

半干旱区地表覆盖方式对土壤 水温效应及玉米产量的影响

张丽华,徐晨,闫伟平,孙宁,谭国波,
于江,赵洪祥,李斐,孟祥盟,边少锋

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为探索吉林省半干旱区水分高效利用、玉米增产的栽培技术模式,采用不同覆盖材料进行为期4 a (2018—2021年)的大田试验,设置无覆盖(CK)、普通地膜覆盖(CM)、降解地膜覆盖(DM)和秸秆覆盖(SM)4个处理,研究不同覆盖方式对土壤水分、土壤温度、玉米生长发育及产量和水分利用效率的影响。结果表明:玉米生育期内土壤贮水量时空变化与当年的降雨时空分配有关,垂直空间上20~60 cm土层土壤贮水量显著高于0~20 cm,处理间土壤贮水量SM>CM>DM>CK;耕层0~20 cm土壤温度随玉米生育时期推进呈先升后降的变化趋势,随土层深度的增加逐渐降低,降低幅度呈CM>SM>DM>CK的变化趋势。地表覆盖具有调节土壤温度的作用,与CK相比,CM和DM使5、6月土壤温度分别提升2.12、1.71℃和2.07、1.52℃,SM下降了1.72、1.01℃;与5、6月气温相比,地膜覆盖每日土壤温度较气温提升2.2~3.2℃,秸秆覆盖降低0.3~0.6℃,8、9月覆盖土壤温度下降幅度低于气温;与无覆盖(CK)相比,CM和DM处理4 a平均增产8.59%和14.10%,SM减产8.96%,水分利用效率CM和DM提高10.3%和15.6%,秸秆覆盖降低8.4%;玉米产量与5、6、8、9月以及5、10、15、20 cm土壤温度呈极显著正相关($P<0.01$),与0~20 cm土层、R1期土壤贮水量呈极显著负相关($P<0.01$)。降解地膜覆盖具有保墒、升温、增产、水分利用高效且环保等多重作用,可在半干旱区水分高效玉米增产栽培中进行推广。

关键词:玉米;地表覆盖方式;土壤水分;土壤温度;产量;半干旱区

中图分类号:S513;S36;S152 **文献标志码:**A

Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area

ZHANG Lihua, XU Chen, YAN Weiping, SUN Ning, TAN Guobo, YU Jiang,
ZHAO Hongxiang, LI Fei, MENG Xiangmeng, BIAN Shaofeng

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: To explore water efficient cultivation technology and improve maize yield in semi-arid area of Jilin Province, a four-year experiment was carried out with different mulching materials. Four treatments included no mulching (CK), common plastic film mulching (CM), degradable plastic film mulching (DM) and straw mulching (SM). The effects of different mulching treatments on soil moisture, soil temperature, maize growth and development, yield and water use efficiency were studied. The results showed that the temporal and spatial variation of soil water storage during maize growth period was related to the temporal and spatial distribution of rainfall in that year. The soil water storage in 20~60 cm vertical space was significantly higher than that in 0~20 cm, and the soil water storage of different treatments was SM>CM>DM>CK. The soil temperature of 0~20 cm in the cultivated layer increased first and then decreased with the growth period of maize, and gradually decreased with the increase of soil depth. The decreasing range was CM>SM>DM>CK. Compared with CK, CM and DM increased the ground temper-

收稿日期:2022-03-10

修回日期:2022-05-31

基金项目:吉林省农业科技创新工程项目-创新团队(CXGC2021TD003);国家现代农业产业技术体系洮南综合试验站项目(CARS-02-50);国家重点研发计划课题(2017YFD0300605)

作者简介:张丽华(1974-),女,吉林公主岭人,研究员,主要从事作物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,吉林辽源人,研究员,主要从事旱作节水研究。E-mail: bsf8257888@sina.com

ature by 2.12℃, 1.71℃ and 2.07℃, 1.52℃ respectively in May and June, while SM decreased by 1.72℃, 1.01℃. Compared with the temperature in May and June, the daily ground temperature of plastic film mulching increased by 2.2~3.2℃, and that of straw mulching decreased by 0.3~0.6℃. The decline range of ground temperature of mulching in August and September was lower than that of air temperature. The average yield of CM and DM increased by 8.59% and 14.10%, that of SM decreased by 8.96%, the water use efficiency of CM and DM increased by 10.3% and 15.6%, and the straw mulching decreased by 8.4%. Maize yield was significantly positively correlated with soil temperature in soil layer 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm during May, June, August and September, and negatively correlated with soil water storage in soil layer 0~20 cm and R1. Degradable plastic film mulching has multiple functions such as moisture conservation, temperature rise, yield increase, water efficiency and environmental protection. It can be popularized in the cultivation of water efficient maize yield in semi-arid area.

Keywords: maize; surface mulching; soil moisture; soil temperature; yield; semi-arid area

干旱是制约吉林省半干旱地区农业可持续发展的主要因素,如何提高有限水资源的利用效率是该地区农业生产面临的主要问题。地表覆盖作为一种土壤调控技术,不仅能提高水分利用效率,调节土壤温度,起到保水调温的作用,还可以改善土壤物理性状和土壤微生物环境,同时能够减少水土流失,为作物生长提供适宜的水、肥和热等条件,从而提高作物产量^[1]。目前,在吉林省半干旱区的农业生产上广泛应用的覆盖材料主要包括塑料地膜、可降解地膜^[2]和作物秸秆^[3]等。关于地表覆盖对土壤生态环境、作物生长发育及产量、水分利用效率等影响的研究已有大量报道。研究表明,秸秆和地膜覆盖改变了农田土壤微生物群落组成,秸秆覆盖增加了土壤细菌群落丰富度和多样性,且显著增加了分解纤维素的细菌及介导固氮和硝化过程的细菌丰度($P<0.05$);地膜覆盖增加了土壤细菌丰富度,但降低了细菌多样性,且显著增加了介导土壤硝化作用的硝化螺菌属 *Nitrospira* 的丰度($P<0.05$)^[4]。地膜和秸秆覆盖均能够增加土壤微生物活性,加快土壤氮素的矿化速率,增加土壤氮素的有效性^[5]。地表长期覆膜不利于旱地土壤有机碳累积,但秸秆覆盖可以增加表层土壤轻质有机碳累积^[6-8]。地膜和秸秆覆盖降低了土壤硬度和耕层容重,增加土壤有机质和速效养分含量^[9-10]。秸秆和地膜覆盖都不同程度地增加了玉米株高、茎粗和单株干物质积累量等,且地膜覆盖在玉米生育前期促进作用较大,而秸秆覆盖的作用则主要表现在玉米生育中后期^[11]。地膜和秸秆覆盖都提高了土壤水分,且秸秆覆盖的保墒效果优于塑料地膜和生物降解膜覆盖;但地膜覆盖可升温增产,秸秆覆盖则易导致降温减产^[12-14]。也有研究认为,秸秆覆盖能促进土壤养分和水分的提高,调节土壤温度,提高玉米产量和水分利用效率^[15-16]。学者们做了大量的

地表覆盖研究工作,但关于吉林省半干旱区塑料地膜、降解地膜和作物秸秆覆盖条件下土壤水分、土壤温度的时空动态变化研究鲜见报道。据此,本研究采用 3 个不同材料的覆盖处理,研究玉米大量根系所在土层深度的土壤水分和耕层土壤温度在时间和空间上的动态变化趋势,分析不同覆盖措施对土壤水分、土壤温度、玉米生长发育、玉米产量及水分利用效率的影响,探寻玉米增产提效的最佳覆盖栽培技术,以期半干旱区玉米增产、水分高效利用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—2021 年在吉林省洮南市洮府乡万福村(122°24′00″E,45°11′24″N)和吉林省农业科学院洮南综合实验站(122°48′55″E,45°20′02″N)试验田进行,洮南属北温带大陆性季风气候,年均降水量 377.9 mm,年均蒸发量 2 083 mm,年均日照时数 3 005 h,无霜期 142 d,年均有效积温 3 000℃。土壤类型为淡黑钙土,土壤基础肥力见表 1。2018—2021 年 5—9 月降雨与气温变化如图 1。

1.2 试验设计

供试玉米品种为翔玉 218,播种日期分别为 2018 年 5 月 3 日、2019 年 5 月 9 日、2020 年 5 月 2 日和 2021 年 4 月 30 日,播种机播种,密度均为 6.5 万株·hm⁻²。试验设置无覆盖(CK)、普通地膜覆盖(CM)、可降解地膜覆盖(DM)和粉碎秸秆全覆盖(SM)4 个处理,大区种植,每个小区 6 垄,大垄双行种植,即 1.2 m 宽垄上种植 2 行,行距为 40 cm,垄长 80 m。播种后机械铺设滴灌带和覆膜一次完成,滴灌带铺在垄上苗带中间,地膜覆在垄台上。粉碎秸秆均匀覆盖在播种后且铺好滴灌带的地表面,用量 9 000 kg·hm⁻²。试验所用肥料为史丹利复合肥

(N : P₂O₅ : K₂O = 18 : 18 : 18), 用量 500 kg · hm⁻², 播种时作为底肥施入, 拔节和大口期两次追施尿素各 100 kg · hm⁻², 水肥一体化方式施入; 灌溉水全部随追肥施入土壤, 灌溉量和灌溉时间因当年干旱情况和施肥时间不同而有所不同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤贮水量 于玉米播种期、苗期(V3)、拔节期(V6)、吐丝期(R1)、灌浆期(R3)和成熟期(R6), 采用质量烘干法测量土层 0~60 cm 土壤质量含水率, 20 cm 为 1 个层级。土壤贮水量计算公式如下:

$$W = h \times p \times w \times 10/100 \tag{1}$$

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 为土壤质量含水率(%), 土层厚度以 20 cm 或 60 cm 计算。

