	10000(M4)	21.89±1.65c	69.52±1.73c	85.95±1.77a	72.11±3.30a	62.95±2.84a	312.42±1.97a

由表 2 分析知,苗期农田腾发量主要以棵间蒸发为主,蒸发强度随覆盖量的增加而减弱,2 a 中 M2、M3 和 M4 处理与对照相比均达到显著性差异 ($P<0.05$),分别较 CK 减少 5.07、7.62 mm 和 8.34 mm。拔节期虽仍以蒸发为主,但由于植株迅速生长导致秸秆覆盖作用减弱,M2、M3 和 M4 处理较对照 2 a 均差异显著 ($P<0.05$),分别减少 4.96、5.93 mm 和 7.43 mm。抽穗期农田腾发量转变为以蒸腾为主,由于前期覆盖条件下水分充足,植株长势较好,因此该时期内耗水强度与覆盖量成反比,M2、M3 和 M4 处理较对照 2 a 均达到显著性差异 ($P<0.05$),差值为 6.11、8.58 mm 和 10.34 mm。灌浆期和成熟期 M3、M4 处理与对照相比 2 a 均达到显著性差异 ($P<0.05$),分别增加 8.42、10.81 mm 和 5.32、5.63 mm。全生育期 M3、M4 处理与对照相比 2 a 均达到显著性差异 ($P<0.05$),而 M3 和 M4 之间差异不显著 ($P<0.05$),各处理 2 a 平均腾发量分别较对照增加 0.51、3.37、8.78 mm 和 11.01 mm。

2.3 不同秸秆覆盖量对夏玉米地上干物质质量的影响

干物质质量是对秸秆覆盖保水效应的直接反应,

2.2 不同秸秆覆盖量对农田腾发量的影响

在北方炎热的夏季,覆盖秸秆可通过隔断蒸发层与下层土壤的毛细管作用,减弱土壤空气与大气之间的对流交换,从而增大地面层显热通量,减小潜热通量及土壤热通量,其独特的平抑土温效应可减少土壤水分蒸发进而提高根系活性、延缓植株衰老。通过垄沟微集雨,沟覆秸秆的方式在夏玉米生育前期减少棵间蒸发,储蓄土壤水分从而为中后期植株蒸腾及产量形成提供适宜的土壤水分状况,使全生育期农田水分状况趋于协调,覆盖对不同生育期耗水量的影响见表 2。

提高夏玉米干物质质量的累积有助于最终产量的形成,覆盖对夏玉米干物质质量影响见表 3。

由表 3 分析知,2015 年各处理最终干物质质量明显低于 2016 年,苗期由于秸秆覆盖抑制了地上干物质质量的形成,表现为随覆盖量的增加干物质质量呈下降趋势,其中 M4 处理(2016 年)较对照差异显著 ($P<0.05$),相比对照减少 6.69%。拔节期在气温与土壤水分共同作用下秸秆覆盖对植株生长由抑制转变为促进效应,其中,M3、M4 处理均显著高于对照 ($P<0.05$),2 a 平均增加 14.24%、17.91%。进入抽雄期后,秸秆覆盖的促进作用进一步显现,M2、M3 和 M4 处理较对照均达到显著性差异 ($P<0.05$),分别增加 13.23%、18.65% 和 21.73%。灌浆期干物质逐步向果实部运移,M2、M3 和 M4 处理相比对照均达到显著性差异 ($P<0.05$),2 a 平均增加 14.11%、20.87%和 24.32%。进入成熟期后,各处理较对照差异达到最大,分别增加 4.67%、16.58%、21.99% 和 23.36%,其中 M2、M3、M4 处理相比对照 2a 均差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 不同秸秆覆盖量对夏玉米不同生育期干物质质量的影响/(g·株⁻¹)

