

半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响

张丽华^{1,2}, 徐晨^{1,2}, 于江^{1,2}, 闫伟平^{1,2}, 孙宁¹,
谭国波¹, 赵洪祥¹, 李斐¹, 孟祥盟¹, 边少锋¹

(1.吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 2.农业部作物高效用水公主岭科学实验站, 吉林 公主岭 136100)

摘要: 为探索半湿润区玉米高产和水分高效利用的栽培技术模式, 采用秸秆还田和土壤耕作相结合的方法, 设置秸秆离田旋耕垄作(CK)、秸秆深翻还田(SP)、秸秆覆盖还田免耕(SC)、秸秆覆盖还田深松(SS) 4 个处理, 研究不同处理对土壤水分、土壤温度、玉米产量和水分利用效率的影响。结果表明: (1) 2018 年和 2019 年的土壤贮水量分别呈单、双峰曲线变化, 2018 年所有处理和 2019 年 SS 处理的土壤贮水量均随土层深度增加而显著增加。与 CK 相比, 2018 年 SC 和 SS 处理各生育时期土壤贮水量分别提高 7.58%~18.40% 和 9.24%~21.94%。(2) 耕层 0—20 cm 土壤温度随玉米生育时期呈先升后降的变化趋势, 随着土层深度的增加, 土壤温度逐渐降低。秸秆还田具有调节地温的作用, 与 CK 相比, SP 使 5、6 月地温分别提升 0.46、0.21 °C, SC 使 5—7 月地温降低 1.72~2.79 °C, 提高 9 月份地温 0.22 °C。(3) 2018 年和 2019 年, SS、SP、SC 处理使玉米产量较 CK 分别增加 13.88% 和 14.82%, 7.59% 和 9.12%, 7.42% 和 8.50%。(4) 2018 年和 2019 年, SS、SP 和 SC 处理的水分利用效率分别增加 13.79% 和 9.75%, 6.11% 和 5.93%, 5.67% 和 3.83%。(5) 玉米各生育时期(时间上)和土层 0—60 cm(空间上)土壤贮水量对玉米产量影响显著, 各生育时期(花期除外)和 0—60 cm 土壤贮水量与水分利用效率呈显著正相关, 6、7 月及 10 cm 以下土层, 土壤温度对玉米产量影响显著, 7 月和 15 cm 以下地温与水分利用效率显著负相关。秸秆覆盖深松技术增加土壤贮水量, 改善土壤温度, 提高玉米产量和水分利用效率, 为雨养农业区提供高效的栽培技术模式。

关键词: 半湿润区; 秸秆还田; 土壤水分; 土壤温度; 玉米; 产量

中图分类号: S152.7; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0299-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.041

Effects of Straw Returning on Soil Moisture, Temperature and Maize Yield in Semi Humid Area

ZHANG Lihua^{1,2}, XU Chen^{1,2}, YU Jiang^{1,2}, YAN Weiping^{1,2}, SUN Ning¹,

TAN Guobo¹, ZHAO Hongxiang¹, LI Fei¹, MENG Xiangmeng¹, BIAN Shaofeng¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033;

2. Gongzhuling Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Gongzhuling, Jilin 136100)

Abstract: In order to explore the cultivation technology mode of high yield and water use efficiency of maize in semi humid area, the method of straw returning combined with soil tillage was adopted, and four treatments were set up, including straw rotary ridge tillage (CK), straw deep ploughing returning (SP), straw mulching returning and no tillage (SC) and straw mulching returning and subsoiling (SS). The effects of different treatments on soil moisture, soil temperature, maize yield and water use efficiency were studied. The results showed that: (1) The change of soil water storage showed a single peak curve and double peaks curve in 2018 and 2019, respectively. The soil water storage of all treatments in 2018 and SS treatment in 2019 increased significantly with the increasing of soil depth. Compared with CK treatment, the soil water storage in SC treatment and SS treatment increased by 7.58% to 18.40% and 9.24% to 21.94% in 2018, respectively. (2) The soil temperature of 0—20 cm plough layer increased first and then decreased with the growth period of maize, and decreased gradually with the increasing of soil depth. Straw returning could regulate soil temperature. Compared with CK, the SP treatment increased ground temperature by 0.46 °C and

收稿日期: 2021-03-01

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300605); 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-42); 吉林省农业科技创新工程项目人才基金项目

第一作者: 张丽华(1974—), 女, 研究员, 主要从事旱作节水栽培技术研究。E-mail: zhanglh_3161@163.com

通信作者: 边少锋(1963—), 男, 研究员, 主要从事旱作节水研究。E-mail: bsf8257888@sina.com

0.21 °C in May and June, SC treatment decreased the ground temperature by 1.72 °C to 2.79 °C from May to July, and increased the ground temperature by 0.22 °C in September. (3) In 2018 and 2019, compared with CK, the maize yield of SS, SP and SC treatments increased by 13.88% and 14.82%, 7.59% and 9.12%, 7.42% and 8.50%, respectively. (4) In 2018 and 2019, the water use efficiency of SS, SP and SC treatments increased by 13.79% and 9.75%, 6.11% and 5.93%, 5.67% and 3.83%, respectively. (5) Soil water storage each growth period (time) and 0—60 cm soil layer (space) had significant effects on maize yield. Soil water storage at 0—60 cm and each period except flowering stage in July and below 15 cm had significant positive correlation with water use efficiency. Soil temperature had no significant effect on maize yield and water use efficiency. Straw mulching and subsoiling technology increased soil water storage, improved soil temperature, increased maize yield and water use efficiency, and provided efficient cultivation technology pattern for rain fed agricultural area.