1.3.2 土壤温度 2018—2021 年利用土壤温度自动记录仪(L93-4, 杭州路格科技有限公司)监测记录玉米田土壤温度变化, 每个处理在试区中心放置 1 台记录仪, 将传感器探头横插在距表层 5、10、15 cm 和 20 cm 处, 每 1 h 自动记录 1 次, 监测播种至收获(即 5—9 月)期间每日 24 h 土壤温度情况。

表 1 试验田基础肥力
Table 1 Basic fertility of experimental field

年份 Year	地点 Site	土深 Soil depth /cm	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g · kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	pH
2018	万福村 Wanfu village	0~40	1.04	0.44	23.65	64.22	22.86	132.32	13.62	7.78
2019— 2020	洮站 1 Taonan station test field 1	0~60	0.54	0.38	20.24	41.86	6.03	78.67	9.49	8.55
2021	洮站 2 Taonan station test field 2	0~20	0.75	0.47	21.40	70.24	7.90	109.00	12.90	7.86

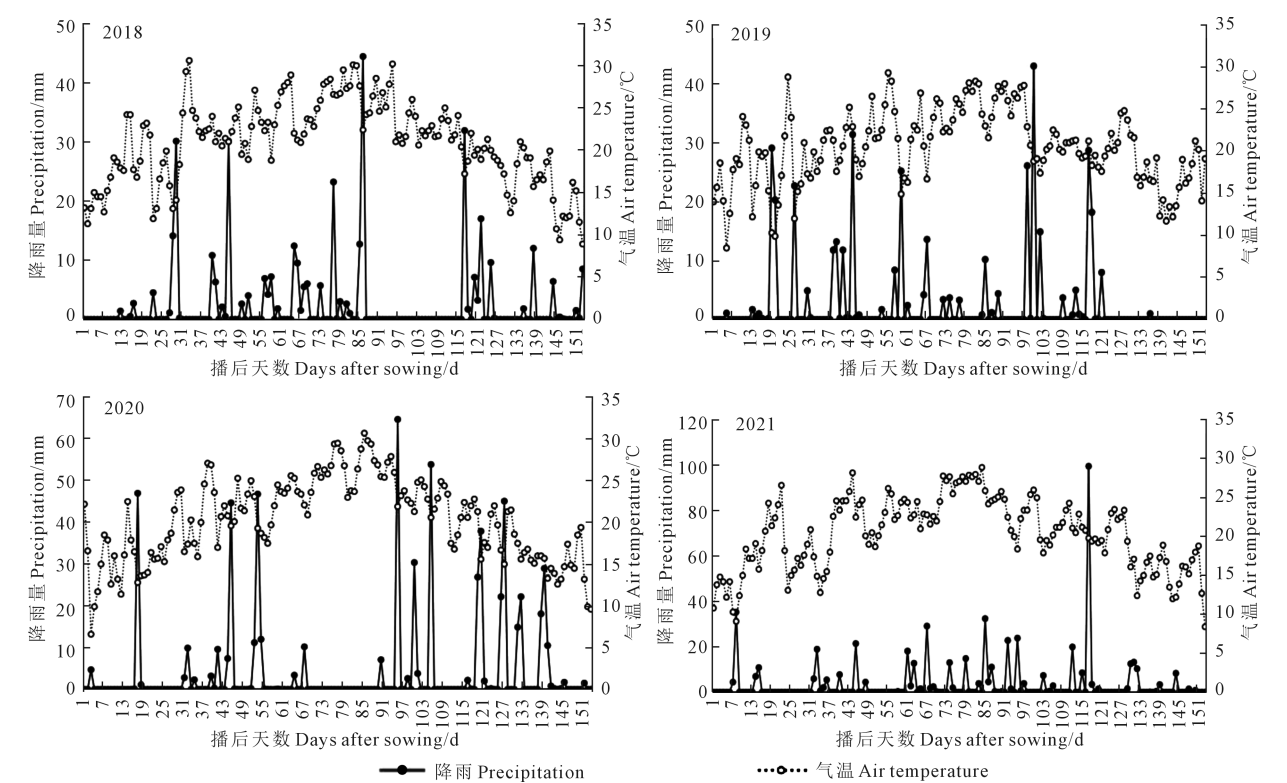


图 1 2018—2021 年玉米生育期降雨量及气温变化

Fig.1 Precipitation and temperature changes during maize growth from 2018 to 2021

1.3.3 玉米生长发育指标 分别于玉米的 V3、V6、R1 和 R6 期测定株高、叶面积指数和单株干物量,每个处理随机选取 3 点,每点选取两株具有代表性且长势基本一致的植株进行测定。

叶面积指数=单位土地叶片总面积/单位土地面积 (2)

1.3.4 产量及其构成因素 分别于 2018 年 9 月 28 日、2019 年 9 月 24 日、2020 年 9 月 26 日和 2021 年 9 月 25 日玉米收获后,各处理选取 10 m²区域进行测产,调查总穗数及总穗鲜质量,从中选取 10 穗与测产区域平均单穗质量相等的鲜穗,风干后进行考种。测定 10 穗玉米籽粒重、籽粒含水率和百粒重,按 14% 的籽粒含水率计算百粒重和玉米单位面积产量。

1.3.5 水分利用效率 玉米耗水量和水分利用效率计算公式如下:

$$ET = \Delta W + P + I \tag{3}$$

$$WUE = GY/ET \tag{4}$$

式中,ET 为生育期耗水量(mm),ΔW 为播种和收获时土壤贮水量之差(mm),P 为生育期内降雨量(mm),I 为生育期灌溉量(mm),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 为水分利用效率(kg·hm⁻²·mm⁻¹),GY 为玉

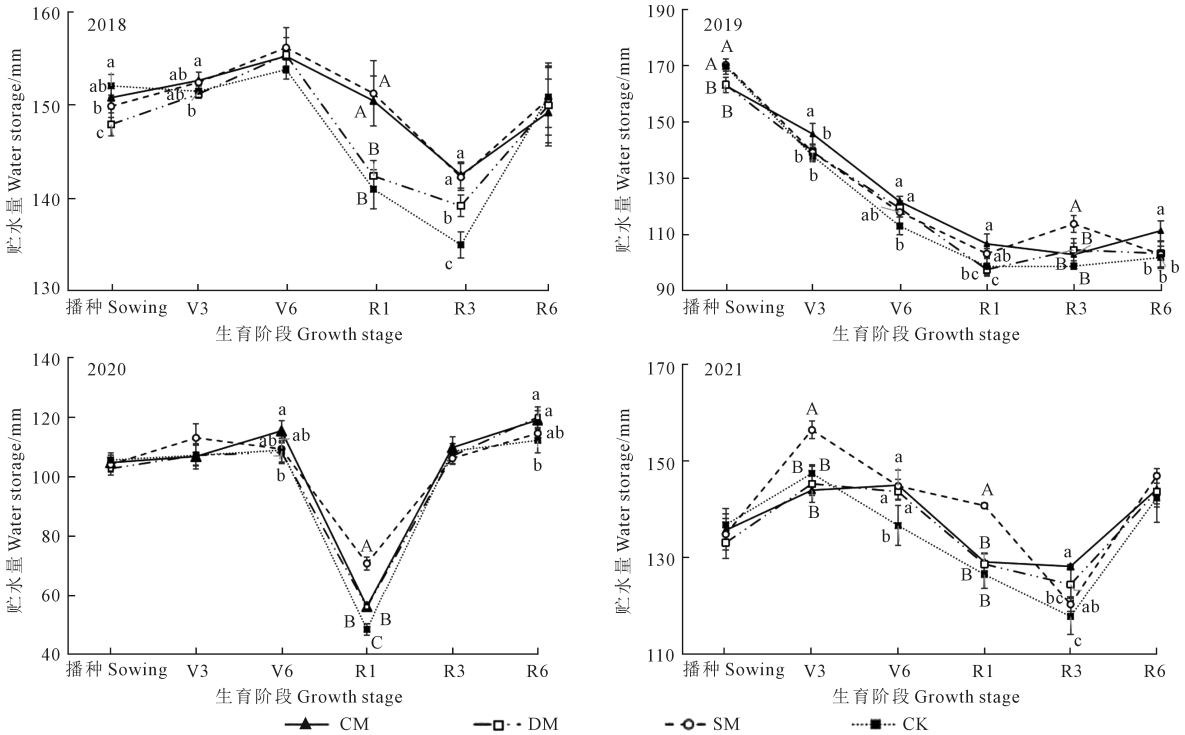
米籽粒产量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据处理

用 DPS v7.05 数据处理系统进行数据统计方差分析,Excel 2016 和 SigmaPlot 14.0 制图。

2 结果与分析

2.1 地表覆盖对土壤贮水量时空动态变化的影响
2.1.1 不同覆盖处理下玉米生育期土壤贮水量变化 0~60 cm 土层为土壤水分活跃层及玉米根系的主要分布区域,图 2 为不同处理 0~60 cm 土层土壤贮水量随时间的动态变化图。由于每年的降雨量及其时空分配不同(表 2),导致土壤贮水量随生育阶段推进变化趋势也不相同。2018 年和 2021 年土壤贮水量呈“N”字形曲线变化,V6 期最高,R3 期最低;两个年度播种至 V6 期降雨量分别占全生育期供水总量的 26.4% 和 21.7%,V6~R1 期分别占 21.6% 和 26.4%,R1~R3 期分别占 13.6% 和 11.1%,而植株需水量加大,导致 R3 期土壤贮水量最低。2019 年土壤贮水量呈“L”形下滑曲线,播种时最高,R1 期达到最低;2020 年则呈“V”形变化,V6 和 R3 期高,R1 期最低;2019 和 2020 年 V6~R1 期降雨量仅占全生育期供水总量的 0.39% 和 12.6%,故 R1 期土壤贮水量最低。



注:图中大、小写字母分别表示处理间差异极显著($P<0.01$)和差异显著($P<0.05$),无字母标记的处理间无显著差异,图 6 同。
Note: The capital and lowercase letters indicate that the differences among treatments are extremely significant ($P<0.01$) and significant differences ($P<0.05$) respectively, and there was no significant difference between treatment without letter mark. The same as Fig. 6.

