

秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响

马永财 滕 达 衣淑娟 刘少东 王汉羊

(黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 为探究东北黑土区秸秆覆盖还田及其腐解率对土壤温湿度和玉米产量的影响,2019 年和 2020 年在大庆市肇州县进行了秸秆覆盖全量还田(试验组)和留茬 10 cm 左右还田处理(对照组)对比试验。结果表明:试验组秸秆腐解率 4 月仅为 4.3% 和 4.5%,5 月为 17.8% 和 16.8%,6 月为 22.3% 和 27.8%,秸秆腐解主要集中在 7、8 月。土壤温湿度受地表残余秸秆影响较为明显,5 月试验组土壤含水率比对照组分别低 1.2、1.1 个百分点,但随着秸秆腐解率增大,试验组土壤含水率在 6—9 月平均高出对照组约 3 个百分点。试验组 0 cm 处土壤温度在 5—8 月日间大气升温阶段受到抑制,相同时段温度与对照组最大差值为 4.8、3.8℃,10、20 cm 处土壤温度在 5、6 月受地表秸秆覆盖影响较为明显,7—9 月影响不显著,30 cm 处土壤温度除 6 月影响明显外,其他月份相比对照组变化较小。在每天大气降温时段,试验组不同深度处的土壤温度降温较对照组平缓,保温保墒作用较明显。地表秸秆覆盖影响作物出苗,试验组比对照组出苗分别晚 4、3 d,在拔节期对照组比试验组的作物株高分别高 7.3、7.4 cm,茎粗大 0.2、0.1 cm,但在抽穗期和灌浆期试验组的株高和茎粗均大于对照组;2019 年试验组的玉米产量为 10 716.0 kg/hm²,比对照组增产 193.5 kg/hm²。综合分析,秸秆覆盖还田对土壤温湿度具有双向阻碍作用,秸秆腐解程度对双向阻碍作用有一定影响,秸秆覆盖全量还田的保温保墒作用促进了玉米的生长和产量提升。

关键词: 秸秆覆盖还田; 秸秆腐解率; 土壤温度; 土壤含水率; 玉米产量

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)10-0090-10

OSID:



Effects of Straw Mulching and Decomposition Rate on Soil Temperature and Humidity and Maize Yield

MA Yongcai TENG Da YI Shujuan LIU Shaodong WANG Hanyang
(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to explore the effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature, humidity, and maize yield in northeast black soil region, comparative experiments were conducted between total straw mulching (experimental group) and leave stubble treatment of about 10 cm straw mulching (compared group) in Zhaozhou County of Daqing City in 2019 and 2020. The results showed that the decomposition rate of straw of the experimental group was only 4.3% and 4.5% in April, 17.8% and 16.8% in May, 22.3% and 27.8% in June, and the decomposition of straw was mainly concentrated in July to August. The soil temperature and humidity were significantly affected by residual straw on the ground, and the soil moisture content of the experimental group was 1.2 percentage points and 1.1 percentage points lower than that of the compared group in May. However, with the increase of straw decomposition rate, the average soil moisture content of the experimental group was about 3 percentage points higher than that in the compared group from June to September. From May to August, the soil temperature at 0 cm was restrained during diurnal warming phase, and the maximum difference between experimental group and compared group respectively was 4.8℃ and 3.8℃ in the same period. The soil temperature at 10 cm and 20 cm was evidently affected by the straw mulching in May and June, and was not significant from July to September. Compared with the compared group, the effect of soil temperature at 30 cm was significantly affected in June, but it was changed little in other

收稿日期: 2021-08-01 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E073)和黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划项目(TDJH201808)

作者简介: 马永财(1976—),男,副教授,博士,主要从事旱作农业生产机械化关键技术与装备研究,E-mail: myc1631@163.com

通信作者: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事寒区大规模作物全程机械化研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

months. During the daily cooling period, the soil temperature at different depths in the experimental group was decreased more gently than that in the compared group, and the effect of soil temperature preservation and soil moisture preservation was obvious. The straw mulching affected the crop emergence, the crop emergence of the experimental group affected by straw mulching was 4 d and 3 d later than that of the experimental group. At jointing stage, the plant height of the compared group was 7.3 cm and 7.4 cm higher than that of the experimental group, and the stem diameter was 0.2 cm and 0.1 cm thicker than that of the experimental group, respectively. However, the plant height and stem diameter of the experimental group were higher than those of the compared group at other stage. The maize yield of the experimental group was 10 716.0 kg/hm² in 2019, which was 193.5 kg/hm² higher than that of the compared group. In conclusion, the straw returned by crushing and mulching had a two-way hindrance effect on soil temperature and humidity, and the degree of straw decomposition had a certain impact on the two-way hindrance effect. The effect of straw mulching on heat preservation and soil moisture preservation promoted the growth and yield of corn.

Key words: straw mulching; straw decomposition rate; soil temperature; soil moisture content; maize yield

0 引言

目前传统耕法已经不能适应我国东北黑土区保护黑土地、保护生态环境和提高产量的需求^[1],致使土壤有机质含量下降了 46%^[2],严重影响了黑土地的耕地质量,保护黑土地刻不容缓^[3]。同时,我国农作物秸秆种类多、总量大^[4],但由于受相关条件和因素的制约,秸秆供给显现出阶段性、结构性和区域性过剩现象^[5-6]。如何更好实现秸秆资源化和综合化利用,引起国内相关学者的高度关注^[7-11]。研究表明,秸秆还田是当今秸秆资源利用的主要方式^[12-13],对探索黑土资源保护具有重要意义^[14],免耕+全量秸秆还田是提升东北地区黑土有机质含量的一种有效农田管理模式^[15],秸秆覆盖耕作措施已成为构建和谐生态环境的有效耕作模式^[16]。因此,结合秸秆还田和东北黑土地保护的问题,2017 年农业农村部启动了“东北地区秸秆处理行动”,2018 年农业农村部、财政部明确以东北四省区为试点,促进秸秆还田和黑土地保护。