Keywords: semi humid area; straw returning; soil moisture; soil temperature; maize; yield

干旱作为一种对作物生长发育影响较大的非生物胁迫因子之一,近年来频繁发生,对我国的农业生产和社会经济造成严重损失。吉林省中部半湿润区农业生产完全依赖于自然降雨,但由于年际间降雨量的波动和时空分布不均,加之土壤板结,有机质下降,土壤蓄水和保水能力降低,致使自然降水平均利用率不足 30%^[1],易导致玉米减产。通过秸秆还田和机械耕作互作不仅能增加土壤有机质,提高土壤肥力^[2-4],改善土壤结构^[5],而且能够提高土壤蓄水保水能力^[6-7],减少地表水分蒸发^[8],降低因长期大量施肥造成的农田土壤环境污染,减少因焚烧秸秆引起的大气污染^[9-10],改善生态环境。

秸秆还田对土壤养分、水分利用和产量的研究已有一些报道,宫亮等^[11]研究认为,秸秆还田能够增加土壤有机质含量,降低土壤容重,提高土壤田间持水量和土壤孔隙度,同时能够改善土壤的养分状况。相比秸秆不还田,秸秆还田处理能提高冬季土壤的温度,并降低春季和夏季的土壤温度^[12]。在作物生长发育早期,旱季秸秆覆盖还田对表层的土壤蒸发和温度调控效果显著,秸秆深施还田处理的土壤日均温度相比覆盖还田和对照田分别增加 8.3, 7.9 °C^[13];安俊鹏等^[14]研究表明,秸秆条带还田可以通过优化土壤结构、水分和氮素分布,提高水分利用效率和粮食产量,与秸秆不还田相比,秸秆还田处理土壤含水量增加 7.8% 和 6.1%,土壤氮素增加 6.9% 和 4.5%,水分利用效率分别提高 7.8% 和 7.0%,玉米产量分别提高 6.7% 和 8.2%;Lin 等^[15]研究发现,在我国北方地区,相比传统的耕作方式,保留秸秆的玉米平均产量增加 7.5%,尤其对年降水量在 600 mm 以内的地区作用更为显著。在秸秆还田处理的同时,采用土壤深耕、深松等耕作方式也可提高玉米产量^[16]。但关于雨养条件下秸秆还田与机械耕作相结合对土壤水分和温度的时空变化、水分利用效率及玉米产量的影响研究鲜见报道。

本研究采用秸秆还田与耕作方式相结合的方式,研究玉米大量根系所在土壤层次的土壤水分和耕层土壤温度时空动态变化,分析不同组合处理对土壤水分、温度、玉米产量及水分利用效率的影响,以期在半湿润区玉米的增产及水分高效利用优化的栽培模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年和 2019 年在公主岭试验基地(124°48′43″E, 43°29′55″N)进行,土壤类型为黑土。属温带半湿润大陆性季风气候,无霜期 140 天,年均气温 5.6 °C,年均蒸发量 1 690 mm。5—9 月玉米生育时期,平均降水量 570 mm,有效积温(≥ 10 °C)2 600~2 800 °C。2018 年和 2019 年 5—9 月平均气温均为 21.1 °C,降水量分别为 530, 571 mm(图 1)。播种前土壤有机质含量为 22.4 g/kg,速效氮含量 75.7 mg/kg,速效磷含量 42.1 mg/kg,速效钾含量 120.3 mg/kg, pH 6.5。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“富民 985”,播种日期分别为 2018 年 4 月 26 日和 2019 年 5 月 5 日,种植密度为 6.5 万株/hm²。试验设秸秆离田旋耕起垄(CK)、秸秆深翻还田(SP)、秸秆覆盖免耕(SC)和秸秆覆盖深松(SS) 4 个处理。SP:秋季将秸秆粉碎翻埋到土层 30 cm 左右,耙平到待播状态;SC:秋季粉碎秸秆覆盖地表,春季秸秆归行免耕播种;SS:秸秆覆盖免耕基础上,苗期进行行间覆盖带深松 35 cm。试验所用化肥为氮磷钾比例为 28 : 12 : 14 的掺混肥,用量为 750 kg/hm²,对照田旋耕起垄时施入,其余处理播种时深施。均匀行种植,12 行区,行长 100 m,行距 0.65 m,小区面积共 780 m²,3 次重复,随机排列。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分测定 于播种时、苗期、拔节期、开花