图 2 不同覆盖处理对玉米各生育时期 0~60 cm 土层土壤贮水量的影响
Fig.2 Effects of different mulching treatments on 0~60 cm soil depth water storage at different maize growth stages

如图 2 所示,处理间土壤贮水量整体表现为地表覆盖高于无覆盖对照。V6~R3 期是玉米需水最多时期,此阶段土壤水分对玉米籽粒形成影响最大,2018 年土壤贮水量 CM 和 SM 间无显著差异,却显著高于 DM 和 CK,且 DM 处理显著高于 CK;2019 年与对照土壤贮水量相比,V6 期 CM 和 DM,R1 期 CM,R3 期 SM 显著提高;2020 年 R1 期土壤贮水量表现为秸秆覆盖>地膜覆盖>对照;2021 年 V6 期覆盖处理较不覆盖土壤贮水量显著提高,R1 和 R3 期分别为秸秆覆盖和地膜覆盖土壤贮水量增加。地表覆盖减少了土壤水分蒸发,提高了各时期土壤蓄水量,且秸秆覆盖保墒效果最佳,其次是普通地膜覆盖,再次是降解地膜覆盖。

2.1.2 不同覆盖处理下土壤贮水量垂直空间动态变化 R1 期和 R3 期是玉米需水的两个关键时期,直接关系到籽粒的形成与灌浆,而且此时也是土壤贮水量较低时期,为此分析了 2018—2020 年 R1 期和 2021 年 R3 期土壤贮水量垂直分布情况(图 3)。与 0~20 cm 土层相比,所有覆盖处理的 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的土壤贮水量均显著增加,除 2019 年 DM 处理、2021 年 SM、CK 处理 40~60 cm 土层土壤贮水量高于其他土层外,其余年份各处理土壤贮水量均表现为 20~40 cm 土层高于 40~60 cm

土层或两者差异不大。2018 年所有处理土壤贮水量 20~40 cm 土层显著高于 40~60 cm 土层;2019 年 CM 和 SM 处理的 20~40 cm 土层土壤贮水量极显著高于 40~60 cm 土层,CK 处理的 20~60 cm 土层土壤贮水量无显著变化;2020 年 SM 和 CK 处理 20~40 cm 土层土壤贮水量显著高于 40~60 cm 土层,

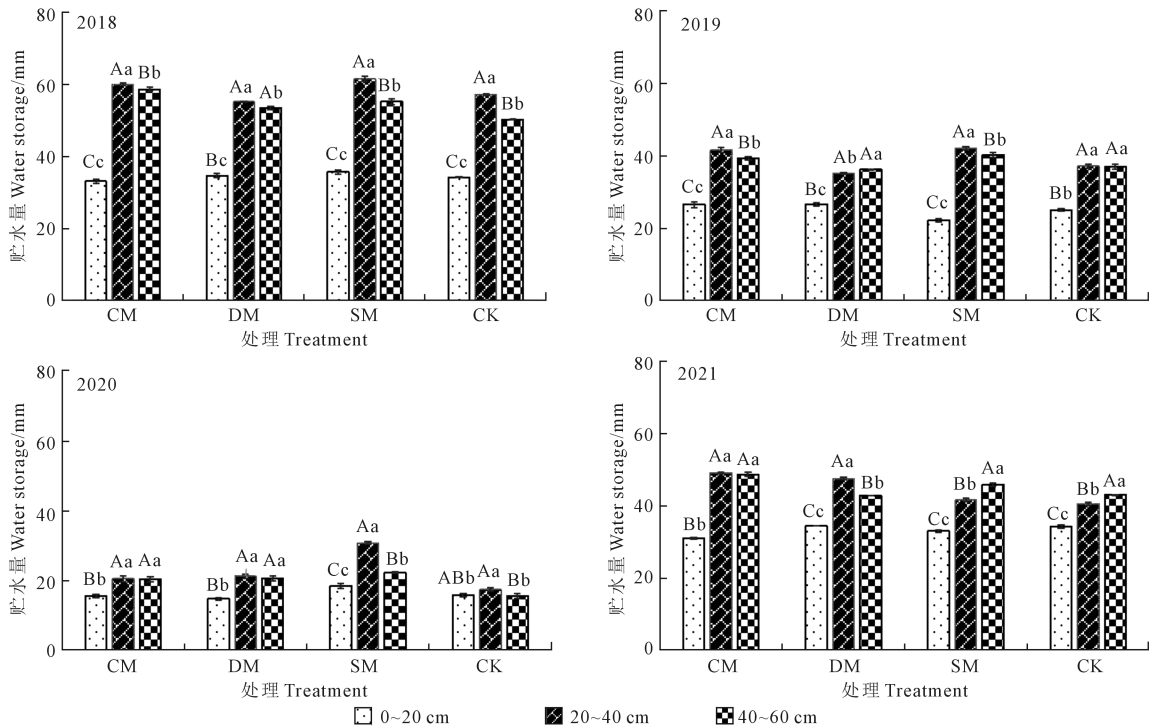
表 2 玉米不同生育阶段供水量占全生育期总供水量的百分比

Table 2 Percentage of water supply in different growth stages of maize in the total water volume in the whole growth period

年份 Year	总供水量 (降水+灌溉)/mm Total water supply (Precipitation +irrigation)	百分比 Percentage/%				
		播种 Sowing ~ V3	V3~ V6	V6~ R1	R1~ R3	R3~ R6
2018	420.1	13.0	13.4	29.9	21.9	21.8
2019	434.8	17.4	17.3	11.9	18.6	34.8
2020	664.1	8.0	15.9	16.4	24.5	35.3
2021	571.5	14.5	11.6	30.7	11.1	32.2

注:2018 年 V6~R1 和 R1~R3 阶段分别补充灌溉 35 mm,2019 年 V6~R1 阶段补充灌溉 50 mm,2020 年和 2021 年 V3~V6 及 V6~R1 阶段分别补充灌溉 25 mm,以上阶段供水量为降水量与灌溉量之和,其余时段供水量即为降水量。

Note: 35 mm of supplementary irrigation was carried out in V6~R1 and R1~R3 stage respectively in 2018, and 50 mm in V6~R1 stage of 2019. 25 mm of supplementary irrigation was carried out respectively in V3~V6 and V6~R1 stage for 2020 and 2021. The water supply in these stages was the sum of rainfall and irrigation water, and the water supply in other periods was rainfall.



注:图中大、小写字母分别表示同一处理不同土层间差异极显著($P<0.01$)和差异显著($P<0.05$)。

Note: The capital and lowercase letters indicate that the differences among different soil layers in the same treatment are extremely significant ($P<0.01$) and significant differences ($P<0.05$), respectively.

图 3 各处理不同土层土壤贮水量的变化

Fig.3 Changes of soil water storage in different soil layers under different mulching treatments

而 CM 和 DM 处理 20~60 cm 各土层间无显著差异; 2021 年 DM 处理 20~40 cm 土层土壤贮水量显著提高,CM 处理 20~60 cm 各土层无显著变化,SM 处理则随着耕层的加深,土壤贮水量极显著增加。CM 处理在降雨量较少的 2018 年和 2019 年,20~40 cm 土层土壤贮水量显著高于 40~60 cm 土层,而降雨量较大的 2020 年,20~60 cm 各土层间土壤贮水量无显著差异;SM 处理 2018—2020 年 20~40 cm 土层土壤贮水量极显著高于 40~60 cm 土层,2021 年则相反。