但是,秸秆腐解慢是制约东北黑土区秸秆还田的一个重要因素^[17],尤其是目前制约玉米秸秆直接覆盖还田的一个重要因素。作物秸秆腐解程度会受到气候、秸秆类型和土壤理化性质等多种因素的影响^[18],同时还田秸秆腐解会影响土壤的温湿度变化,土壤温度、土壤湿度作为地表主要物理指标,又是土壤作用于植物的重要指标^[19],直接影响作物的生长及产量。REN^[20]研究表明,秸秆还田耕作模式下深松与深翻之所以能提高土壤温度,主要源于秸秆覆盖的保温保墒作用;常晓慧等^[21]在黑土试验中发现,深翻秸秆还田措施能够增加生育期土壤总有效积温;付强等^[22]研究发现秸秆覆盖对于热量具有双向阻碍作用;RAM 等^[23]发现免耕覆盖还田处理

相比不还田处理的地温在整个生育期都有不同程度的降低。另有研究表明,无残茬覆盖的传统翻耕降低土壤水分含量,土壤风蚀水蚀严重^[24-25],而秸秆覆盖还田能提高旱作区土壤水分含量,且地面覆盖秸秆可提高土壤蓄水量 14%~15%^[26]、提高水分利用率 15%~17%^[27],秸秆还田能增加土壤中腐殖质含量,促进根系生长^[28],但未分解的秸秆将对作物根系生长形成物理阻碍,从而限制根系生长^[29]。秸秆还田条件下,在雨季和干旱季节均能大幅度提高玉米根系的根长密度和根尖数量^[30],提高作物根系的水肥吸收能力和抗逆能力^[31]。

上述研究表明,秸秆还田影响土壤温湿度变化,能促进作物根系发育,提高作物产量。因此,本文在东北黑土区典型区域,有针对性地开展粉碎秸秆覆盖全量还田耕作模式下的秸秆腐解变化规律,对比分析粉碎秸秆覆盖全量还田和高留茬还田耕作模式下土壤温湿度变化情况以及对作物生长及产量的影响,为探索东北黑土区玉米秸秆还田耕作模式提供参考。

1 试验条件与方法

1.1 试验条件

试验于 2019 年和 2020 年在黑龙江省大庆市肇州县(45°35'2"~46°16'8"N, 124°48'12"~125°48'3"E)展开,该地区位于松花江北,松嫩平原腹地,属中温带大陆性季风气候,年均活动积温 2 800℃,历年平均降水量 458.3 mm,无霜期 143 d。试验区土壤养分含量(均为质量比)分别为有机质 21.4 g/kg、碱解氮 290.3 mg/kg、有效磷 17.4 mg/kg、有效钾 255.4 mg/kg,土壤 pH 值为 7.21。试验区 2019、2020 年每月平均气温和降水量变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可知,在玉米生育期(5—9 月)^[32],2020

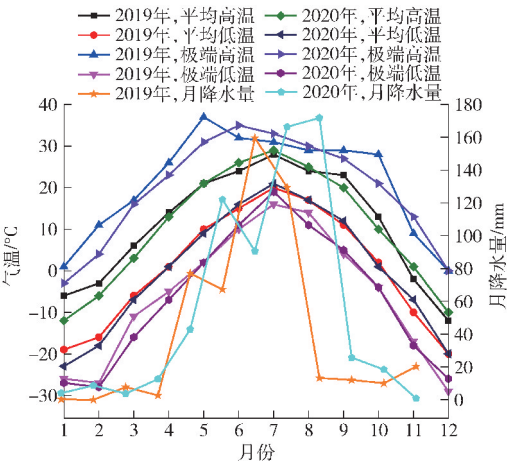


图1 2019、2020年月平均气温和降水量变化曲线
Fig.1 Variation curves of monthly average temperature and precipitation in 2019 and 2020

年月平均高温与2019年相比,5月相等、6月高2℃、7月和8月高1℃、9月低3℃。因此,除了2020年9月试验区受台风的影响,出现连续阴雨天,温度比2019年偏低之外,其他月份总体高于2019年1℃左右。两年的月平均低温相差在-1~1℃之间,总体相差不大。两年月降水量相差较大,2019年降水量为499.9 mm、2020年降水量为668.1 mm,而且2020年相比2019年,5月减少34.2 mm、6月增加54.7 mm、7月减少68.9 mm、8月增加36.9 mm、9月增加158.6 mm。因此,在玉米生育期的5—9月,2020年相比2019年降水量总体增加了147.1 mm,相差最大的月份为9月,主要是由于2020年9月试验区受台风的影响,致使该月降水量增加明显。在5—9月,两年的月极端低温相差不大,极端高温在5月相差6℃。

1.2 试验设计

试验在精细化管理的试验小区进行,试验玉米品种为和玉89号。试验总面积为1 800 m²,其中900 m²为秸秆粉碎覆盖全量还田处理试验组,900 m²作为对照组。试验组是在上一年10月玉米收获完成后,将秸秆粉碎全部抛回田间,粉碎秸秆(秸秆被撕裂)长度8~10 cm,茬高10 cm左右,然后在5月进行免耕播种、10月收获,在此期间无灌溉措施,作物的需水量完全依靠自然降水。对照组是在上一年玉米收获后留茬高10 cm左右,其余秸秆全部做离田处理,其他种植方式与试验组相同,试验组与对照组相邻。在试验过程中,测试试验组覆盖地表的秸秆腐解率、玉米作物生育期内(5—9月)土壤温湿度以及玉米作物的生长情况及产量。

1.3 测试方法

1.3.1 秸秆腐解率

采用尼龙袋法^[33]测试试验组覆盖地表的秸秆

腐解率。测试时先准备尺寸为15 cm×10 cm的60目尼龙袋15个,然后从试验组随机取15 cm×10 cm的15块区域,将每块区域上覆盖的秸秆全部装入备好的15个尼龙袋中(经理论分析和试验测算,每个尼龙袋中的秸秆质量确定为20 g),将装有秸秆的尼龙袋置于田间地表。在玉米播种后,每隔30 d取3个尼龙袋进行秸秆腐解率测试,然后取平均值。测试时将尼龙袋中秸秆残余物冲洗干燥后称量,用失重法计算秸秆腐解率 R_d ,计算公式为

$$R_d = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中 W_i ——初始秸秆干质量
 W_f ——腐解后秸秆干质量