期、灌浆期和成熟期,采用质量烘干法测定苗带 0—60 cm 土层的土壤含水量,每 20 cm 土层 1 个样本。

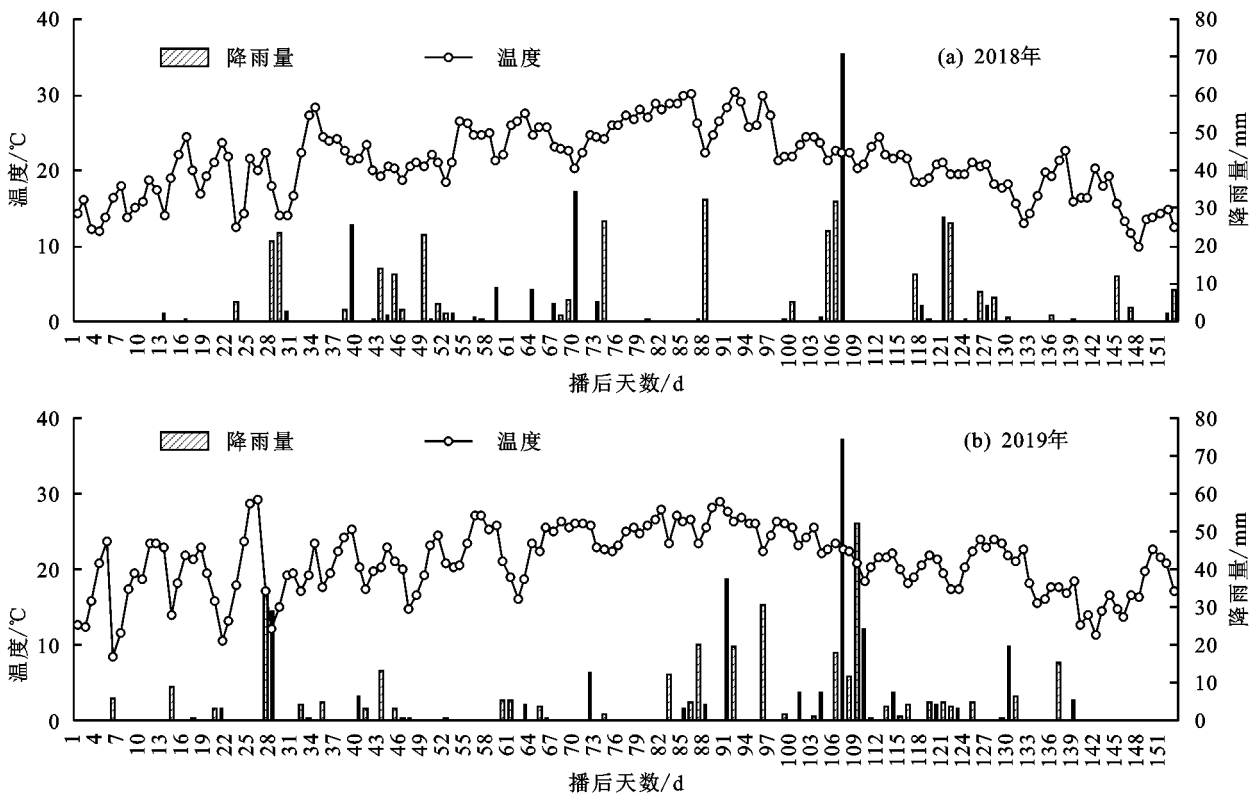


图1 2018年和2019年玉米生长季日平均气温与降雨量

1.3.2 土壤温度监测 2019年利用土壤温度自动记录仪监测记录土壤温度变化,在每个处理的小区中心位置放置1台记录仪,并将传感器设置在5, 10, 15, 20 cm 4个土层深度,设定每1 h自动记录1次,监测5月8日至9月20日期间每日24 h土壤温度情况。

1.3.3 土壤容重测定 采用环刀法测定0—60 cm土壤容重,先挖好土壤剖面,按土壤剖面每20 cm一层,由上至下采用环刀在每层的中部采样,室内将环刀内土壤放入铝盒中烘干称重。

$$VW = M/V \quad (1)$$

式中:VW为土壤容重(g/cm^3);M为烘干土样质量(g);V为环刀容积(cm^3)。

1.3.4 干物质积累 玉米成熟期,各处理随机选取3点,每点选取3株长势基本一致的玉米,在实验室利用鼓风烘干箱在75 °C条件下烘干至恒重,测定单株玉米的干物质积累量。

1.3.5 产量及其构成因素 于2018年9月29日和2019年9月20日收获玉米,各处理选取10 m²区域进行测产,调查总穗数及总穗鲜重,选取满足平均单穗重10倍的10穗玉米,风干后进行考种。调查10穗玉米籽粒重、籽粒含水率和百粒重。

$$Y = 1000 \times M_{10} \times M_{鲜} / M_{10鲜} \times 100(1 - W) / (100 - 14) \quad (2)$$

式中:Y为产量(kg/hm^2);M₁₀为10穗干粒重(kg);

M_鲜为10 m²穗鲜重(kg);M_{10鲜}为10穗鲜重(kg);W为籽粒含水率(%)。

1.3.6 土壤贮水量

$$W = h \times p \times w \times 10 / 100 \quad (3)$$

式中:W为土壤贮水量(mm);h为土层厚度(cm);p为土壤容重(g/cm^3);w为土壤重量含水率(%),土层厚度以60 cm计算。

1.3.7 水分利用效率

$$ET = P + \Delta W \quad (4)$$

式中:P为5—9月降雨量(mm);ΔW为播种和收获时土壤贮水量之差(mm)。由于试验区地势平坦,地表径流和土壤水分渗漏量等因素均可忽略不计。

$$WUE = GY / ET \quad (5)$$

式中:WUE为水分利用效率($kg/(hm^2 \cdot mm)$);GY为玉米籽粒产量(kg/hm^2);ET为土壤耗水量(mm)。

1.4 数据处理

采用DPS v7.05数据处理系统进行数据相关性、统计方差分析,用Excel 2016软件制图。

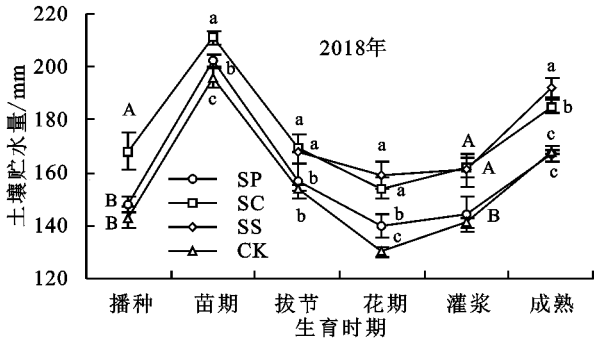
2 结果与分析

2.1 土壤贮水量

2.1.1 玉米生育期内土壤贮水量变化 由图2可知,2018年和2019年玉米全生育期土壤贮水量分别呈单、双峰曲线变化。2018年,SC和SS处理各生育时期的土壤贮水量均显著高于SP处理和CK,与CK