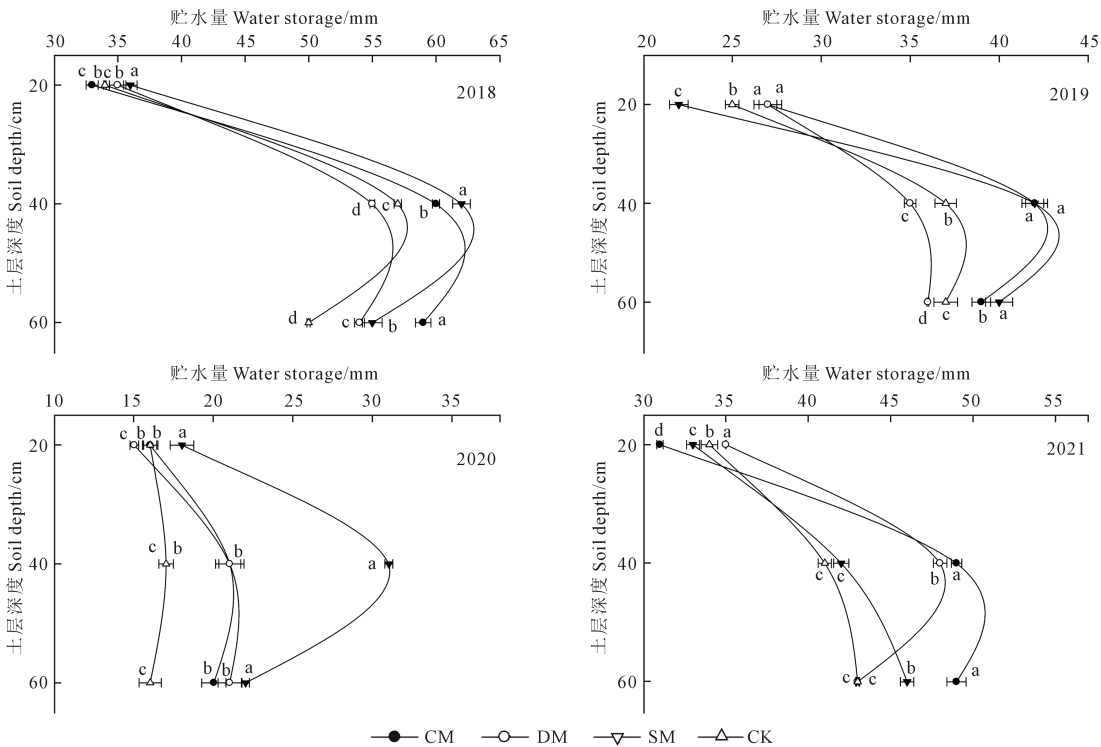
在分析了不同覆盖处理各土层水分动态变化的基础上,进一步分析 2018—2020 年 R1 期和 2021 年 R3 期相同土层贮水量对不同覆盖方式的响应(图 4)。结果表明,各覆盖处理相同土层的土壤贮水量显著高于 CK,且秸秆覆盖处理保水效果优于地膜覆盖。0~20 cm 土层土壤贮水量,2018 和 2020 年 SM 处理显著高于地膜覆盖和 CK,而 2019 和 2021 年则为地膜覆盖显著高于 SM 和 CK;土壤表层水分蒸发量最大,无论是粉碎秸秆覆盖,还是地膜覆盖均显著降低了土壤水分无效蒸发,增加了该层土壤贮水量。20~40 cm 土层土壤贮水量,2018—2020 年均为 SM 最高,其次是 CM,均显著高于 CK; 2021 年表现为 CM>DM>SM,CK。40~60 cm 土层土壤贮水量表现出 SM/CM>DM>CK 的趋势。

2.2 地表覆盖对土壤温度时空变化的影响

2.2.1 不同覆盖处理下玉米生育期 5~20 cm 耕层土壤温度变化 由图 5 可以看出,随着玉米生育进程推进,所有处理 5~20 cm 土层土壤日均温度呈先升后降的变化趋势。与对照相比,地膜覆盖土壤温度升高,秸秆覆盖土壤温度降低。

图 6 进一步证明了玉米生育期 5~20 cm 土层土壤平均温度呈先升后降的变化,各年份均在 7 月达到峰值。其中,5、6 月土壤温度 CM 和 DM 间无显著差异,均显著高于 CK 和 SM 处理,且 CK 也显著高于 SM 处理(2018 年 6 月温度除外);与 CK 处理 4 个年份 5~20 cm 土层平均每日土壤温度相比,5 月份 CM 和 DM 分别提高 2.12℃ 和 2.07℃,SM 降低 1.72℃;6 月份 CM 和 DM 分别提高 1.71℃ 和 1.52℃,SM 降低 1.01℃。7 月气温升高,处理间土壤温度差异缩小,但仍表现为 CM 处理显著高于 SM 处理。

表 3 为 2018—2021 年 5—9 月每月日均土壤温度及气温的变化情况,由各月的土壤温度与气温差可以看出,在气温较低的 5、6 月份,地膜覆盖每日土壤温度较气温可提升 2.2~3.2℃,秸秆覆盖降低 0.3~0.6℃;7 月日均气温升高到 25℃ 以上,此时间段对照及各覆盖处理的土壤温度均降低,且秸秆覆盖下降幅度最大,土壤温度降低是由于植株生长茂密,



注:图中小写字母表示相同土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。图 7 同。
Note: The lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same soil layer ($P<0.05$).
The same as Fig. 7.

图 4 相同土层不同覆盖处理下土壤贮水量的变化
Fig.4 Changes of soil water storage in the same soil layer under different mulching treatments

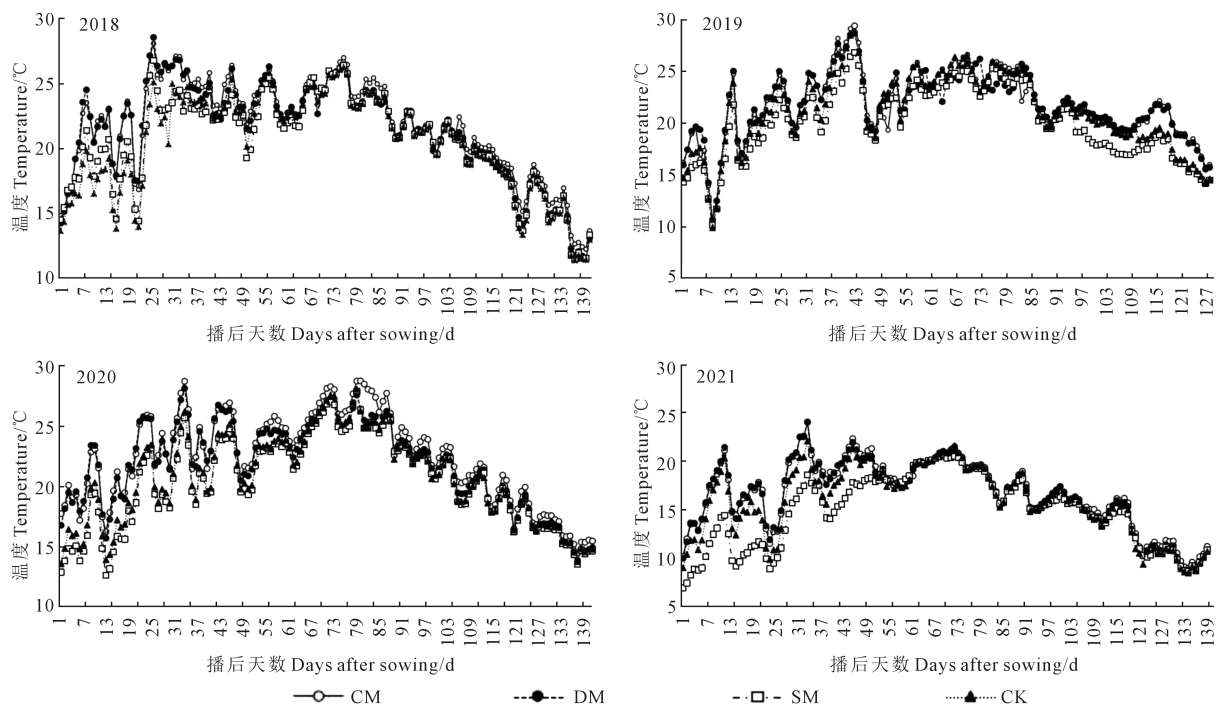


图 5 玉米生育期内不同处理土壤日温度变化

Fig.5 Changes of soil daily temperature under different treatments during maize growth period

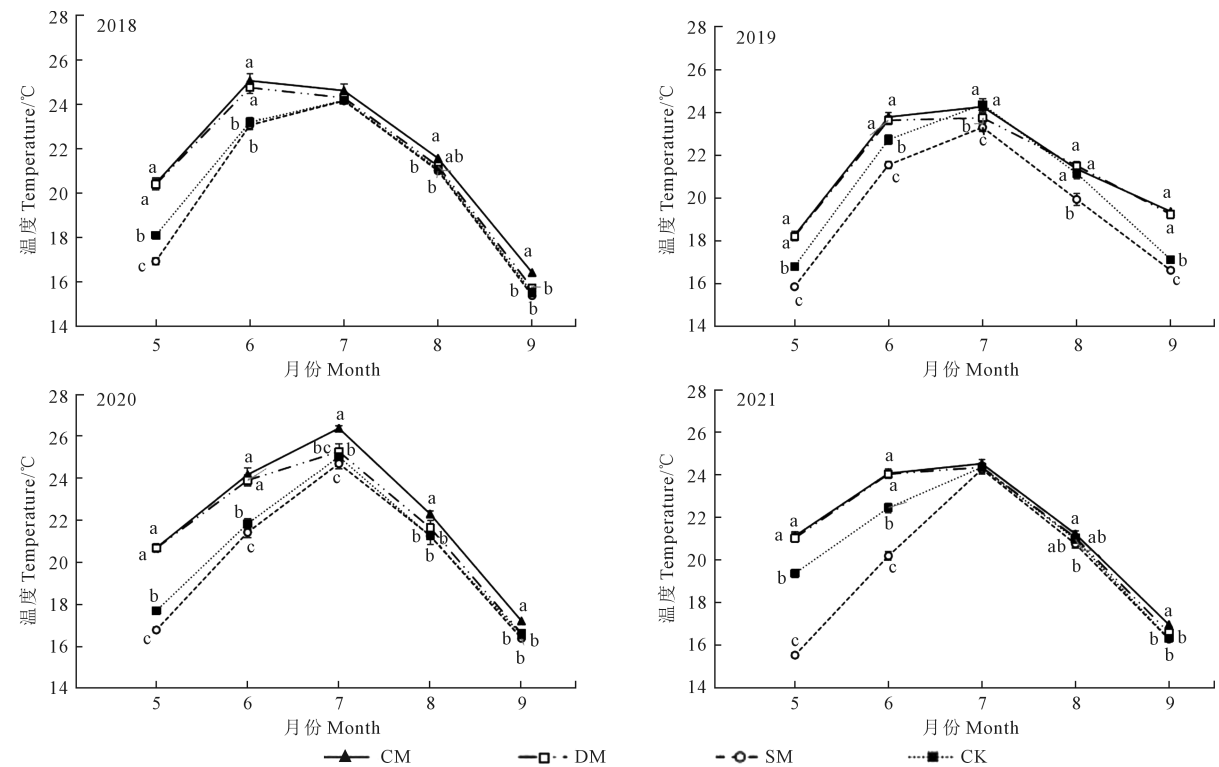


图 6 不同处理 5—9 月土壤日温变化

Fig.6 Changes of soil daily temperature under different treatments from May to September