1.3.2 土壤温湿度

利用自主研发的土壤温湿度传感器系统进行温湿度信息采集,土壤温湿度传感器系统主要由温度传感器、湿度传感器和控制箱组成,控制箱由太阳能供电转换器、无线通讯模块、数据信息接收器、数据信息发送器、引线板组成。土壤温湿度传感器系统如图2所示,其中,太阳能供电转换器将太阳能板光能转换的电能供给各用电器(通信模块、传输电台、传感器),无线通信模块应用GPRS进行数据的传输,数据信息发送器进行传感器的信号发送,数据信息接收器根据设定好的程序控制信息采集装置进行数据检测,引线板主要进行电源线转接及信号线转接。土壤温湿度传感器系统主要性能参数如表1所示。

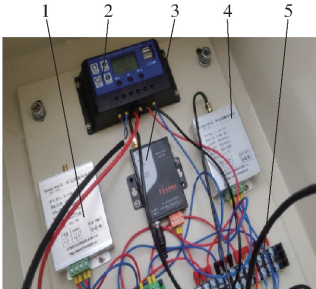


图2 土壤温湿度传感器系统
Fig.2 Sensor system of measuring soil temperature and humidity

- 1. 数据信息发送器 2. 太阳能供电转换器 3. 无线通信模块
- 4. 数据信息接收器 5. 引线板

测试土壤温度时,将土壤温度计分别放置在试验组和对照组试验区土壤的0、10、20、30 cm深度处,在每个深度处以对角线方式排列放置3个土壤温度传感器。每天08:00、11:00、14:00、17:00和20:00获取土壤温度数据,然后将3个测量点的数据取平均值。测试土壤湿度时,在土壤10 cm深处以对角线方式排列设置3个土壤湿度传感器,获取

表 1 土壤温湿度传感器系统主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of soil temperature and humidity sensor system

参数	数值
直流供电电压/V	4.5 ~ 30
最大功耗/W	0.7(24V DC 供电)
温度精度/℃	±0.5(25℃)
湿度精度/%	2(0 ~ 50%)、3(50% ~ 100%)
电导率精度/%	±3(0 ~ 10 000 μS/cm)、 ±5(10 000 ~ 20 000 μS/cm)
温度量程/℃	-40 ~ 80
湿度量程/%	0 ~ 100
电导率量程/(μS·cm ⁻¹)	0 ~ 20 000
温度长期稳定性系数/℃	≤0.1
湿度长期稳定性系数/%	≤1
电导率长期稳定性系数/(%·μS·cm ⁻¹)	≤1
温度响应时间/s	≤15
湿度响应时间/s	≤4
电导率响应时间/s	<1

每天 08:00 的土壤含水率数据,并将 3 个取样点的数据平均值作为该日的土壤含水率,每天的土壤含水率平均值用于计算玉米种植期间每个月的土壤含水率。

1.3.3 玉米生长及产量

在试验组和对照组的试验区中心选择面积 25 m²区域进行数据采集,记录该区域内玉米出苗情况,以及各生育期玉米的株高、径粗,进行比较分析,在玉米收获时进行产量测定。

2 结果分析与讨论

2.1 秸秆腐解率与土壤含水率

2.1.1 秸秆腐解率

玉米生育期 5—9 月秸秆腐解变化情况如图 3 所示。从 10 月至 4 月秸秆的腐解率极低,2019 年和 2020 年分别为 4.3% 和 4.5%,这说明土壤温度对秸秆腐解的抑制作用明显。4 月以后,秸秆的腐解率逐步加快,5 月秸秆腐解率分别为 17.8% 和 16.8%,6 月秸秆腐解率超过 20%,其中 2019 年为 22.3%、2020 年为 27.8%,2020 年相比 2019 年增加了 5.5 个百分点,这是因为 2020 年 6 月的平均高温比 2019 年高 2℃、平均低温高 1℃、降水量增加了 54.7 mm,这表明温湿环境能促进秸秆腐解。7、8 月秸秆腐解率迅速增加,2019 年 7 月秸秆腐解率为 59%、2020 年 7 月为 55.3%,2019 年明显高于 2020 年,这是因为 2019 年的平均高温和平均低温比 2020 年低 1℃,但 2020 年该月的降水量比 2019 年增加 68.9 mm,这表明在温度相差较小的情况下,降水量增加也能促进秸秆腐解,而且腐解率提升较为

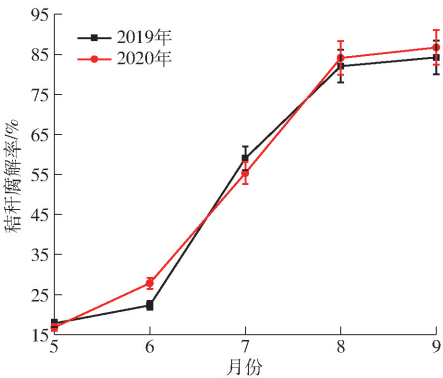


图 3 秸秆腐解率随时间的变化曲线

Fig.3 Variation curves of straw decomposition rate with time

明显,到 8 月末秸秆腐解率均已达到 80% 以上,地面仅可见残留秸秆茎和叶鞘,土壤裸露较多。9 月气温下降明显,秸秆腐解率增长缓慢,残存秸秆为较难腐解的茎纤维,此时为易碎残留物,对下一年度作物种植不会产生大的影响。