相比,SS 处理提高 9.24%~21.94%,SC 处理提高 7.58%~18.4%,且成熟期时 SS 处理的土壤贮水量显著高于 SC 处理,SP 处理与 CK 差异不显著。

2019 年 SC 与 SS 处理在播种时、开花至成熟期



注:深松作业在苗期和拔节期间进行,故曲线上拔节期开始标记“秸秆覆盖深松”处理数值。图中大、小写字母分别表示处理间在 1% 和 5% 水平上差异显著。下同。

图 2 秸秆不同还田处理对玉米生育时段土壤贮水量的影响

2.1.2 土壤贮水量垂直空间动态变化 与 0—20 cm 土层的土壤贮水量相比,所有处理的土壤贮水量均随着土层加深呈显著增加趋势,且 2018 年所有处理和 2019 年 SS 处理的 3 个层次间土壤贮水量差

土壤贮水量显著高于 CK。土壤保水效果 SC 处理显著高于 SP 处理,特别在降雨量相对较少的 2018 年效果更佳,SC 处理减少地表水分蒸发,提高各生育时期土壤蓄水量。

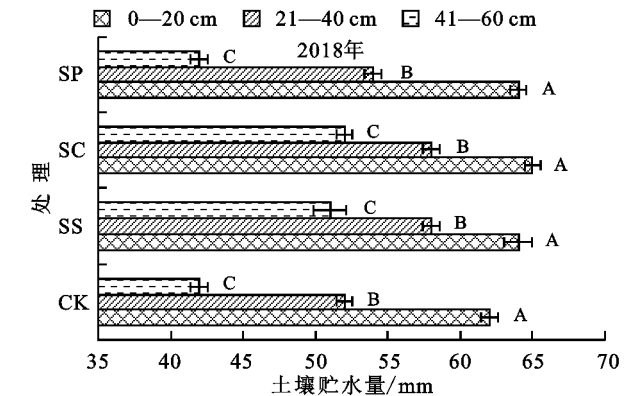
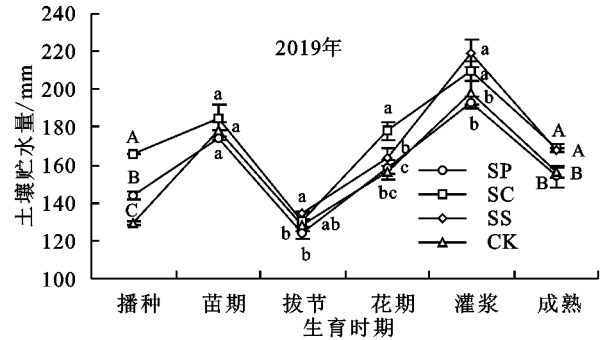


图 3 秸秆不同还田处理对土壤纵向贮水量的影响

从图 4 可以看出,相同层次不同处理间土壤贮水量不同,SC 和 SS 处理高于 SP 处理和 CK,2018 年的 0—20, 41—60 cm 和 2019 年的 21—40 cm 土层土壤贮水量,SC 处理显著高于 SS 处理,2018 年 21—40

异均达到显著水平,而 2019 年 SP 和 SC 处理的 21—60 cm 土层间土壤贮水量均没有显著性变化,却显著高于 0—20 cm,CK 的土壤贮水量中间层显著高于上、下层(图 3)。

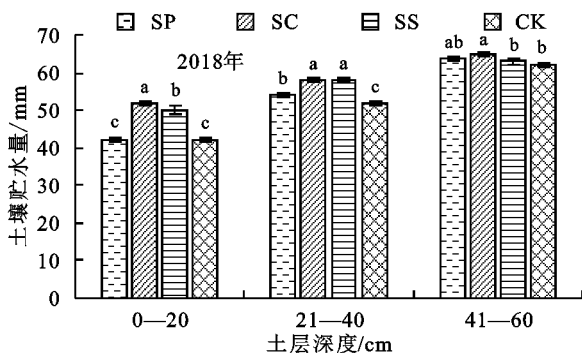
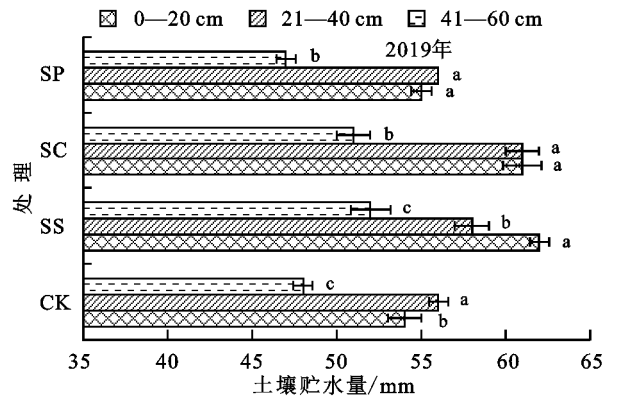
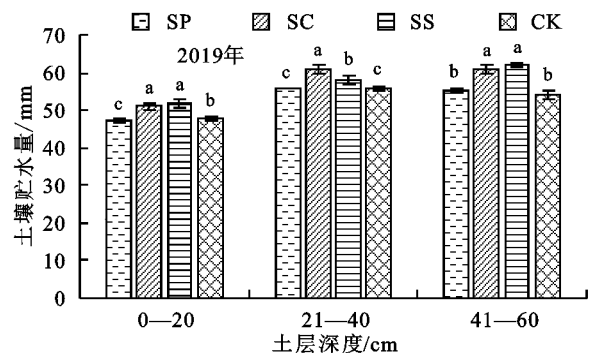