叶片遮荫和秸秆覆盖减少了地面阳光辐射面积;8、9月气温降低,各处理土壤温度也随之降低,但降低幅度低于气温,说明覆盖处理具有调节土壤温度的作用。

2.2.2 不同覆盖处理对 5~20 cm 耕层土壤温度影响 由图 7 可以看出,所有处理土壤温度均随着耕层深度的增加而降低。相对于 5 cm 土层土壤温度,10、15、20 cm 土层处土壤日均温度(4 a 平均)CM 处

理分别下降了 0.3、0.7、1.0℃,DM 处理分别下降了 0.1、0.4、0.7℃;SM 处理分别下降了 0.3、0.5、0.9℃,CK 分别下降了 0.1、0.4、0.6℃;下降幅度表现为 CM > SM>DM>CK。与对照相比,5、10、15、20 cm 土层处土壤温度,CM 分别增加了 1.4、1.2、1.1、1.0℃;DM 分别增加了 0.9、0.9、0.9、0.8℃;SM 分别降低了 0.6、0.8、0.7、0.9℃,说明地膜覆盖对上层土壤增温效果显著,且普通地膜增温效果优于降解地膜。

2.3 地表覆盖对玉米生长发育的影响

表 4 为 2019—2021 年不同覆盖处理下玉米株高、叶面积指数变化情况,与对照 3 a 平均值相比,V3 期玉米株高和叶面积指数两种地膜覆盖均提高了 20.0% 和 100.0%,秸秆覆盖降低了 20.0% 和

33.0%;V6 期 CM、DM 分别提高了 11.6%和 59.6%、5.8%和 46.2%,SM 降低了 21.7%和 38.5%;R1 期 CM、DM 分别提高了 6.6%和 4.0%、7.3%和 4.5%,SM 降低1.8%和 5.7%。

由表 5 可知,地膜覆盖加速了玉米各生育阶段干物质积累速率,而秸秆覆盖干物质积累速度缓慢。与 CK 相比,V3、V6、R1 期单株干物质积累量,CM 和 DM 分别增加 27.8%、64.1%、16.2%和27.8%、70.8%、16.0%,秸秆覆盖减少 27.8%、28.8%、15.4%。R6 期 CM 和 DM 分别增加 11.5 %和 13.6 %,SM 减少 6.4 %。由不同处理各生育期数据变化可以看出,地膜覆盖对玉米前期生长发育促进作用更大,而秸秆覆盖促进了玉米中后期生长发育。

表 3 不同覆盖处理日均土壤温度对气温的响应/℃

Table 3 Response of daily average soil temperature to air temperature under different mulching treatments

月份 Month	气温 Air temperature	0~20 cm 土层土壤温度 0~20 cm depth soil temperature				土壤温度与气温差值 Difference between soil and air temperature			
		CM	DM	SM	CK	CM	DM	SM	CK
5	16.89	20.08	20.07	16.29	18.01	3.19	3.18	-0.60	1.12
6	21.88	24.27	24.08	21.56	22.55	2.39	2.20	-0.32	0.67
7	25.46	24.95	24.41	24.11	24.48	-0.52	-1.05	-1.36	-0.98
8	21.60	21.62	21.36	20.74	21.12	0.02	-0.24	-0.86	-0.48
9	16.93	17.50	17.06	16.18	16.39	0.57	0.13	-0.75	-0.54

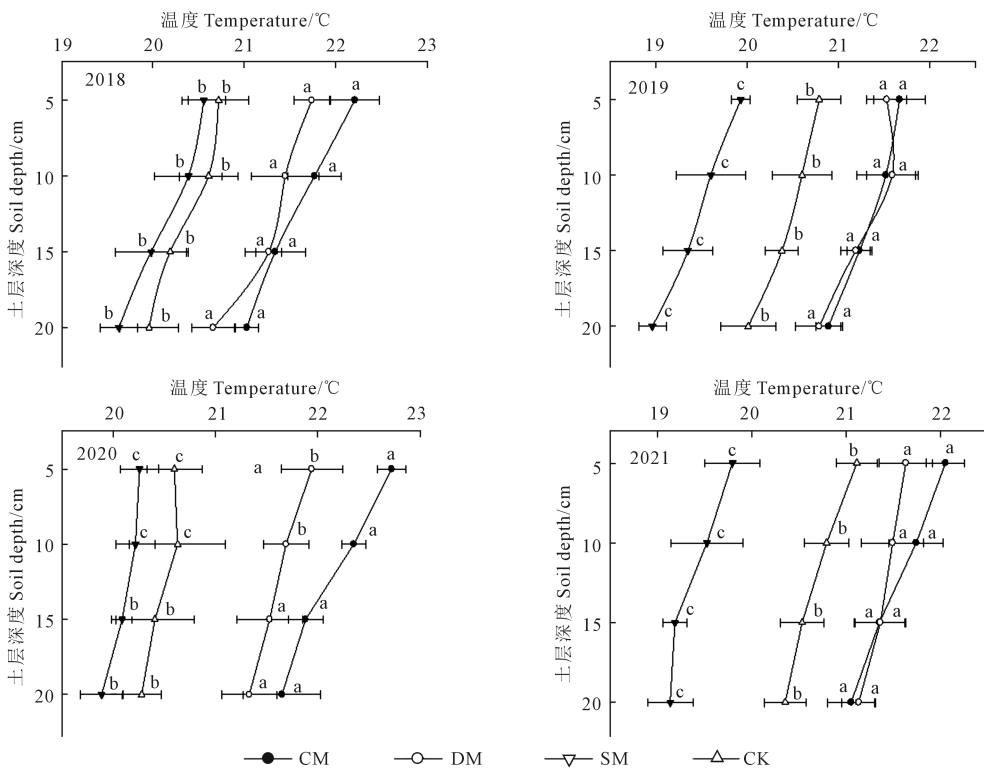


图 7 不同覆盖处理对耕层土壤温度的影响

Fig.7 Effect of different mulching treatments on soil temperature of topsoil

表 4 不同覆盖处理下玉米株高、叶面积指数变化
Table 4 Changes of plant height and leaf area index of maize under different mulching treatments

生育阶段 Growth stage	处理 Treatment	株高 Plant height/m			叶面积指数 Leaf area index (LAI)		
		2019	2020	2021	2019	2020	2021
V3	CM	0.19±0.01abA	0.22±0.003aA	0.31±0.003aA	0.03±0.008aA	0.07±0.004aA	0.09±0.004aA
	DM	0.20±0.003aA	0.22±0.01aA	0.31±0.008aA	0.03±0.002aA	0.07±0.003aA	0.09±0.003aA
	SM	0.18±0.003bAB	0.12±0.005cC	0.18±0.008cC	0.02±0.007aA	0.02±0.003cC	0.02±0.001cC
	CK	0.17±0.004cB	0.17±0.004bB	0.26±0.011bB	0.02±0.006aA	0.04±0.002bB	0.04±0.001bB
V6	CM	0.64±0.02aA	0.94±0.01aA	0.72±0.02abA	0.63±0.01aA	1.10±0.05aA	0.77±0.03aA
	DM	0.60±0.01bA	0.86±0.01bA	0.72±0.02aA	0.61±0.01bA	1.06±0.03aA	0.62±0.02bB
	SM	0.59±0.02bA	0.59±0.02dC	0.43±0.01cB	0.46±0.01dC	0.36±0.01cC	0.14±0.002dD
	CK	0.62±0.003abA	0.76±0.02cB	0.68±0.02bA	0.49±0.02cB	0.65±0.02bB	0.41±0.01cC
R1	CM	3.09±0.03aA	3.17±0.06bA	2.93±0.04aA	4.04±0.13aA	4.91±0.17aA	4.24±0.07aA
	DM	2.94±0.05bAB	3.38±0.03aA	2.92±0.07aA	3.91±0.15abA	5.06±0.15aA	4.30±0.14aA
	SM	2.89±0.09bB	2.69±0.05dC	2.88±0.03aA	3.73±0.13bA	4.43±0.18bB	3.82±0.05bB
	CK	2.91±0.05bB	2.80±0.06cB	2.90±0.04aA	3.86±0.14abA	4.90±0.13aA	3.94±0.06bB

注:同列数据后不同大、小写字母分别表示在 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 水平上同生育阶段处理间差异显著,下同。
Note: The datas with different capital and lowercase letters in the same column show significant differences among treatments at the same growth stage at the level of $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively. The same below.