研究表明,作物秸秆的腐解是一个缓慢且相对复杂的过程^[34],STANFORD 等^[35]研究发现,最适合作物秸秆腐解的温度为 5 ~ 35℃,试验区域 2019、2020 年 4 月平均低温均为 1℃,因此该阶段秸秆腐解率极低,到 5 月,两年的平均低温分别达到 10℃ 和 9℃,随着气温的升高,土壤温度提升明显,6、7 月秸秆腐解也开始逐步加快,并且总体呈现先快后慢的变化趋势^[36],因此,地温对秸秆腐解起着至关重要的影响^[37]。不仅随着温度的升高秸秆的腐解加快,田间持水率对秸秆的腐解也有一定的影响^[38],对于不采取灌溉的试验区域,田间持水率主要取决于降水量,6 月以后,试验区域的降水量增加明显,加上适合秸秆腐解的温度,还田秸秆腐解率提升明显。

2.1.2 土壤含水率

试验组和对照组 10 cm 处土壤月含水率变化曲线如图 4 所示。从总体土壤含水率来看,5 月试验组土壤含水率低于对照组,这是因为 5 月地表积雪融化并开始向土壤中入渗,对照组无秸秆覆盖阻隔,入渗到土壤的水量较大,而试验组中覆盖在地表的秸秆吸收了一定水分,入渗到土壤中的水量相比对照组少一些。但 2019 年试验组和对照组 10 cm 处土壤月含水率均比 2020 年高 2 个百分点左右,这是由于 2019 年 1—5 月累计降水量为 87.7 mm,比 2020 年同时间段的累计降水量增加了 15.6 mm,而且 2019 年 5 月的降水量为 77.1 mm,比 2020 年同期增加了 34.2 mm,这表明在大气温度和腾发量较低条件下,土壤湿度主要取决于降水量。6 月试验组土壤含水率出现增长,而对照组土壤含水率下降,这是因为 6 月气温较高,作物腾发量大而降水量

小,试验组秸秆覆盖减少了蒸发,土壤水分已开始处于累积态势,土壤含水率始终呈现增长变化。而对照组地面土壤裸露,水分蒸发致使土壤含水率下降。7月试验组和对照组土壤含水率均呈现先增长后减小态势,试验组土壤含水率在7月达到峰值,即7月以前试验组土壤水分始终处于累积增长状态,与对照组含水率差值不断扩大,表明地表未腐解的秸秆仍然起到了蓄水防蒸发的作用。到8月,对照组土壤含水率达到最大值,此时试验组土壤含水率已经开始下降,但是对照组土壤含水率仍然小于试验组土壤含水率,从差值来看二者已经开始接近,这是因为该月秸秆腐解率达到80%以上,地表残余秸秆的蓄水作用开始显著降低。因此,从8月起试验组和对照组土壤含水率始终较为接近并同步减小,这是因为该阶段正值玉米生长旺季,对土壤水分需求较大,此时试验组地表秸秆大部分已腐解,秸秆覆盖的蓄水作用减弱,且土壤含水率受降水量及腾发量共同影响。2019年9月试验组和对照组土壤含水率进一步下降,且试验组含水率高于对照组,但2020年试验组和对照组的土壤含水率由于受到3次台风的影响,降水量极大超出往年同期状况,土壤含水率进一步增加,试验组和对照组土壤含水率在该月均达到了全年最大值,分别为28.7%和26.2%。

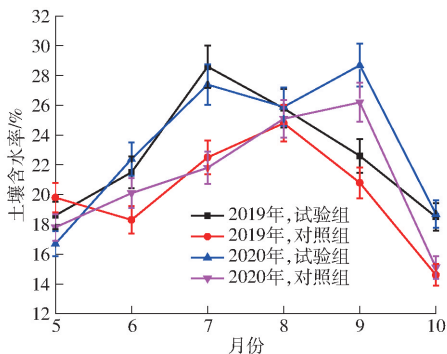


图4 对照组与试验组土壤月平均含水率变化曲线
Fig.4 Variation curves of soil monthly mean moisture content with month between experimental and compared groups

总体来看,试验组土壤含水率高于对照组,表明秸秆覆盖可以改善土壤水分条件,提高土壤含水率,该试验结论与文献[39-41]得到的秸秆覆盖还田能显著改善土壤持水性,以及文献[42-44]研究表明的免耕与秸秆覆盖相结合对改善土壤结构及水分特性更为显著的结论一致。从土壤含水率差值来看,残余秸秆较多的6、7月试验组蓄水保墒作用明显,8、9月试验组地表秸秆残余较少,蓄水保墒作用开始减弱,试验组与对照组的土壤含水率差值变小。

2.2 秸秆腐解率与土壤温度

通过对比试验组和对照组在玉米生育期内不同

深度土壤每月的日间平均温度变化,得到2019年和2020年玉米生育期内的5—9月0、10、20、30 cm处土壤温度变化曲线分别如图5所示。

图5a~5e为2019、2020年5—9月0 cm处土壤温度的变化情况。在5、6月,对照组0 cm处的土壤温度在11:00达到最大值,试验组在14:00达到最大值,而且在14:00前试验组0 cm处的土壤温度均低于对照组,14:00后试验组0 cm处的土壤温度下降较为缓慢,而对照组下降较快,在20:00试验组的0 cm处土壤温度均略高于对照组。这是因为在5、6月秸秆腐解率较低,试验组地表残余秸秆比较多,在日间大气升温阶段地表残余秸秆阻碍了太阳辐射和大气温度向地表传递,地表温度升温较对照组缓慢,当地表温度达到最大值后,进入午后大气降温阶段地表残余秸秆又阻碍地表的热量向大气中传递,说明覆盖地表的秸秆在午后大气降温阶段保温保墒作用明显^[20],试验组地表温度下降幅度较对照组平缓,这与文献[22]研究表明的秸秆覆盖可以有效平抑土壤温度的波动幅度一致,但试验组和对照组的温差比较明显,最大差值出现在6月的08:00,2019年最大差值为4.8℃、2020年为3.8℃。7、9月0 cm处的土壤温度均在14:00达到最大值,但试验组8月0 cm处土壤温度是在17:00达到最大值,这是因为在8月秸秆腐解率较高,在日间大气升温阶段地温呈累积增长态势,湿热环境促进试验组覆盖地表的秸秆腐解,秸秆腐解会出现放热反应,又促进土壤放出的热量增大。因此,从14:00到17:00,试验组0 cm处的土壤温度在太阳辐射和覆盖地表秸秆腐解放热的共同影响下温度进一步升高。同时,7月秸秆腐解率接近60%、8月末达到80%以上,试验组地表残余秸秆明显减少,地表残余秸秆对大气与土壤之间的直接热传递阻碍作用减弱,与对照组地表温度变化趋势趋向一致,温差也大幅减小,9月试验组地表残余秸秆进一步减少,试验组和对照组地表温度变化基本一致。这说明覆盖在地表的秸秆对热量传递具有双向阻碍作用,一定程度上隔绝了大气与土壤间的直接热传递,对土壤温度有着不可忽略的影响。