图 4 秸秆不同还田处理对相同土层土壤贮水量的影响



2.2 土壤温度

2.2.1 玉米生育期内土壤温度变化 由图 5 可以看出,随着玉米的生长发育,土壤温度呈先升后降的曲

线变化,7 月末达最高值。SP 处理提高 5—6 月的地温,SC 处理降低 5—8 月的地温。

与 CK 相比,5,6,7,8,9 月耕层 20 cm 内土壤

日平均温度 SP 处理分别提升 0.46, 0.21, -0.22, -0.20, 0.01 °C, SC 处理分别降低 2.79, 2.35, 1.72, 0.30, -0.22 °C, SP 较 SC 处理土壤日均温度分别

提高 3.25, 2.56, 1.50, 0, -0.21 °C。9 月随着气温下降, SC 比 SP 处理和 CK 土壤日均温度分别提高 0.21, 0.22 °C。

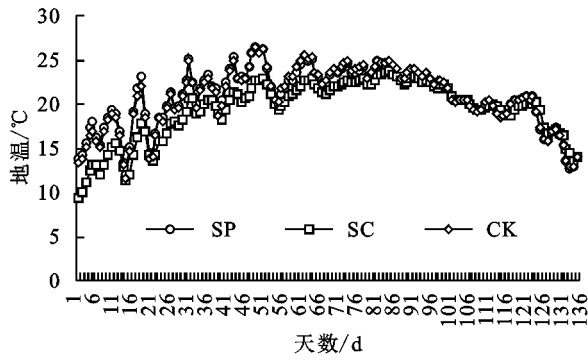
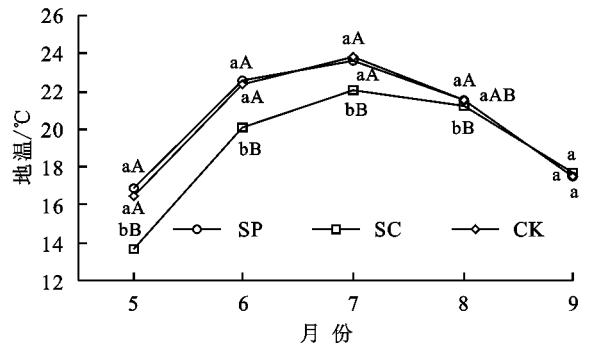


图 5 不同秸秆还田处理对玉米生育期内土壤温度的影响



2.2.2 秸秆还田对耕层土壤垂直温度的影响 按 5, 10, 15, 20 cm 土层统计不同处理生育期内日均土壤温度, 由图 6 可知, 所有处理土壤温度均随着耕层的加深而降低。与 CK 土壤温度相比, SC 处理在各层次的土壤温度均明显降低, 但 15 cm 以下土壤温度下降缓慢, 而 SP 处理在土层 12 cm 以上高于 CK, 12 cm 以下低于 CK, 说明秸秆深翻还田随着土壤层次的加深, 温度下降速率快于对照。与 5 cm 处土壤温度相比, 10, 15, 20 cm 处 SP 处理土壤温度分别下降 0.34, 0.84, 1.29 °C, SC 处理分别下降 0.52, 0.94, 1.09 °C, CK 分别下降 0.16, 0.47, 0.89 °C, 下降速率表现为 SC>SP>CK。

粒数和百粒重实现产量的提高。

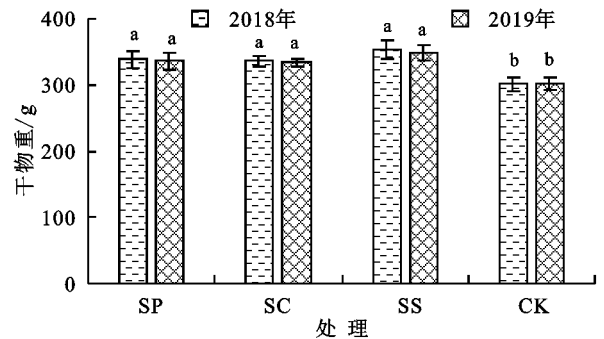


图 7 秸秆还田对玉米干物质积累的影响

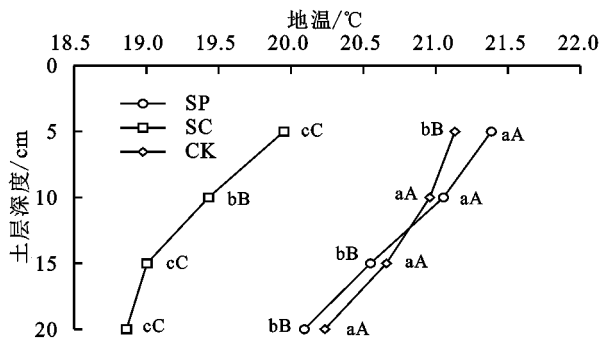


图 6 秸秆还田对不同耕层土壤温度的影响

表 1 秸秆不同还田处理对玉米产量及其构成因素的影响

年份	处理	穗数	穗粒数	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2018	SP	62000a	529a	33.9b	11108.3b
	SC	62000a	529a	33.8b	11090.4b
	SS	62000a	537a	35.3a	11757.2a
	CK	62000a	511b	32.6b	10324.6c
2019	SP	66000a	614a	31.4ab	12723.1a
	SC	66000a	612a	31.3ab	12651.6a
	SS	66000a	617a	32.9a	13388.1a
	CK	66000a	589b	30.0b	11660.2b