表 5 不同覆盖处理对玉米干物质积累的影响/g
Table 5 Effects of different mulching treatments on dry matter accumulation of maize

生育阶段 Growth stage	处理 Treatment	2019	2020	2021
V3	CM	0.8±0.03aA	0.4±0.01aA	0.2±0.00aA
	DM	0.8±0.03aA	0.4±0.01aA	0.2±0.01aA
	SM	0.6±0.01cC	0.1±0.00cC	0.1±0.00cC
	CK	0.7±0.02bB	0.3±0.01bB	0.1±0.00bB
V6	CM	61.0±1.8bB	49.8±1.42aA	27.5±0.8aA
	DM	67.5±2.0aA	48.5±2.00aA	28.0±0.6aA
	SM	38.7±1.5cC	13.4±0.20cC	8.0±0.3cC
	CK	40.1±0.8cC	27.0±0.61bB	17.1±0.7bB
R1	CM	154.2±5.6aA	207.4±2.53aA	173.6±2.7aA
	DM	156.4±6.3aA	203.6±7.15aA	174.2±5.0aA
	SM	132.1±3.6bB	132.0±3.96cC	125.4±5.1bB
	CK	149.6±5.5aA	181.1±5.48bB	129.9±4.8bB
R6	CM	416.5±1.7aA	495.6±13.20aA	318.6±6.0bAB
	DM	401.2±3.2bAB	509.7±3.94aA	342.1±3.5aA
	SM	377.5±6.8cC	370.8±8.88cC	285.0±7.7cC
	CK	385.0±9.1cBC	407.5±9.44bB	311.0±10.3bB

2.4 地表覆盖对玉米产量及其构成因素的影响

如表 6 所示,与 CK 相比,地膜覆盖处理可显著提高玉米产量,且降解地膜增产幅度大于普通地膜,而秸秆覆盖产量降低。2018—2021 年,与对照相比,CM 和 DM 处理玉米增产幅度分别为 5.3%~11.9%和 5.0%~21.8%;SM 处理减产 3.9%~13.5%。4 a 平均产量,CM 和 DM 分别较 CK 增产 8.59%和 14.13%,SM 减产 8.96%。地膜覆盖处理分别通过穗粒数和百粒重双增(2018 和 2020 年)及增加百粒重(2019 和 2021 年)实现增产。SM 处理由于生育期土壤湿度大,土壤温度偏低,导致玉米出苗晚,生育期延迟,生育期内有效积温减少,严重影响玉米生长发育及籽粒灌浆速率,从而导致百粒重的降低而

表 6 不同覆盖处理对玉米产量及其构成因素的影响
Table 6 Effects of different mulching treatments on maize yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	百粒重 100-grain weight/g	增产率 Yield increase rate/%
2018	CM	12363.7±356.3bB	561±20.0abA	33.8±1.3bAB	11.88
	DM	13455.4±30.3aA	570±14.1aA	36.4±1.4aA	21.75
	SM	9939.3±447.3dD	488±18.6cB	31.3±0.7cB	-10.07
	CK	11052.0±286.2cC	537±11.5bA	31.7±0.2cB	
2019	CM	13564.7±429.7aA	581±18.3aA	35.9±1.1aA	8.07
	DM	13184.5±135.9aAB	567±8.3aA	35.8±1.2aA	5.04
	SM	12062.2±312.3bBC	559±11.3aA	33.1±1.2bB	-3.92
	CK	12553.2±189.2bC	570±11.0aA	33.9±0.5bAB	
2020	CM	12746.9±343.7bB	597±19.3bAB	33.4±0.6abAB	8.68
	DM	14139.2±391.4aA	626±7.7aA	34.7±0.5aA	20.55
	SM	10596.0±499.2dC	591±6.7bB	27.6±0.6cC	-9.66
	CK	11728.7±391.1cB	559±6.3cC	32.3±1.1bB	
2021	CM	9991.3±75.3aAB	430±13.5bB	35.8±1.4aA	5.34
	DM	10373.8±271.1aA	444±3.8bB	36.0±0.8aA	9.38
	SM	8207.4±109.7cC	494±11.6aA	25.6±0.9cB	-13.48
	CK	9484.7±349.9bB	435±5.1bB	33.6±0.4bA	
均值 Mean value	CM	12166.6±218.5bB	542±8.3abAB	34.7±0.6bA	8.59
	DM	12788.2±75.5aA	552±3.3aA	35.7±0.7aA	14.13
	SM	10201.2±85.1dD	533±10.7bcAB	29.4±0.2dC	-8.96
	CK	11204.7±54.4cC	525±6.3cB	32.9±0.1cB	
方差分析 Variance analysis	年份 Year (Y)	**	**	**	
	处理 Treatment	**	**	**	
	(T)				
	Y×T	**	**	**	

注:表中百粒重和产量均为籽粒含水率 14%时的测定值。同一列数据后不同大、小写字母分别表示在 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 水平上同年份处理间差异显著,下同。* * 表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。
Note: 100-grain weight and yield are the measured values of 14% moisture content.The data with different capital and lowercase letters in the same column show significant difference among treatments in the same year at the level of $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively. The same below. * * means significant difference at the level of $P<0.01$.

造成减产。而地膜覆盖不仅保持了土壤水分,还提高了玉米营养生长期土壤温度,促进了玉米生育时期提前及其生长发育,加速了玉米籽粒的形成与灌浆进程。

方差分析结果表明,不同年份和不同覆盖处理均对玉米产量、穗粒数和百粒重产生极显著影响,年份与处理互作对玉米产量、穗粒数和百粒重的影响也达到极显著水平。

2.5 地表覆盖对水分利用效率的影响

由表 7 可知,与 CK 处理相比,地膜覆盖显著提高了玉米生育期水分利用效率,2018—2021 年,CM 处理水分利用效率提高了 5.8%~11.9%,DM 提高了 6.7%~22.7%,且 DM 处理 WUE 显著高于 CM 处理;而 SM 处理水分利用效率较 CK 降低 3.8%~12.6%。降雨量较少的 2018 年和 2019 年 WUE 显著高于降雨量较多的 2020 年和 2021 年。

2.6 土壤贮水量、土壤温度、玉米产量和水分利用效率之间的相关性分析

将各处理的土壤贮水量、土壤温度、玉米产量和水分利用效率 4 a 平均值进行相关性分析得出(表 8),土壤贮水量表现为 20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层显著正相关($P<0.01$),且 20~60 cm 土层土壤贮水量与玉米 V6 期土壤贮水量相关性达到显著水平($P<0.05$);0~20 cm、R1 期土壤贮水量均与 5—9 月(7 月除外)土壤温度显著负相关($P<0.05$);除 7 月土壤温度与耕层 20 cm、5 月、9 月土壤温度显著正相关($P<0.05$)外,其余月份间、耕层间、月份

与耕层间土壤温度正相关差异性达到 $P<0.01$ 水平;玉米产量、水分利用效率与 0~20 cm 土层、R1 期土壤贮水量显著负相关($P<0.01$),与各层土壤温度和 5、6、8、9 月土壤温度显著正相关($P<0.01$)。说明土壤温度是玉米产量形成的主要影响因子,由于地表覆盖减少了水分蒸发,提高了土壤贮水量,保障了玉米对水分的需求,尤其是秸秆覆盖保水效果更佳,R1 期秸秆覆盖土壤贮水量显著高于其他处理,但该处理保水的同时也降低了土壤温度,延迟了玉米生育进程,最终导致减产;而地膜覆盖保水升温,促进了玉米生长发育,提早灌浆成熟,产量增加;玉米产量与水分利用效率之间呈极显著正相关($P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 地表覆盖对土壤贮水量时空动态变化的影响
吉林省半干旱区降雨量少、蒸发量大,水分环境严重影响着粮食生产和农业的可持续发展,提高玉米根际土壤含水量是解决作物缺水的重要技术措施。玉米根系主要分布在 0~60 cm 土层范围内^[17-18],该层次根系对土壤水分吸收能力最强。玉米生育期内土壤贮水量的变化主要受外界降水、作物自身耗水、农田大气温度以及田间覆盖耕作管理方式等因素的影响^[19]。本研究采用 3 种不同材料的覆盖试验表明,2018—2021 年各生育阶段的土壤贮水量,在玉米播种至拔节期逐渐增加,拔节后迅速减少,开花或灌浆期达到最小值。说明拔节前植

表 7 不同覆盖处理对玉米水分利用效率的影响

Table 7 Effects of different mulching treatments on water use efficiency of maize

年份 Year	处理 Treatment	土壤贮水量差 Soil water storage difference/mm	降雨量 Precipitation /mm	灌水量 Irrigation quantity/mm	耗水量 ET/mm	水分利用效率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2018	CM	2	350.1	70	422	29.4±1.7bB
	DM	-2	350.1	70	418	32.2±0.3aA
	SM	-1	350.1	70	419	23.7±0.4dC
	CK	1	350.1	70	421	26.2±0.6cC
2019	CM	52	384.8	50	486	27.9±1.0aA
	DM	60	384.8	50	495	26.6±0.1aAB
	SM	67	384.8	50	502	24.0±0.9bC
	CK	68	384.8	50	503	25.0±0.5bBC
2020	CM	-14	613.9	50	650	19.6±0.5bB
	DM	-17	613.9	50	647	21.9±0.6aA
	SM	-11	613.9	50	653	16.2±0.6dD
	CK	-6	613.9	50	657	17.8±0.5cC
2021	CM	-8	521.5	50	563	17.7±0.3abAB
	DM	-11	521.5	50	561	18.5±0.8aA
	SM	-12	521.5	50	559	14.7±0.1cC
	CK	-5	521.5	50	566	16.8±0.7bB

注:土壤贮水量差=播前土壤贮水量-收获后土壤贮水量。

Note: Soil water storage difference = soil water storage before sowing - soil water storage after harvest.