图5f~5j为10 cm处的土壤温度变化情况。由图可见,在2019、2020年5、6月的日间升温阶段,试验组和对照组地下10 cm处的土壤存在一定温差,5、6月的午后大气降温阶段和7—9月试验组及对照组地下10 cm处土壤温度变化趋势基本一致,且7—9月各时间点二者温差均较小;5、6月试验组与对照组10 cm处土壤温度最大值出现的时间点与0 cm处基本相一致。从温度的波动范围

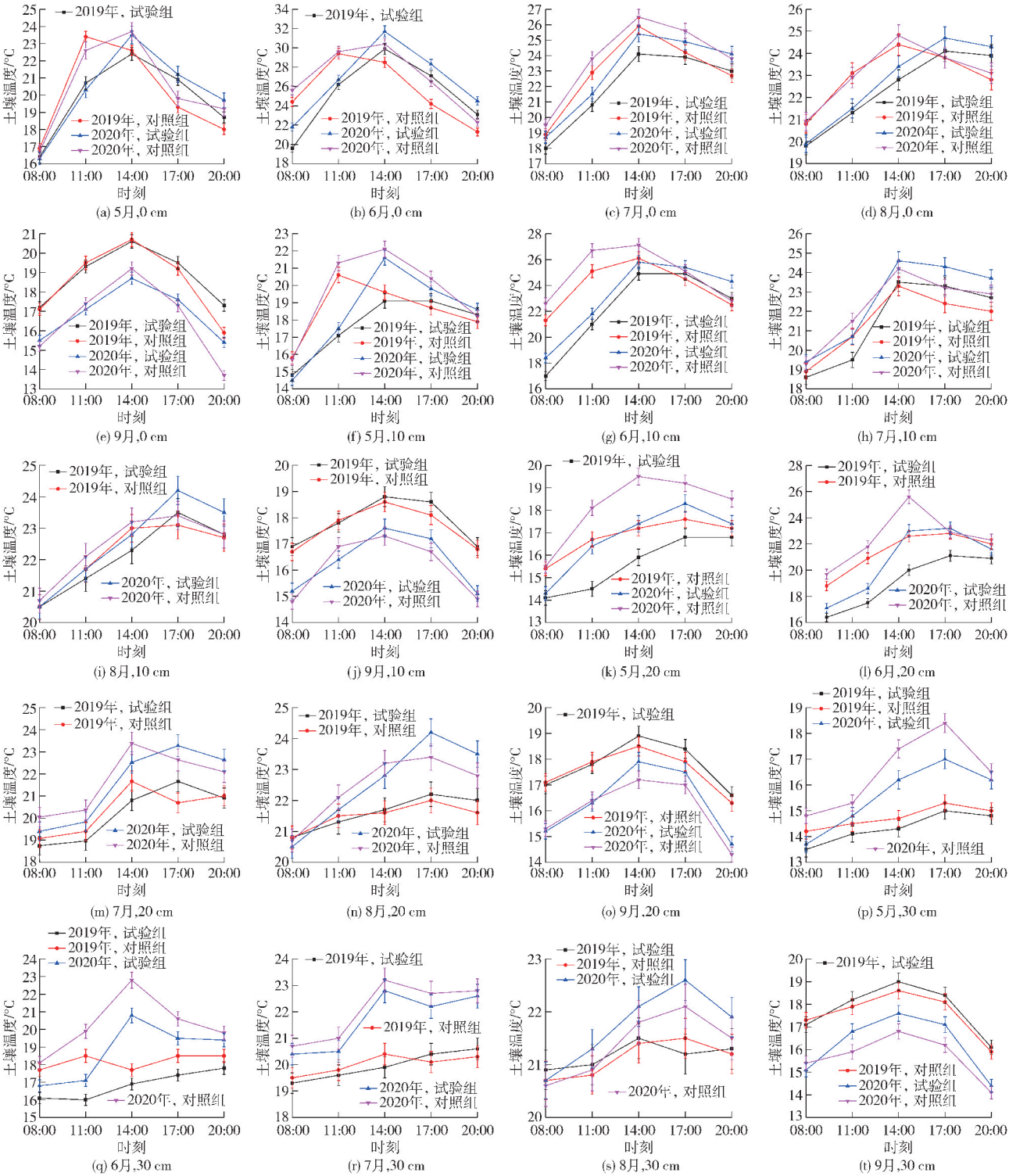


图 5 不同深度土壤每月的日平均温度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of monthly soil daily average temperature at different depths

来看,地下 10 cm 处的土壤温度仍有一定波动,但波动小于地表处,这表明地下 10 cm 处土壤温度既受大气温度的影响,同时也受地表覆盖秸秆残余量的影响,但受影响的程度不如地表处明显。通过对比该深度处试验组与对照组土壤温度变化规律,说明秸秆覆盖的隔热、保温作用在该深度仍有较强的体现。

图 5k ~ 5o 为地下 20 cm 处的土壤温度变化情

况。试验组与对照组土壤温度均呈现出随气温小幅波动的变化规律,但波动范围较 10 cm 处土壤温度变化又有所减小。随着土壤深度的增加,气温对土壤温度的影响减弱。5、6 月试验组的土壤温度始终低于对照组,说明秸秆腐解率不高时,地表残余的一定量秸秆的阻碍作用使地下 20 cm 处土壤温度无法有效提升,2019 年和 2020 年试验组和对照组温差最大值均出现在 6 月,分别为 3.4、3.2℃。到 7 月