注:表中百粒重和产量均为籽粒含水率 14% 时的数值; 同列不同小写字母表示在 P<0.05 水平上差异显著。

2.3 不同秸秆还田处理对玉米干物质积累的影响

与秸秆离田相比, 秸秆还田处理显著增加玉米成熟期单株生物量积累, 2018 年和 2019 年 SP、SC 及 SS 处理较 CK 分别增加 12.2%, 11.7%, 17.3% 和 11.8%, 10.9% 和 15.8% (图 7)。

2.5 不同秸秆还田处理对水分利用效率的影响

由图 8 可知, 与 CK 相比, 2018 年和 2019 年秸秆还田处理显著提高水分利用效率(WUE), SS 处理分别提高 13.89% 和 9.80%, SP 处理分别提高 6.36% 和 6.02%, SC 处理分别提高 5.77% 和 3.92%。且 2018 年 SS 处理的 WUE 显著高于 SP、SC 处理, 而 2019 年不同秸秆还田处理的水分利用效率间差异不显著。

2.4 不同秸秆还田处理对玉米产量的影响

由表 1 可知, 秸秆还田显著提高玉米产量, 2018 年, 与 CK 相比, SP、SC 和 SS 处理分别增产 7.59%, 7.42% 和 13.88%, 且 SS 处理玉米产量显著高于 SP、SC 处理。SS 处理通过增加百粒重提高玉米产量。2019 年, SP、SC、SS 处理较 CK 分别增产 9.12%, 8.50% 和 14.82%, 但秸秆不同还田处理间玉米产量差异不显著。相对于 CK, 秸秆还田处理通过增加穗

2.6 相关性分析

对玉米各生育时期、各土层土壤贮水量、5—8 月地温、5—20 cm 土层地温及玉米产量和水分利用效率进行相关性分析(表 2)。结果表明, 土壤贮水量与所有地温的负相关性均达到显著或极显著水平, 说明

土壤贮水量越多,土壤温度越低。各土壤贮水量间、土壤温度间均呈显著正相关。玉米产量与各生育时期和土层 0—60 cm 土壤贮水量呈显著正相关,与 5, 8 月及 5 cm 土壤温度相关性不显著,说明土壤水分是玉米产量形成的限制因子,而 5, 8 月及表层地温对玉米产量的形成影响不大。水分利用效率 5, 8 月及 5 cm 土层与花期之外各土壤贮水量相关性达到显著水平,与 7 月和 15 cm 以下地温显著负相关,单株干物重、玉米产量和水分利用效率三者间相关性显著。

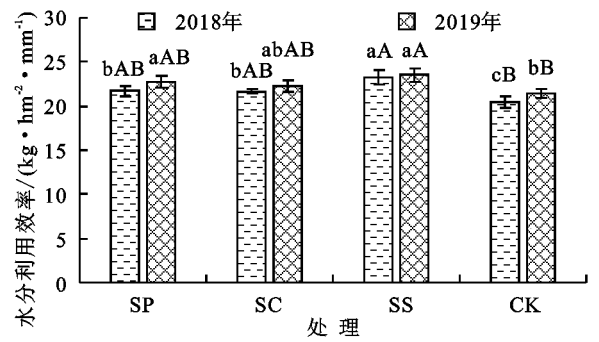


图 8 不同秸秆还田处理对水分利用效率的影响

表 2 土壤水分、温度与玉米产量、水分利用效率的相关性分析

指标	土壤贮水量									土壤温度								产量	水分利用效率		
	0—20 cm	21—40 cm	41—60 cm	播种	苗期	拔节	花期	灌浆	生育期	5月	6月	7月	8月	5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层				
0—20 cm	1.00	0.81*	0.87*	0.93**	0.88*	0.96**	0.93*	0.90*	0.93**	-0.95**	-0.91**	-0.90**	-0.80*	-0.89**	-0.94**	-0.96**	-0.971**	0.70*	0.66*		
21—40 cm			0.76*	0.90**	0.83*	0.90**	0.87**	0.87**	0.86**	-0.80*	-0.79*	-0.82**	-0.72**	-0.82**	-0.84**	-0.84**	-0.85**	0.64*	0.61*		
41—60 cm				0.83*	0.94*	0.92*	0.89**	0.89*	0.87*	-0.89**	-0.88**	-0.87**	-0.75*	-0.90**	-0.91**	-0.90**	-0.89**	0.64*	0.65*		
播种					0.87**	0.95**	0.93**	0.93**	0.89**	-0.88**	-0.85**	-0.89**	-0.80**	-0.87**	-0.90**	-0.93**	-0.94**	0.66*	0.60*		
苗期						0.97**	0.96**	0.97**	0.93**	-0.97**	-0.95**	-0.89**	-0.84*	-0.96**	-0.96**	-0.96**	-0.95**	0.68**	0.66*		
拔节							0.97**	0.99**	0.96**	-0.95**	-0.95**	-0.94**	-0.84**	-0.95**	-0.97**	-0.95**	-0.98**	0.72**	0.67*		
花期								0.96**	0.90**	-0.98**	-0.97**	-0.91**	-0.89**	-0.98**	-0.98**	-0.98**	-0.98**	0.56*	0.50		
灌浆									0.97**	-0.95**	-0.94**	-0.94**	-0.84**	-0.95**	-0.97**	-0.99**	-0.99**	0.75**	0.68**		
生育期										-0.91**	-0.91**	-0.89**	-0.78*	-0.89**	-0.92**	-0.94**	-0.94**	0.81**	0.76**		
5月											0.90**	0.87**	0.90**	0.98**	0.98**	0.98**	0.98**	-0.55	-0.51		
6月												0.86**	0.87**	0.98**	0.98**	0.97**	0.97**	-0.58*	-0.50		
7月													0.77*	0.90**	0.92**	0.95**	0.94**	-0.60**	-0.59*		
8月														0.90**	0.90**	0.89**	0.88**	-0.35	-0.32		
5 cm 土层															0.99**	0.98**	0.98**	-0.52	-0.47		
10 cm 土层																0.99**	0.99**	-0.50*	-0.52		
15 cm 土层																	0.98**	-0.65*	-0.58*		
20 cm 土层																		-0.64*	-0.56*		
产量																				0.96**	
水分利用效率																					1.00