表 8 土壤水分、温度、玉米产量和水分利用效率的相关性分析
Table 8 Correlation of soil moisture, temperature, maize yield and water use efficiency

指标 Index	土壤贮水量 Soil water storage/mm					土壤温度 Soil temperature/℃								产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
	土层 Soil depth/cm			播种 Sowing		土层 Soil depth/cm		5月 May 6月 June 7月 July 8月 Aug. 9月 Sept.								
	0~20	20~40	40~60	V3	V6	R1	R2	5	10	15	20	5月 May	6月 June	7月 July	8月 Aug.	9月 Sept.
0~20 cm 土壤贮水量	1.00															
0~20 cm soil water storage																
20~40 cm 土壤贮水量	-0.33	1.00														
20~40 cm soil water storage																
40~60 cm 土壤贮水量	-0.49	0.80**	1.00													
40~60 cm soil water storage																
播种时土壤贮水量	0.17	-0.09	-0.40	1.00												
Soil water storage during sowing																
V3 期土壤贮水量	0.30	0.33	0.13	-0.29	1.00											
Soil water storage in V3																
V6 期土壤贮水量	-0.24	0.56*	0.75**	-0.38	0.40	1.00										
Soil water storage in V6																
R1 期土壤贮水量	0.43	0.48	0.25	0.23	0.27	0.10	1.00									
Soil water storage in R1.00																
R2 期土壤贮水量	-0.40	0.53	0.51.00	0.09	0.31.00	0.37	0.24	1.00								
Soil water storage in R2																
5 cm 土壤温度	-0.70**	-0.13	0.23	-0.27	-0.30	0.23	-0.73**	0.12	1.00							
5 cm soil temperature																
10 cm 土壤温度	-0.73**	-0.13	0.22	-0.31.00	-0.28	0.27	-0.80**	0.08	0.99**	1.00						
10 cm soil temperature																
15 cm 土壤温度	-0.71**	-0.16	0.18	-0.35	-0.25	0.21.00	-0.82**	0.09	0.98**	0.99**	1.00					
15 cm soil temperature																
20 cm 土壤温度	-0.68*	-0.19	0.14	-0.32	-0.19	0.25	-0.76**	0.11.00	0.97**	0.97**	0.98**	1.00				
20 cm soil temperature																
5月土壤温度	-0.67*	-0.21.00	0.10	-0.35	-0.25	0.20	-0.80**	0.04	0.96**	0.97**	0.99**	0.99**	1.00			
Soil temperature in May																
6月土壤温度	-0.70**	-0.16	0.19	-0.32	-0.32	0.22	-0.77**	0.07	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.99**	1.00		
Soil temperature in June																
7月土壤温度	-0.38	-0.27	0.18	-0.06	-0.5	0.03	-0.5	-0.06	0.80**	0.74**	0.70**	0.66*	0.64*	0.73**	1.00	
Soil temperature in July																
8月土壤温度	-0.56*	-0.26	0.17	-0.2	-0.48	0.19	-0.64*	-0.04	0.94**	0.91**	0.89**	0.89**	0.90**	0.94**	0.86**	1.00
Soil temperature in August																
9月土壤温度	-0.73**	0.11.00	0.43	-0.35	-0.09	0.52	-0.57*	0.22	0.91**	0.92**	0.91**	0.93**	0.90**	0.91**	0.61*	0.85**
Soil temperature in september																
产量 Yield	-0.68**	-0.16	0.06	-0.31.00	-0.26	0.19	-0.80**	-0.02	0.90**	0.93**	0.94**	0.95**	0.97**	0.95**	0.52	0.83**
水分利用效率 WUE	-0.70**	-0.07	0.15	-0.35	-0.25	0.26	-0.78**	-0.04	0.90**	0.93**	0.94**	0.93**	0.96**	0.94**	0.53	0.83**
																0.99**

注:表中的数值为相关系数,*代表在 P<0.05 水平下显著相关,**代表在 P<0.01 水平下显著相关。
Note: The values in the table are correlation coefficients,* represents significant correlation at the level of P<0.05, and ** represents significant correlation at the level of P<0.01.

株蒸腾量少,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,阶段降雨和补充灌溉量不能满足植株所需时就会消耗土壤中水分。王敏等^[14]研究表明,全生育期内,秸秆覆盖处理 0~200 cm 土层土壤平均含水量高于覆膜处理和对照;本研究中各时期的土壤贮水量,地表覆盖处理均显著高于无覆盖对照,且呈 SM>CM>DM>CK 的变化趋势与该研究结果一致。秸秆覆盖不但减少了地表水分蒸发,还有利于充分利用自然降雨并增加水分下渗;而普通地膜覆盖虽然有效阻止了地表水分蒸发,也阻碍了部分雨水的渗入,影响了玉米根际土壤水分的分配;降解地膜由于自身的部分降解,减少了覆盖面积,导致部分地表蒸发量加大,土壤贮水量随之有所降低。土壤水分的空间变异和年际间变化、表层土壤水分含量均与降雨关系密切^[20-21]。王娟等^[19]研究认为,玉米生育期内各处理土壤含水率总体表现为随土层深度的增加而升高,且 0~40 cm 土层土壤含水率变化幅度较大,60~100 cm 土层土壤含水率较稳定。本研究结果表明,与 0~20 cm 土层土壤贮水量相比,所有覆盖处理 20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层土壤贮水量均显著增加,可见,20 cm 土层以下土壤贮水量加大。相同层次不同处理之间,地表覆盖较不覆盖土壤贮水量显著提高,且粉碎秸秆覆盖>普通地膜覆盖>降解地膜覆盖。

3.2 地表覆盖对土壤温度时空变化的影响

地表覆盖不仅提高了土壤贮水量,同时也调节了耕层土壤温度。王敏等^[14]研究认为,播种期、出苗和拔节期全天 5~25 cm 土层的平均地温,生物降解地膜和塑料地膜覆盖分别比不覆盖处理(CK)高 1.4℃和 2.6℃,秸秆覆盖比 CK 低 3.0℃。曹玉军等^[22]研究表明,地膜覆盖明显提高苗期至拔节期 5~25 cm 土层土壤平均温度,降解地膜与普通地膜分别比对照提高 1.81℃和 2.80℃。张敬涛等^[23]认为,与常规垄作处理相比,秸秆覆盖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,覆盖处理对土壤温度的降低作用逐渐减弱。本研究中由 4 a 土壤温度均值分析得出,与对照相比,5 月(播种期)5~20 cm 土层日均土壤温度,CM 和 DM 分别增加了 2.12℃和 2.07℃,SM 降低了 1.72℃;6 月(苗期-拔节期)CM 和 DM 分别增加了 1.71℃和 1.52℃,SM 降低了 1.01℃。土层 5、10、15、20 cm 土壤温度,5 月份 CM 比 CK 各层分别升高了 2.4、2.2、2.1、1.8℃,DM 分别升高了 2.2、2.2、2.1、1.8℃,SM

分别降低了 1.6、1.7、1.7、1.9℃;全生育期日均土壤温度,CM 分别增加了 1.4、1.2、1.1、1.0℃;DM 分别增加了 0.9、0.9、0.9、0.8℃;SM 减少了 0.6、0.8、0.7、0.9℃,与上述研究结果一致。乐章燕等^[24]研究表明,玉米根系生长最适宜的土壤温度为 20~24℃;秸秆覆盖会产生不同程度的低温效应^[25]。本研究中不同覆盖处理对土壤温度影响最大的时期是播种到拔节期(5、6 月),5—6 月 5~20 cm 土层平均土壤温度,CM (22.2℃)、DM (22.08℃) 分别比 CK (20.28℃) 提高了 9.47%和 8.88%,SM (18.92℃) 较对照降低 6.71%,地膜覆盖促进了玉米出苗和根系发育,而秸秆覆盖严重影响了玉米出苗和根系发育。

3.3 地表覆盖对玉米生长发育及干物质积累的影响

有研究表明,普通地膜和可降解膜均可提高土壤水分和温度,显著提高玉米各时期株高、叶面积和地上部干质量^[26],生物降解膜和塑料地膜覆盖种植显著($P<0.05$) 提高玉米出苗期至成熟期的地上部干质量,受土壤温度和物理阻碍等因素影响,秸秆覆盖处理玉米营养生长不充分,进而影响生殖生长,造成减产^[14]。本研究中地表覆盖对玉米营养生长阶段株形影响显著,地膜覆盖因水温协调,促进了玉米株高和叶面积指数的快速增加,与不覆盖处理相比,2019—2021 年株高平均值、叶面积指数平均值,V3 期 2 种地膜覆盖均提高了 20.0%、100.0%,V6 期普通地膜和降解地膜分别增加了 11.6%、59.6%和 5.8%、46.2%。而秸秆覆盖因受前期低温影响,出苗晚,生长发育迟缓,V3、V6 期株高和叶面积指数分别降低了 20.0%和 33.0%、21.7%和 35.8%。与不覆盖处理相比,V3、V6、R1、R6 期干物质积累量,普通地膜和降解地膜依次增加了 27.8%、64.1%、16.2%、11.5%和 27.8%、70.8%、16.0%、13.6%;秸秆覆盖分别降低了 27.8%、28.8%、15.4%、6.4%。从作物生长的角度,进一步证明了“旱地农田秸秆覆盖具有改善土壤水分条件、调节土壤温度的作用,但可能会出现作物减产”的结论^[27]。

3.4 地表覆盖对玉米产量和水分利用效率的影响

有研究表明,不同覆盖栽培模式均较不覆盖模式显著增加了玉米产量,普通地膜和秸秆覆盖分别增产 17.0%和 6.9%,水分利用效率提高 15.87%和 5.29%^[28];秸秆覆盖处理 2018 年和 2019 年玉米产量比对照分别增加 7.42%和 8.50%,水分利用效率分别提高 5.77%和 3.92%^[29]。也有研究认为,与不覆盖对照相比,地膜覆盖玉米增产 58.17%,降解地膜覆盖增产 27.05%,秸秆覆盖处理减产,普通地膜