地表残余秸秆量逐渐减少,试验组和对照组在 20 cm 处土壤温度基本相近,相同时间点对应的温差极小,这说明秸秆腐解率达到一定程度后,残余在地表的秸秆对地下 20 cm 处土壤温度的影响已经不显著。

图 5p~5t 表明试验组和对照组在 2019 年和 2020 年 30 cm 处的土壤温度变化趋势基本相近,5、6 月 30 cm 处土壤温度对照组均略高于试验组,最大温差均出现在 6 月 11:00,分别为 2.5、2.8℃,这说明在秸秆腐解率较低的月份,覆盖地表的残余秸秆对 30 cm 处的土壤温度影响较小,且仅对个别时间点的温度有一定影响;7—9 月温差变化极小,除 2020 年 9 月受台风影响外,试验组和对照组 30 cm 处的土壤温差均不超过 0.5℃,表明气温对该深度的土壤温度影响较小,覆盖地表的秸秆对该深度的土壤温度影响效果也较小。从二者温差和温度变化趋势来看,有秸秆覆盖或无秸秆覆盖对该深度土壤

的温度影响效果较小,这与文献[22]研究表明的覆盖秸秆对深层土壤温度仍有一定影响,但其影响效果较小的试验结果相一致。

2.3 玉米不同生长期株高、茎粗及产量

2.3.1 玉米株高和茎粗

前述研究表明,在不同生育期试验组土壤含水率均高于对照组。试验组在拔节期的株高和茎粗均小于对照组,在抽穗期和灌浆期,试验组均高于对照组。表 2 结果表明,秸秆覆盖引起的土壤含水率升高不是植物生长的唯一决定性因素。2019 年和 2020 年试验组的出苗期均比对照组晚,分别为 4、3 d,这是因为 5 月试验组地温低于对照组,试验组秸秆覆盖降低了土壤温度,影响了出苗效果。拔节期试验组玉米株高和茎粗均低于对照组,这是因为玉米拔节期在 6 月中旬,除个别时间段外试验组的地温均低于对照组。进入抽穗期后,试验组的株高和茎粗均高于对照组。

表 2 不同生长期玉米株高、茎粗和产量的对比

Tab.2 Comparison of plant height, stem diameter and maize yield in different growing periods

年份	种植模式	出苗日期	拔节期		抽穗期		灌浆期		产量/ (kg·hm ⁻²)
			株高/cm	茎粗/cm	株高/cm	茎粗/cm	株高/cm	茎粗/cm	
2019	试验组	5 月 21 日	124.4	2.6	259.2	3.2	265.7	3.4	10 716.0
	对照组	5 月 17 日	131.7	2.8	236.6	3.1	261.4	3.2	10 522.5
2020	试验组	5 月 21 日	124.8	2.7	259.5	3.4	266.8	3.5	9 505.1
	对照组	5 月 18 日	132.2	2.8	237.5	3.2	262.2	3.2	9 186.2

5、6 月覆盖地表的秸秆使不同深度的土壤温度有所降低,对玉米植株生长产生不利影响,试验组的玉米株高和茎粗均小于对照组。7、8 月的抽穗期和灌浆期,试验组的土壤温度均高于对照组,试验组的玉米株高和茎粗也均高于对照组,这是因为 7、8 月秸秆覆盖保持了较高的土壤温度,尤其是当土壤温度达到最大后降低幅度变缓,作物处于较高土壤温度的生长时间增加,有效促进了作物生长,表明玉米植株生长与土壤温度有很高的相关性。

2.3.2 玉米产量

玉米收获期对产量进行了测定,2019 年试验组产量为 10 716.0 kg/hm²,对照组为 10 522.5 kg/hm²,试验组比对照组增产 193.5 kg/hm²。由此可见,试验组相比对照组一定程度上增加了玉米产量,试验结果与张宇飞等^[45]的相一致。其原因主要是秸秆还田对土壤温度产生了“缓解效应”,促进了作物的生长^[46],即高温时秸秆的热传导率更小^[47],土壤温度降低较慢,低温时覆盖地表的秸秆可以减少热量的散失^[48];另外,覆盖地表的秸秆能减少水分的蒸发^[49],利于半干旱地区土壤保持较佳的含水率。因此,在玉米生长过程中,虽然苗期和拔节期土壤

温度受秸秆覆盖产生了一定的不利影响,但在玉米作物生殖生长的抽穗期和灌浆期,覆盖地表秸秆的保温保墒作用明显,促进了作物的生长,提高了玉米产量。2020 年由于受“巴威”、“美莎克”、“海神”台风影响,在乳熟末期至蜡熟初期出现持续阴雨、田间积水、玉米倒伏,以致收获难度大、玉米产量降低、品质变差,试验组和对照组的玉米产量比 2019 年分别降低 1 210.9、1 346.3 kg/hm²,试验组玉米产量下降幅度低于对照组,但受台风影响下试验组比对照组增产的具体原因尚需进一步试验研究。

3 结论

- (1)从整个玉米生长期来看,秸秆覆盖全量还田相比高留茬还田能有效提升土壤含水率,除在 5 月试验组土壤含水率低于对照组,6—9 月,试验组土壤含水率比对照组平均每月提高约 3 个百分点,说明覆盖地表秸秆在 6—9 月期间保墒作用明显。因此,秸秆覆盖全量还田能有效提升干旱和半干旱区域玉米种植的土壤含水率。
- (2)覆盖地表的秸秆在 5、6 月腐解率比较低,

日间大气升温阶段覆盖地表残余秸秆阻碍了土壤 0、10、20、30 cm 处的温度升高,在 7—9 月秸秆腐解率增大后阻碍作用减弱,同时秸秆覆盖使日间大气降温阶段时土壤 0、10、20、30 cm 处的温度下降趋于平缓。因此,覆盖地表的秸秆对土壤温度具有双向阻碍作用。