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平下显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平下显著相关。

3 讨论

3.1 土壤贮水量

玉米的根系主要分布在 0—60 cm 的土层范围内^[17-18],该层次根系对土壤水分的吸收能力最强。土壤水分在空间、季节和年际间的变化、表层土壤水分含量均与降雨量关系密切^[19-20]。本研究结果表明,2018 年,SS 与 SC 处理在各生育时期的土壤贮水量均显著高于 SP 处理与 CK;2019 年,SC 与 SS 处理在播种时、开花至成熟期 2 个生育阶段的土壤贮水量均高于 CK。SC 和 SS 处理的保水效果均优于 CK,上层土壤中混入秸秆可使土壤的孔隙度增加,采用 SC 处理可减少土壤水分蒸发,维持中、下层土壤的贮水量,采用 SS 处理时,深松可打破犁底层,显著降低

10—30 cm 土层的土壤容重,增加土壤孔隙度,扩大“土壤水库”容量,增加降雨入渗,致使下层贮水量增加,这与 Cui 等^[21]的研究结果基本一致。土壤贮水量的变化除受阶段性降雨量的影响外,还与植株的蒸腾量有关,玉米苗期蒸腾量较少,多余的降水积蓄在土壤中,随着植株的生长发育,需水量增加,阶段性的降雨不能满足植株所需时会消耗土壤中的水分。与 CK 相比,秸秆还田处理提高土壤贮水量,高飞等^[22]和路文涛等^[23]研究认为,与秸秆不还田相比,随着秸秆还田量的增加,土壤贮水量(0—200 cm)分别增加 30.17, 31.13, 32.83 mm 和 8.8%, 9.9%, 6.8%。本研究表明,2018 年和 2019 年 SP、SC、SS 处理分别提高土壤贮水量 2.7% 和 0.4%, 12.4% 和 9.8%, 13.6% 和

9.8%,SS处理在2018年和2019年0—60 cm土层秋季土壤贮水量分别增加14.3%和7.69%。这与温美娟等^[24]的研究结果基本一致,SS处理在覆盖保墒的基础上,增加雨水的积蓄量,对土壤贮水量的增加起到重要的推动作用。

3.2 土壤温度

张敬涛等^[25]研究认为,与常规垄作处理相比,秸秆覆盖免耕处理的土壤表层和深层温度均不同程度降低,尤其在生育前期(苗期)的温度差异最为显著,随着生育时期的推进,对土壤温度的降低作用逐渐减弱。张冬梅等^[26]研究认为,与无秸秆还田春旋耕处理相比,秸秆还田秋深耕可显著提高玉米苗期土壤表层的日平均地温和日最低平均地温,3年平均分别提高1.1,1.3℃。本研究结果表明,秸秆覆盖降低5—8月的土壤温度,而秸秆深翻提升5—6月的土壤温度,且随着玉米生育进程推进,温度变化的幅度在减弱。与旋耕垄作的处理相比,SC处理在播种期(5月)土层5 cm和0—20 cm土壤日平均温度分别降低2.67,2.79℃,SP处理分别提升0.64,0.46℃。苗期至拔节期(6月)耕层5.0—20 cm土壤日平均温度,秸秆覆盖分别降低2.07,2.35℃,秸秆深翻分别提升0.48,0.21℃,与张敬涛等^[25]和张冬梅^[26]等研究结果一致。

随土层深度的增加,土壤温度逐渐下降,降温幅度为0.46~3.62℃,其中以苗期土壤温度变化最大^[25]。本研究结果表明,播种期(5月)土层深度为0—20 cm时,随着土层深度的增加,SP、SC和CK处理土壤温度分别下降0.59~2.36,0.79~1.88,0.59~1.93℃,SP、SC处理和CK随土层深度的增加,地温分别下降0.33~1.29,0.52~1.09,0.16~0.89℃。刁生鹏等^[27]研究认为,秸秆还田对0—10,10—20 cm土层土壤温度影响显著,且秸秆还田各处理在玉米苗期和成熟期的增温效果最为明显。5月份5,10,15,20 cm土层日均地温SP处理比CK分别增加0.64,0.64,0.34,0.21℃。曹庆军等^[28]研究发现,与秸秆不还田相比,在播种期,5,10,15,20 cm土层深度土壤温度秸秆覆盖处理分别降低1.8,1.2,2.0,3.0℃。本研究中,与秸秆离田相比,5,10,15,20 cm土层深度土壤温度,5月份秸秆覆盖处理日均地温分别降低2.67,2.87,3.02,2.62℃,全生育期日均地温分别降低1.1,1.6,1.7,1.3℃,秸秆覆盖降低土壤温度,与曹庆军等^[28]的研究结果基本一致。