Table 3 Effects of different straw mulching rates on upper dry matter in various growing periods of maize/(g·plant ⁻¹)						
年份 Year	覆盖量/(kg·hm ⁻²) Straw mulching rates	苗期 Seedling period	拔节期 Jointing period	抽雄期 Tassel period	灌浆期 Grouting period	成熟期 Mature period
2015	0(CK)	4.27±0.24a	23.60±1.29b	54.02±1.90c	114.50±3.15d	188.89±7.11c
	2500(M1)	4.20±0.16a	24.59±1.28b	56.43±1.81c	121.27±4.76c	198.61±5.97c
	5000(M2)	4.14±0.06a	25.67±1.07ab	61.66±3.40b	130.22±5.47bc	222.29±7.92b
	7500(M3)	4.17±0.09a	26.76±1.14a	66.19±2.23a	137.75±6.54ab	230.68±4.01a
	10000(M4)	4.05±0.11a	27.56±1.95a	65.94±2.35ab	143.58±3.12a	233.46±3.53a
2016	0(CK)	4.25±0.26a	23.74±1.58c	55.69±1.96c	120.87±3.84c	201.28±3.43c
	2500(M1)	4.15±0.11a	24.07±1.31c	57.14±4.88bc	126.95±3.89c	209.77±6.34c
	5000(M2)	3.99±0.10a	26.03±1.11b	62.56±2.14b	138.36±2.43b	232.58±7.14b
	7500(M3)	4.01±0.14a	27.32±1.16ab	63.98±2.42ab	142.75±4.51b	245.28±6.99ab
	10000(M4)	3.90±0.11b	28.26±1.26a	67.61±2.73a	149.04±3.28a	247.85±4.12a

2.4 不同秸秆覆盖量对夏玉米产量及水分利用效率的影响

玉米产量是垄沟微集雨、沟覆秸秆种植模式对土壤水分等因素调控的最终体现,覆盖条件下玉米产量及构成要素见表 4。由表 4 分析知,处理 M3 和 M4 的果穗长、果穗粗、百粒重均显著高于对照($P<0.05$),而果穗行数无显著差异。2 a 覆盖处理均表现为产量及水分利用效率随秸秆覆盖量的增加而增加的趋势,由于 2015 年玉米拔节期及灌浆期降水量过少,各处理产量及水分利用效率明显低于 2016 年。各处理产量较 CK 2 a 平均增产 4.10%、9.85%、18.80%和 20.89%。不同秸秆覆盖量条件下夏玉米

产量和生育期耗水量均有所差异,从而导致不同的水分利用效率。2 年中,各覆盖处理的平均水分利用效率分别较对照提高 3.52%、9.21%、14.80%和 15.09%,其中 M2、M3 和 M4 处理 2 a 产量及水分利用效率均显著高于对照($P<0.05$),在 4 种不同秸秆量处理中,2015 年产量及水分利用效率 M3 处理与 M2、M4 均无显著性差异($P<0.05$),但 M2、M4 之间存在显著性差异($P<0.05$),2016 年 M3 和 M4 均与 M2 存在显著性差异,且 M3 和 M4 之间无显著性差异($P<0.05$),说明当秸秆量大于 7 500 kg·hm⁻²时增效不再明显。

表 4 不同秸秆覆盖量对夏玉米产量及水分利用效率的影响

Table 4 Effect of different straw mulching rates on yield of maize and water use efficiency							
年份 Year	覆盖量/(kg·hm ⁻²) Straw mulching rates	果穗长/cm Ear length	果穗粗/mm Ear thickness	穗行数 Ear rows	百粒重/g 100 grains weight	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	水分利用效率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2015	0(CK)	16.05b	47.14b	12.43a	27.97c	6624.75±268.96c	22.98±0.96c
	2500(M1)	16.37b	48.98b	13.17a	28.23bc	6764.92±233.65c	23.51±0.78c
	5000(M2)	17.31ab	51.49a	13.63a	29.54b	7273.20±288.70b	25.13b±0.96
	7500(M3)	18.30a	51.66a	13.53a	32.52a	7750.32±301.35ab	26.24ab±0.91
	10000(M4)	18.41a	52.05a	14.1a	33.58a	7939.31±238.90a	26.85a±0.64
2016	0(CK)	16.71c	48.23b	13.93a	28.19c	7083.33±221.47c	23.79±0.91c
	2500(M1)	16.98bc	49.62b	13.67a	29.42c	7514.28±288.31bc	25.11±1.06bc
	5000(M2)	18.13ab	51.91a	14.33a	29.84b	7786.02±261.10b	25.65±0.97b
	7500(M3)	18.68a	52.61a	15.33a	33.19ab	8543.31±291.38a	27.71±1.10b
	10000(M4)	18.78a	52.74a	15.67a	33.92a	8637.2±276.95a	27.65±1.05a