(3) 秸秆覆盖全量还田条件下玉米出苗期晚于高留茬还田,试验组在玉米拔节期株高和茎粗小于对照组,但在抽穗期和灌浆期玉米株高和茎粗均优于对照组,2019 年试验组玉米产量为 10 716.0 kg/hm²,比

对照组玉米产量高 193.5 kg/hm²,2020 年受台风影响,产量下降,但试验组产量仍略高于对照组。整体来看,秸秆覆盖还田可通过保温保墒作用提高玉米关键生长期的土壤温湿度,促进玉米作物生长,提高玉米产量。

(4) 秸秆覆盖全量还田一方面可实现秸秆综合利用,另一方面覆盖地表的秸秆可影响土壤温湿度变化,总体上促进作物生长并提高作物产量,腐解的秸秆还可以改善土壤有机质含量,利于土壤保护和实现农业可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 贾洪雷,马成林,李慧珍,等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报,2010,41(10):28–34. JIA Honglei, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28–34. (in Chinese)
- [2] 李贝,丁广歌,赵鹏飞,等. 保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(4):891–900. LI Bei, DING Guangge, ZHAO Pengfei, et al. Effect of conservation practices on soil organic matter in medium or low fertility black soil[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2020, 39(4): 891–900. (in Chinese)
- [3] 李艳,李玉梅,刘铮宇,等. 秸秆还田对连作玉米黑土团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 土壤与作物,2019,8(2):129–138. LI Yan, LI Yumei, LIU Zhengyu, et al. Effects of straw incorporation on aggregate stability and organic carbon content of black soil in continuous crop-ping maize[J]. Soils and Crops, 2019, 8(2): 129–138. (in Chinese)
- [4] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报,2019,35(22):132–140. CONG Hongbin, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 132–140. (in Chinese)
- [5] 崔蜜蜜,蒋琳莉,颜廷武. 基于资源密度的作物秸秆资源化利用潜力测算与市场评估[J]. 中国农业大学学报,2016,21(6):117–131. CUI Mimi, JIANG Linli, YAN Tingwu. Potential evaluation and market assessment on crop straw resource utilization based on resource density[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(6): 117–131. (in Chinese)
- [6] 石祖梁,王飞,王久臣,等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. 中国农业科技导报,2019,21(5):8–16. SHI Zuliang, WANG Fei, WANG Jiuchen, et al. Utilization characteristics, technical model and development suggestion on crop straw in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(5): 8–16. (in Chinese)
- [7] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报,2002,18(3):87–91. HAN Lujia, YAN Qiaojuan, LIU Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 87–91. (in Chinese)
- [8] 包建财,郁继华,冯致,等. 西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J]. 应用生态学报,2014,25(1):181–187. BAO Jiancai, YU Jihua, FENG Zhi, et al. Situation of distribution and utilization of crop straw resources in seven western provinces, China[J]. Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 181–187. (in Chinese)
- [9] 方放,李想,石祖梁,等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报,2015,31(2):228–234. FANG Fang, LI Xiang, SHI Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 228–234. (in Chinese)
- [10] 马晓轩,蔡红珍,付鹏,等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报,2016,25(1):168–174. MA Xiaoxuan, CAI Hongzhen, FU Peng, et al. Analysis of the reutilization methods for agricultural waste of straw in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 168–174. (in Chinese)
- [11] 朱开伟,刘贞,欧训民,等. 基于土壤功能的中国主要农作物可能源化秸秆生态潜力分析[J]. 中国生态农业学报,2017,25(2):276–286. ZHU Kaiwei, LIU Zhen, OU Xunmin, et al. Evaluation of energy-oriented utilization potential of main Chinese crop residues based on soil protection functions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 276–286. (in Chinese)
- [12] 李新华,郭洪海,朱振林,等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(9):130–135. LI Xinhua, GUO Honghai, ZHU Zhenlin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 130–135. (in Chinese)
- [13] 路文涛,贾志宽,张鹏,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):522–528. LU Wentao, JIA Zhikuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 522–528. (in Chinese)