3.3 玉米产量和水分利用效率

在雨养农业区,年际间降雨量直接影响玉米产量,增产的关键在于提高土壤贮水量。本研究结果表

明,秸秆还田的处理增加玉米生育期内的土壤贮水量,促进玉米干物质积累,使玉米各器官的干物质向籽粒运转,从而显著提高玉米产量和水分利用效率。杨帆等^[29]研究认为,秸秆还田处理平均增产4.4%~6.8%;王泮等^[30]研究认为,秸秆翻埋还田(30 cm)的玉米产量增产幅度为5.7%~7.1%。本研究结果表明,秸秆深翻还田的处理2年分别增产7.59%和9.12%,与其研究结果基本一致。Feng等^[31]研究表明,深松可以疏松土壤结构,增加土壤水分在下层的有效性和渗透性,改善玉米根系在土壤中的纵横向伸展,提高玉米干物质质量与产量。本研究结果表明,秸秆覆盖深松处理2年分别增产玉米13.88%和14.82%,水分利用效率分别提高13.89%和9.80%,这与温美娟等^[24]的研究结果基本一致。秸秆还田条件下深松35 cm能促进玉米生产,与旋耕秸秆不还田的处理相比,2年平均增产25.6%,水分利用效率提高32.4%。

4 结论

秸秆还田提高土壤贮水量,与CK相比,播种期SP和SC处理2年平均土壤贮水量分别提高7.56%和23.08%,开花期SP、SC和SS处理分别提高4.81%,16.28%和13.72%。与CK相比,SP处理提升5,6月地温,分别为0.46,0.21℃,SC处理降低5—7月地温,降温幅度为2.79~1.72℃,秸秆还田提高玉米产量和水分利用效率,与CK相比,SP、SC和SS处理2年玉米产量分别增加8.36%,7.96%和14.35%,水分利用效率分别提高6.19%,4.85%和11.85%。综上所述,半湿润雨养条件下,秸秆覆盖深松是减少地表水分蒸发,改善耕层构造,增加土壤蓄水量,改良土壤,提高玉米产量和水分利用效率的重要技术措施,本研究结果可为雨养区玉米增产和水分高效利用提供理论依据和技术支持。

参考文献:

- [1] 安刚,孙力,廉毅.东北地区可利用降水资源的初步分析[J].气候与环境研究,2005,10(1):132-139.
- [2] 邹洪涛,关松,凌尧,等.秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响[J].土壤通报,2013,44(6):1398-1402.
- [3] 武志杰,张海军,许广山,等.玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J].应用生态学报,2002,13(5):539-542.
- [4] 王喜艳,张亚文,冯燕,等.玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):103-107.
- [5] 赵伟,陈雅君,王宏燕,等.不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和物理性状的影响[J].玉米科学,2012,20(6):98-102.

- [6] 张帅,孔德刚,常晓慧,等.秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(6):127-129.
- [7] 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.
- [8] 柏会子,王洋,石海,等.秸秆不同还田方式对土壤蒸发特性影响[J].土壤与作物,2012,1(4):241-247.
- [9] Li R F, Ruan X H, Bai Y, et al. Effect of wheat-maize straw return on the fate of nitrate in groundwater in the Huaihe River Basin, China[J].The Science of the Total Environment,2017,592:78-85.
- [10] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,81(2):2695-2702.
- [11] 宫亮,孙文涛,王聪翔,等.玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J].玉米科学,2008,16(2):122-124,130.
- [12] 丁瑞霞,王维钰,张青.两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(8):1106-1118.
- [13] 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.
- [14] 安俊朋,李丛锋,齐华,等.秸秆条带还田对东北春玉米产量、土壤水氮及根系分布的影响[J].作物学报,2018,44(5):774-782.
- [15] Lin W, Liu W Z, Xue Q W. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau[J/OL].Scientific Reports,2016,6: 38995. doi: 10.1038/srep38995.
- [16] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等.耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1785-1792.
- [17] Nichols V A, Ordóñez R A, Wright E E, et al. Maize root distributions strongly associated with water tables in Iowa, USA[J].Plant and Soil,2019,444(1/2):225-238.
- [18] 隋鹏祥,张文可,梅楠,等.不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):255-261.
- [19] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatiotemporal prediction of soil moisture content for an event-based hydrology model in a gully catchment of the Loess plateau, China[J].Catena,2003,54:173-196.
- [20] Henninger D L, Petersen G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: Variations, factors in fluencing, and relationship to surface runoff[J].Soil Science Society of America Journal,1976,40:773-776.
- [21] Cui M, Guo C J, Meng F H. Application of returning straw to field to improve the black soil quality in small watershed in black soil region of China[J].Science of Soil and Water Conservation,2006,4(5):56-59.
- [22] 高飞,贾志宽,路文涛,等.秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J].生态学报,2011,31(3):777-783.
- [23] 路文涛,贾志宽,高飞,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(1):93-99.
- [24] 温美娟,王成宝,霍琳,等.深松和秸秆还田对甘肃引黄灌区土壤物理性状和玉米生产的影响[J].应用生态学报,2019,30(1):224-232.
- [25] 张敬涛,刘婧琦,赵桂范,等.免耕栽培不同秸秆覆盖量下土壤温度变化研究[J].中国农学通报,2015,31(27):224-228.
- [26] 张冬梅,张伟,姜春霞,等.旱地玉米不同耕作覆盖措施的土壤环境及产量效应[J].中国农业大学学报,2019,24(6):26-37.
- [27] 刁生鹏,高日平,高宇.内蒙古黄土高原秸秆还田对玉米农田土壤水热状况及产量的影响[J].作物杂志,2019(6):83-89.
- [28] 曹庆军,杨粉团,孔凡丽,等.秸秆全量还田条耕种植模式对春玉米出苗质量与产量的影响[J].东北农业科学,2020,45(3):6-11.
- [29] 杨帆,董燕,徐明岗,等.南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3040-3044.
- [30] 王洋,王美佳,苏思慧,等.水分胁迫下秸秆还田对玉米产量和根系空间分布的影响[J].应用生态学报,2018,29(11):3643-3648.
- [31] Feng X M, Hao Y B, Latifmanesh H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of northeastern China[J].Agronomy Journal,2018,110(4):1607-1615.