3 讨 论

3.1 不同秸秆覆盖量对土壤水分的影响

在干旱半干旱地区,水资源匮乏一直是制约农业生产的主要问题。垄沟种植地膜覆盖微集雨技术可以贮存更多的降水^[22],通过沟中覆盖量差异导致遮盖程度的不同,从而减缓地表气体对流,使土壤表层水分蒸发损失产生差异,调控水分在夏玉米

全生育期的分配情况。蔡太义等^[16]研究发现,对春玉米进行休闲期覆盖可使 2 m 内土壤水分增加 15 mm(4 500 kg·hm⁻²)和 28 mm(9 000 kg·hm⁻²),同时发现玉米成熟期土壤水分随秸秆覆盖量增加而增加。由于本试验区一年两熟,休闲期时间较短(20 d 左右),因此未对休闲期进行覆盖并观测土壤水分变化,使玉米播种前土壤水分状况大致相同,这有助于消除休闲期水分差异对玉米生育期耗水

的影响,本试验中成熟期土壤贮水量与秸秆覆盖量呈负相关,丰富了生育期覆盖和休闲期+生育期覆盖对玉米收获时土壤水分差异的理论研究。买自珍等^[23]研究得出垄沟二元覆盖条件下春玉米生育期耗水范围为 390~430 mm,本研究玉米生育期耗水量为 280~310 mm,可能由于生育期降水量差异,生育期和秸秆覆盖量的不同所致。于晓蕾等^[24]研究发现小麦全生育期耗水量随覆盖量的增加而减少,这与本试验结果相反,可能由于小麦与玉米生育期内植株蒸腾强度不同所致,也可能是生育期土壤温度差异造成,但就生育期总耗水量而言,本研究与蔡太义^[16]研究结果相似。Duley^[25]研究认为,覆盖量为 $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的土壤贮水量较对照(不覆秸秆)增加 2 倍,在本试验条件下规律不明显,可能与种植区气候条件及降水量情况的差异有关。张俊鹏等^[6]得出夏玉米全生育期内,土壤蒸发强度随秸秆覆盖量增加而减小,当覆盖量达到 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,棵间蒸发强度降低不明显,与 $10\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 无显著性差异,本试验后续应增加对土壤蒸发强度的连续观测,但生育前期由于蒸腾作用较弱,可通过农田蒸散量间接得出前期土壤蒸发强度与秸秆覆盖量呈较好的负相关关系,且覆盖量 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 $10\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 差异不明显,这与张俊鹏部分研究结果^[6]相似。员学锋等^[26]在对桃树的覆盖试验中表明,0~50 cm 土层土壤贮水量与秸秆覆盖量呈很好的二次相关性,本研究通过对 0~200 cm 土层贮水量观测发现,垄沟种植二元覆盖条件下覆盖量与土壤水分在生育前期呈较好的正相关,生育中后期由于蒸腾作用增强,覆盖保水效应逐渐减弱,且前期土壤水分充足,甚至使收获时土壤水分随秸秆覆盖量的增加而降低。本试验对夏玉米全生育期土壤蒸发及植株蒸腾强度未进行连续观测,后续研究中将加大对水分迁移变化情况的探索。

3.2 不同秸秆覆盖量对夏玉米干物质量、产量及水分利用效率的影响

作物干物质量和产量是农业持续发展的重要指标,提高作物产量及水分利用效率是科学研究的重点及目的所在。卜玉山^[27]在对春玉米进行秸秆覆盖的研究中发现,由于秸秆覆盖致使苗期出苗较对照晚 1~2 d,但随着气温回升在苗期即表现为秸秆覆盖处理的干物质量大于对照;李立群^[28]则发现秸秆覆盖条件下苗期干物质量小于不覆盖,中后期由于土壤水分的调控作用植株长势好于对照。本研究结果表明苗期覆盖对植株生长有一定的抑制作用,苗期过后覆盖处理明显优于对照,与李立群