- [14] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J/OL].农业机械学报,2020,51(5):285-294.
WEI Yongxia,SHI Guoxin,FENG Chao,et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):285-294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200531&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.031. (in Chinese)
- [15] 张常仁,杨雅丽,程全国,等.不同耕作模式对东北黑土微生物群落结构和酶活性的影响[J].土壤与作物,2020,9(4):335-347.
ZHANG Changren,YANG Yali,CHENG Quanguo,et al. Effects of different tillages on soil microbial community structure and enzyme activity in mollisols of China[J]. Soils and Crops,2020,9(4):335-347. (in Chinese)
- [16] 张万锋,杨树青,靳亚红,等.秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J/OL].农业机械学报,2021,52(1):228-237.
ZHANG Wanfeng,YANG Shuqing,JIN Yahong,et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):228-237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210126&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.026. (in Chinese)
- [17] 田平,姜英,孙悦,等.不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(1):100-108.
TIAN Ping,JIANG Ying,SUN Yue,et al. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2019,27(1):100-108. (in Chinese)
- [18] 韩亚.黑土区玉米秸秆腐解特征及其改土效果的研究[D].北京:中国农业科学院,2019.
HAN Ya. Decomposition characteristics of maize straw and its effect on soil biological and physical properties in the mollisol region[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2019. (in Chinese)
- [19] TRAUS I,MRAK T,FERLAN M,et al. Influence of soil temperature on growth traits of European beech seedlings[J]. Canadian Journal of Forest Research,2014,45(3):246-251.
- [20] REN T. Soil water and temperature regimes in winter wheat as affected by crop rotation,tillage and row spacing[D]. Edmonton: University of Alberta,1997.
- [21] 常晓慧,孔德刚,井上光弘,等.秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J].东北农业大学学报,2011,42(8):117-120.
CHANG Xiaohui,KONG Degang,INOUE Mitsuhiro,et al. Effect of different straw returning methods on soil temperature in spring sowing period[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2011,42(8):117-120. (in Chinese)
- [22] 付强,马梓霖,李天霄,等.北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(12):152-159.
FU Qiang,MA Ziao,LI Tianxiao,et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(12):152-159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141223&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.023. (in Chinese)
- [23] RAM H,SINGH Y,SAINI K S. Agronomic and economic evaluation of permanent raised beds,no tillage and straw mulching for an irrigated maize-wheat system in Northwest India[J]. Experimental Agriculture,2012,48(1):21-38.
- [24] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):1-19.
HE Jin,LI Hongwen,CHEN Haitao,et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [25] 杨陆强,高彦玉,朱加繁,等.保护性耕作技术与配套机具[J].农机化研究,2018,40(4):263-268.
YANG Luqiang,GAO Yanyu,ZHU Jiafan,et al. Conservation tillage technology and related equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(4):263-268. (in Chinese)
- [26] NYAKUDYA I W,STROOSNIJDER L. Conservation tillage of rain-fed maize in semi-arid Zimbabwe:a review[J]. Soil and Tillage Research,2015,145(1):184-197.
- [27] 张永斌.陕西旱地保护性耕作技术模式研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
ZHANG Yongbin. Study of conservation tillage technology model in Shaanxi[D]. Yangling:Northwest A&F University,2010. (in Chinese)
- [28] 黄毅,毕素艳,邹洪涛,等.秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响[J].玉米科学,2013(5):109-112.
HUANG Yi,BI Suyan,ZOU Hongtao,et al. Effect of straw deep returning on corn root system and yield[J]. Journal of Maize Sciences,2013(5):109-112. (in Chinese)
- [29] DAL F N,SARTORI L,SIMONETTI G,et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth[J]. Soil and Tillage Research,2014,140(1):55-65.
- [30] 安俊朋,李从锋,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.
AN Junpeng,LI Congfeng,QI Hua,et al. Effects of straw strip returning on spring maize yield,soil moisture,nitrogen contents and root distribution in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica,2018,44(5):774-782. (in Chinese)
- [31] 李志勇,王璞,翟志席,等.不同水肥优化模式下冬小麦根系生长及水氮利用效率[J].耕作与栽培,2003(2):17-19.
LI Zhiyong,WANG Pu,ZHAI Zhixi,et al. Effect of water-fertilizer models on winter wheat root growth and water-nitrogen utilization rate[J]. Tillage and Cultivation,2003(2):17-19. (in Chinese)
- [32] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):

- 60 – 67.
- XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60 – 67. (in Chinese)
- [33] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 212 – 219. CAO Yingfei, ZHANG Hong, LIU Ke, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 212 – 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160930&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 09. 030. (in Chinese)
- [34] 关哲允. 不同地区不同还田深度对玉米秸秆腐解特性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020. GUAN Zheyun. Effects of different depth of returning fields in different areas on decomposition characteristics of maize straw [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [35] STANFORD G, FRERE M H, SHWANINGER D H. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization[J]. Soil Science, 1973, 115(4): 321 – 323.
- [36] 蔡丽君, 张敬涛, 刘婧琦, 等. 玉米-大豆免耕轮作体系玉米秸秆还田量对土壤养分和大豆产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(5): 107 – 110. CAI Lijun, ZHANG Jingtao, LIU Jingqi, et al. Effects of corn stalk amount returning to field on the soil nutrient and soybean yields under alternate-year no-till corn – soybean rotation[J]. Crops, 2015(5): 107 – 110. (in Chinese)
- [37] 马想, 徐明岗, 赵惠丽, 等. 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1564 – 1573. MA Xiang, XU Minggang, ZHAO Huili, et al. Decomposition characteristics and driving factors of organic materials in typical farmland soils in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(9): 1564 – 1573. (in Chinese)
- [38] 周桂香, 陈林, 张丛志, 等. 温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 911 – 918. ZHOU Guixiang, CHEN Lin, ZHANG Congzhi, et al. Effects of temperature and moisture on microbial community function responsible for straw decomposition[J]. Soils, 2015, 47(5): 911 – 918. (in Chinese)
- [39] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333 – 339. LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333 – 339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190736&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 036. (in Chinese)
- [40] YAN Q Y, DONG F, LOU G, et al. Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dry land farming[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(11): 2558 – 2569.
- [41] TAO Z Q, LI C F, LI J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang – Huai – Hai valley[J]. The Crop Journal, 2015, 3(5): 445 – 459.
- [42] 王金武, 唐汉, 王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状及发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1 – 21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1 – 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170501&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 05. 001. (in Chinese)
- [43] 杜建涛, 何文清, VINAY N, 等. 北方旱区保护性耕作对农田土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 25 – 29. DU Jiantao, HE Wenqing, VINAY N, et al. Effects of conservation tillage on soil water content in northern arid regions of China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 25 – 29. (in Chinese)
- [44] 陈浩, 李洪文, 高焕文, 等. 多年固定道保护性耕作对土壤结构的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 122 – 125. CHEN Hao, LI Hongwen, GAO Huanwen, et al. Effect of long-term controlled traffic conservation tillage on soil structure[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 122 – 125. (in Chinese)
- [45] 张宇飞, 刘立志, 马昱莹, 等. 耕作和秸秆还田方式对玉米产量及钾素积累转运的影响[J]. 作物杂志, 2019(2): 122 – 127. ZHANG Yufei, LIU Lizhi, MA Yuxuan, et al. Effects of tillage and straw returning on maize yield and potassium accumulation and transport[J]. Crops, 2019(2): 122 – 127. (in Chinese)
- [46] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 60 – 67. ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Effect of straw returning manners on seedbed soil physical properties and winter wheat growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 60 – 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s009&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 009. (in Chinese)
- [47] SAUER T J, HATFIELD J L, PRUEGER J H, et al. Surface energy balance of a corn residue-covered field[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3 – 4): 155 – 168.
- [48] CHEN Suying, ZHANG Xiyang, PEI Dong, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat field experiments on the North China Plain[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 150(3): 261 – 268.
- [49] SHINNERS K J, NELSON W S, WANG R. Effects of residue-free band width on soil temperature and water content[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1994, 37(1): 39 – 49.