和降解地膜覆盖水分利用效率分别提高 36.89% 和 14.34%^[12];生物降解膜和塑料地膜玉米分别增产 26.9% 和 34.7%, 秸秆覆盖玉米减产 10.5%^[14]。秸秆覆盖玉米产量增减不一,主要是其覆盖方式不同引起土壤温度差异导致的,秸秆条带覆盖既保持了土壤水分,又对苗带土壤温度影响较小,玉米增产,而秸秆全覆盖虽然提高了土壤水分,但土壤温度回升慢,严重影响玉米出苗和前期生长发育,最终导致玉米减产。本研究中,4 a 平均玉米产量和水分利用效率,普通地膜、降解地膜分别比对照增加 8.59%、14.10% 和 10.3%、15.6%,降解地膜比普通地膜增产 5.11%,与孙云云等^[9]降解地膜比普通地膜增产 2.91% 的研究结果基本一致。秸秆覆盖减产 8.96%,水分利用效率降低 8.40%,与上述秸秆覆盖减产结论一致。本研究表明,玉米产量与不同时期、各层次土壤温度均显著正相关,与 R1 期土壤贮水量显著负相关,进一步说明了此研究中土壤温度为玉米产量形成的限制因子。

4 结 论

1) 玉米生育期内土壤贮水量时空动态变化与当年的降雨时空分配有关,地表覆盖减少了土壤水分蒸发,提高了玉米各生育时期土壤贮水量,缓解了因阶段降雨不足、土壤供水能力降低引发的旱情,处理间土壤保墒效果表现为 SM>CM>DM>CK; 20~60 cm 土层土壤贮水量显著高于 0~20 cm 土层。

2) 地表覆盖保墒同时调节了各时期耕层土壤温度,尤其对出苗和营养生长阶段(5、6 月)调节效果更为显著,5~20 cm 耕层 4 a 日均土壤温度,CM 和 DM 分别比 CK 提高了 9.47% 和 8.88%,SM 降低了 6.71%;随着土层深度的增加,土壤温度逐渐降低,与对照相比,5、10、15、20 cm 土层土壤温度,CM 分别增加了 1.4、1.2、1.1、1.0℃;DM 分别增加了 0.9、0.9、0.9、0.8℃;SM 分别降低了 0.6、0.8、0.7、0.9℃,说明地膜覆盖对上层土壤增温显著,且普通地膜增温效果优于降解地膜。相对于 5、6 月份气温,两种地膜覆盖土壤温度每日可提升 2.2~3.2℃,秸秆覆盖降低 0.3~0.6℃,地膜覆盖促进了玉米的出苗和根系发育,而秸秆覆盖作用相反。

3) 地膜覆盖土壤水温协调促进了玉米生长发育,增加了玉米株高、叶面积指数,促进了各时期干物质积累;而秸秆全覆盖由于前期低温效应,阻碍了玉米出苗及生长发育,生育时期相对延迟,致使玉米株高、叶面积指数低于同期对照处理,干物质积累速度缓慢。

4) 因地表覆盖方式不同引起的土壤水温效应不同,促进或阻碍了玉米生长发育,并最终影响了玉米产量和水分利用效率。与不覆盖相比,2018—2021 年平均玉米产量,普通地膜和降解地膜覆盖分别增加 8.59% 和 14.13%,水分利用效率提高 10.26% 和 15.62%;秸秆覆盖减产 8.96%,水分利用效率降低 8.40%。从增产幅度和环保角度考虑,相对于露地种植,降解地膜覆盖能更好起到保墒、升温、增产和高效用水的作用,而且能减少农田土壤的“白色污染”,是提高玉米产量和水分利用效率的重要技术措施,本研究可为半干旱区玉米增产和水分高效利用栽培技术模式提供理论和技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] 王丽丽,余海龙,马凯博,等. 不同地表覆盖措施对土壤水热特性及玉米生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 12-18.
WANG L L, YU H L, MA K B, et al. Effect of different soil surface mulching measures on characteristics of soil hydro-thermal property and growth of maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 12-18.
- [2] 郭大辛,郭平毅,原向阳,等. 不同地膜覆盖对土壤水温及谷子水分利用和产量构成的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(10): 56-64.
GUO D X, GUO P Y, YUAN X Y, et al. Effects of different film mulching on soil moisture, temperature and water use efficiency, yield components of millet[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(10): 56-64.
- [3] 蔡太义,陈志超,黄会娟,等. 不同秸秆覆盖模式下农田土壤水温效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1396-1404.
CAI T Y, CHEN Z C, HUANG H J, et al. Effects of different modes of cropping systems using straw mulch on the soil temperature and soil water on the Weibei Highland Region of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(7): 1396-1404.
- [4] 丁柳屹,王森,付鑫. 覆盖条件下旱作春玉米农田土壤细菌群落结构分析[J]. 地球环境学报, 2019, 10(6): 590-600.
DING L Y, WANG S, FU X. Soil bacterial community structure in a dryland spring maize field with mulching[J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(6): 590-600.
- [5] 刘小娥,苏世平,吴玉山,等. 地膜覆盖和秸秆还田对半干旱区玉米地土壤氮素矿化的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(4): 30-36.
LIU X E, SU S P, WU Y S, et al. Effect of plastic film mulching and straw returning on soil nitrogen mineralization in field-grown maize at a semiarid site[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 30-36.
- [6] 李利利,王朝辉,王西娜,等. 不同地表覆盖栽培对旱地土壤有机碳、无机碳和轻质有机碳的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 478-483.
LI L L, WANG Z H, WANG X N, et al. Effects of soil-surface mulching on organic carbon, inorganic carbon and light fraction organic carbon in dryland soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 478-483.
- [7] 毛海兰,王俊,付鑫,等. 秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 347-356.
MAO H L, WANG J, FU X, et al. Seasonal dynamics of soil organic car-

- bon fractions under straw and plastic film mulching of spring maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 347-356.
- [8] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 等. 不同覆盖方式下旱作玉米田土壤呼吸对温度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 467-473.
- XIE M Y, SHANG Y Q, ZHAO F Z, et al. Responses of soil respiration to temperature under different mulching modes in a dryland corn field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 467-473.
- [9] 孙云云, 高玉山, 窦金刚, 等. 半干旱区玉米降解地膜覆盖栽培综合效应研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(30): 27-31.
- SUN Y Y, GAO Y S, DOU J G, et al. Comprehensive effects of degradable plastic film mulching cultivation for maize insemi-arid region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(30): 27-31.
- [10] 戚颖, 李铁男, 白雪峰, 等. 秸秆覆盖对寒旱区农田土壤理化性状的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(7): 56-63.
- QI Y, LI T N, BAI X F, et al. Effects of straw mulching soil physico-chemical properties in cold and arid regions[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(7): 56-63.
- [11] 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(7): 1090-1093.
- BU Y S, MIAO G Y, SHAO H L, et al. Analysis of growth and development and yield of corn mulched with plastic film and straw[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(7): 1090-1093.
- [12] 牟鸿燕, 黄方圆, 张超, 等. 半干旱区不同秋覆盖方式对农田土壤水温效应及玉米水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 86-93.
- MU H Y, HUANG F Y, ZHANG C, et al. Effects of different mulching patterns in autumn on soil water, soil temperature and water use efficiency in the semi-arid areas of Northwest China[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(6): 86-93.
- [13] 李尚中, 樊廷录, 赵晖, 等. 不同地膜覆盖栽培模式对玉米产量、水分利用效率和品质的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 182-191.
- LI S Z, FAN T L, ZHAO H, et al. Effects of different plastic film mulching cultivation models on yield, water use efficiency and quality of maize[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(10): 182-191.
- [14] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1249-1258.
- WANG M, WANG H X, HAN Q F, et al. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1249-1258.
- [15] 梅四卫, 朱涵珍, 王术, 等. 不同覆盖方式对土壤水肥热状况以及玉米产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 68-73.
- MEI S W, ZHU H Z, WANG S, et al. Effects of different mulching methods on soil moisture, nutrient, temperature status and corn yield [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 68-73.
- [16] 王文达, 霍铁珍, 韩翠莲. 不同覆盖方式对土壤水肥热状况及玉米产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017, (7): 38-41.
- WANG W D, HUO Y Z, HAN C L. Effects of different mulching methods on soil water-fertilizer-heat condition and yield of maize[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (7): 38-41.
- [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): 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.
- SUI P X, ZHANG W K, MEI N, et al. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 255-261.
- [19] 王娟, 张瑜, 黄成真, 等. 不同覆盖方式对新复垦区土壤水热及春玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 844-854.
- WANG J, ZHANG Y, HUANG C Z, et al. Effects of different mulching on soil water-heat and spring maize yield in newly reclaimed land[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 844-854.
- [20] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatiotemporal prediction of soil moisture content using multiple-linear regression in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2003, 54(1/2): 173-195.
- [21] HENNINGER D L, PETERSEN G W, ENGMAN E T. Surface soil moisture within a watershed—variations, factors influencing, and relationship to surface runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 773-776.
- [22] 曹玉军, 魏雯雯, 徐国安, 等. 半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 107-113.
- CAO Y J, WEI W W, XU G A, et al. Effects of different films on soil water, temperature and corn growth characteristics under drip-irrigation conditions in semi-arid region[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(1): 107-113.
- [23] 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.
- ZHANG J T, LIU J Q, ZHAO G F, et al. Study on soil temperature variation of no-till cultivation with different amounts of stalk mulch[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(27): 224-228.
- [24] 乐章燕, 刘晶淼, 廖荣伟, 等. 土壤温湿度对玉米根系的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 68-72.
- LE Z Y, LIU J M, LIAO R W, et al. Effect of soil temperature and humidity on different developmental periods of corn root [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(6): 68-72.
- [25] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171-173.
- CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 171-173.
- [26] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 25-30.
- SHEN L X, WANG P, ZHANG L L. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 25-30.
- [27] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
- GAO Y J, LI S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 15-19.
- [28] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 128-133.
- XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, et al. Effect of different mulching patterns on soil moisture and crop productivity of spring maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 128-133.
- [29] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 299-306.
- ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 299-306.