等研究结果一致,但与卜玉山研究存在差异,这可能由覆盖量差异和作物熟制不同导致。蔡太义^[16]在平作条件下发现玉米产量随秸秆覆盖量的增加而增加,增产率分别为 $6.05\%(4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $11.03\%(9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ 、 $12.41\%(13\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$;逢焕成^[29]和于晓蕾^[24]在对冬小麦的研究及时学双^[30]对青稞的研究中均发现相同规律。本试验结果趋势相同,但同等覆盖量条件下增幅略高,可能由于本试验为二元覆盖,秸秆覆盖面积小且垄沟种植也会一定程度上提高降水有效利用率,从而使增产效果更为明显。李玉鹏^[14]研究发现当平作覆盖量达到 $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上时,增产效果随覆盖量的增加不再明显;本试验发现垄沟二元覆盖条件下秸秆量达到 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时增产效果不再具有显著差异。Cook^[31]研究表明, $2\,000\sim4\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 小麦秸秆覆盖可使玉米增产,但覆盖量增加至 $6\,000\sim8\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米大幅减产,本研究 2a 均未出现随秸秆覆盖量增加导致玉米减产的现象,这与国内多数研究成果一致^[16]。王昕^[13]研究发现平作春玉米覆盖量为 $4\,500\sim9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水分利用效率急剧增大,覆盖量达到 $13\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时不再增加甚至有下降趋势;本研究结果分析表明秸秆覆盖量达到 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时秸秆量增加对水分利用效率的提高不显著,当覆盖量增加至 $10\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时在 2015 年增加 0.59%,2016 年下降 0.06%,这可能与种植方式及生育期内降雨量有关。蔡太义^[16]研究平作春玉米覆盖量为 $4\,500\sim13\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水分利用效率较不覆盖提高 5.49%~8.09%;张俊鹏^[6]研究平作夏玉米覆盖量为 $1\,500\sim10\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水分利用效率提高 2.09%~27.86%;而本研究发现垄沟二元覆盖夏玉米覆盖量为 $2\,500\sim10\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水分利用效率提高 3.52%~15.09%,增幅略有差异,这可能受不同地区降雨量差异影响,也可能与种植方式,覆盖材料有关。银敏华^[22]研究发现垄沟二元种植模式下秸秆覆盖量为 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时产量较不覆秸秆提高 8.06%,水分利用效率提高 7.17%,均小于本试验同一地区不同生产年 $5\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的增效作用,这与生育期内降雨量差异有关。同时有学者提出一定范围内同等处理不同生产年度水分利用效率与降水量成反比^[31-33],本研究 2015 年产量及水分利用效率均低于 2016 年,这与 2015 年生育期降水少且分布极不均匀有关,此结果验证了玉米需水临界期的严重干旱会造成产量的大幅下降。

4 结 论

- 1) 垄覆地膜沟覆秸秆条件下,夏玉米生育前期耗水量随秸秆覆盖量增加而减小,为中后期植株旺长提供适宜的环境从而导致中后期内覆盖量大的处理耗水强度较大,2 a 中各秸秆覆盖处理全生育期平均耗水量分别较对照增加 0.51、3.37、8.78 mm 和 11.01 mm。
- 2) 干物质量在苗期与覆盖量呈负相关,中后期随覆盖量的增加而增大,2a 平均较 CK 分别增加 4.67%、16.58%、21.99% 和 23.36%。
- 3) 产量及水分利用效率均与秸秆覆盖量呈正相关关系,2 a 平均较 CK 分别增产 4.10%、9.85%、18.80% 和 20.89%,水分利用效率提高 3.52%、9.21%、14.80% 和 15.09%,覆盖量大于 7 500 kg · hm⁻²,夏玉米增效不明显。
- 4) 在干旱半干旱地区降水量制约最终作物产量及水分利用效率,垄沟二元覆盖条件下,7 500 kg · hm⁻² (M3) 为合理的秸秆覆盖量,既有利于夏玉米节水增产,又有助于秸秆的高效利用。

参 考 文 献:

[1] 山仑,邓西平,康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J].水利学报,2002,33(9):0027-0031.

[2] 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.

[3] Hallsted A , Mathews O. Soil moisture and winter wheat with suggestions on abandonment [M].Manhattan Kan: Agrie. Exp.Sta., 1936.

[4] 孙博,解建仓,汪妮,等. 不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):246-250.

[5] 卢星航,史海滨,李瑞平,等. 覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):148-154.

[6] 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等. 不同麦秸秆覆盖量对夏玉米田间土壤蒸发和地温的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):95-102.

[7] 刘超,汪有科,湛景武,等. 秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响[J],中国农学通报,2008,24(5):448-451.

[8] 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J].农业工程学报,2012,28(22):88-94.

[9] 赵聚宝,梅旭荣,薛军红,等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J].中国农业科学,1996,29(2):59-66.

[10] 王兆伟,郝卫平,龚道枝,等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J].中国农业气象,2010,31(2):244-250.

[11] 于稀水,廖允成,袁泉,等. 秸秆覆盖条件下冬小麦田间蒸发规律研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):58-61.

[12] 廖允成,温晓霞,韩思明,等. 黄土台原旱地小麦覆盖保水技术效果研究[J]. 中国农业科学,2003, 36(5):548-552.

[13] 王昕,贾志宽,韩清芳,等. 半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保

蓄及作物水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2009, 27(4):196-202.

[14] 李玉鹏,贾志宽,杨保平,等. 秸秆覆盖量对半干旱区旱作春玉米生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(1):117-120.

[15] 孙博,解建仓,汪妮,等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(4):180-184.

[16] 蔡太义,贾志宽,孟 蕾,等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):43-48.

[17] 胡亚瑾,吴淑芳,冯浩,等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响[J].中国农业气象,2015,36(6):699-708.

[18] 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.

[19] 李荣,王敏,贾志宽,等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J].农业工程学报.2012,28(2):106-113.

[20] 韩丽娜,丁静,韩清芳,等. 黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应[J].农业工程学报,2012,28(24):129-137.

[21] 陈林,杨新国,翟德苹,等. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和夏玉米产量的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):108-116.

[22] 银敏华,李援农,张天乐,等. 集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2015,46(12):194-203.

[23] 买自珍,罗世武,程炳文,等. 玉米二元覆盖农田水分动态及水分利用效率研究[J].中国生态农业学报,2007,15(3):68-70.

[24] 于晓蕾,吴普特,汪有科,等. 不同秸秆覆盖量对冬小麦生理及土壤温、湿状况的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(4):41-44.

[25] Duley F L. The use of crop residues for soil and moisture conservation[J]. Juor Amer Soc Agron,1939,31(3):703-709.

[26] 员学锋,吴普特,汪有科. 秸秆覆盖桃树地生态效应及桃树的生长状况[J].农业工程学报,2007,23(1):91-94.

[27] 卜玉山,苗果园,邵海林,等. 对地膜和秸秆覆盖玉米生长发育与产量的分析[J].作物学报,2006,32(1):1090-1093.

[28] 李立群,薛少平,王虎全,等. 渭北高原旱地春玉米不同种植模式水温效应及增产效益研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):33-38.

[29] 逢焕成. 秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J].土壤通报,1999,30(4):174-175.

[30] 时学双,李法虎,普布多吉,等. 秸秆覆盖对高海拔寒区土壤温度和春青稞生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):151-160.

[31] Cook H, Valdes G, Lee H. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L.[J]. Soil and Tillage Research,2006,91(1/2):227-235.

[32] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J].农业工程学报,2011,27(增刊1):238-243.

[33] 周昌明,李援农,银敏华,等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J].农业工程学报,2015,31(7):109-117.