



秸秆覆盖对黑土区大豆生长及产量构成因素的影响

孔凡丹^{1,2}, 周利军¹, 郑美玉¹, 迟彩霞³, 张淑花¹, 张春艳¹, 杨则已¹

(1. 绥化学院 农业与水利工程学院, 黑龙江 绥化 152061; 2. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 绥化学院 食品与制药工程学院, 黑龙江 绥化 152061)

摘要:为研究秸秆覆盖对黑土区土壤水热及大豆生长状况的影响,以垦丰 16 为试验材料,基于大田试验,分别设置秸秆表面覆盖(T1),0~10 cm 土层秸秆还田覆盖(T2),10~20 cm 土层秸秆还田覆盖(T3)和无秸秆覆盖(CK)4 种处理。通过测定大豆生育期内的耕作层土壤温度及含水率,以及大豆株高、茎粗和叶面积等生长指标,对比分析不同秸秆覆盖处理对土壤水热、大豆生长及产量等性状的影响。结果表明:大豆生育期初 T1 处理 0~10 cm 土层含水率明显高于 T2 及 T3 处理;在 10~20 cm 差异逐渐缩小,20~30 cm 土层差异变大;秸秆覆盖会影响播种初期的出苗率,而在播种 10 d 后 T1 处理的出苗情况最好;T2 处理的大豆株高、茎粗、LAI 及产量表现最佳。通过统计学分析不同秸秆覆盖之间的差异,秸秆覆盖具有一定的阻碍热量传递的作用,有利于土壤含水率的提高,对大豆生长状况、光合特性及产量产生影响,0~10 cm 土层秸秆还田覆盖为最佳处理。

关键词:秸秆覆盖;大豆;生长;产量

Effects of Straw Mulching on Growth and Yield Components of Soybean in Black Soil Area

KONG Fan-dan^{1,2}, ZHOU Li-jun¹, ZHENG Mei-yu¹, CHI Cai-xia³, ZHANG Shu-hua¹, ZHANG Chun-yan¹, YANG Ze-yi¹

(1. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. School of Food and Pharmaceutical Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: In order to study the effects of straw mulching on soil moisture and heat, and soybean growth in black soil area of northeast China, taking Kenfeng 16 as the experimental material, based on the field experiment, four treatments were set up, including straw surface mulching (T1), straw returning mulching (T2) in 0–10 cm soil layer, straw returning mulching (T3) in 10–20 cm soil layer and no straw mulching (CK). The effects of different straw mulching on soil water and heat, soybean growth and yield were compared and analyzed by measuring the soil temperature and water content in the tillage layer during the growth period of soybean, as well as the growth indexes such as soybean plant height, stem diameter and leaf area. The results showed that, at the beginning of soybean growth period, the moisture content of 0–10 cm soil layer under T1 treatment was significantly higher than that under T2 and T3 treatments. In the 10–20 cm soil layer, the difference decreased gradually, and in the 20–30 cm soil layer, the difference became larger. Straw mulching could affect the seedling emergence rate at the early stage of sowing, but T1 treatment had the best seedling emergence at 10 days after sowing. T2 treatment had the best effect on plant height, stem diameter, LAI and yield of soybean. Combined with statistical analysis of the differences among different straw mulches, it is showed that straw mulching had a certain effect of preventing heat transfer, growth, photosynthetic characteristics and yield of soybean. The 0–10 cm soil layer with straw returned to field and mulching is the best treatment.

Keywords: straw mulching; soybean; growth; yield

早在 20 世纪 30 年代,美国的 Hallsted 等^[1]学者就已对秸秆覆盖进行了科学性的研究,自此之后世界各国也相继开展了此方面的研究并逐渐深入和完善^[2-9]。我国对于秸秆覆盖的研究始于 20 世纪 70 年代初^[10],主要集中于覆盖条件下土壤中水热^[11-13]、作物产量^[14-15]及植被生长^[16-18]等方面。在农业生产中,土壤水热是决定植物生长发育的重要条件。卢星航等^[19]在内蒙古河套灌区研究了不同

秸秆覆盖模式对冻融土壤水分和温度的影响。韦灵等^[20]采用野外染色示踪方法研究了桂北岩溶区秸秆覆盖与非覆盖条件下水稻田优先路径及其空间分布特征。秸秆覆盖措施有利于土壤蓄水保墒,加快土壤表层水流运动状态,但相应降低了深层土壤中优先流的发育程度,减少田间水肥深层渗漏,在一定程度上可提高作物耕作层中的水肥利用率,为作物生长发育提供良好的条件,最终使作物产量

得到相应提高。时学双等^[21]为探明秸秆覆盖对高海拔寒区农田土壤温度和作物生长的影响,对青稞进行了田间小区试验研究。刘爽等^[22]在黑龙江省海伦市开展田间试验,在大豆玉米轮作制度下,实施免耕秸秆覆盖和少耕的保护性耕作方式,连续3年大豆产量均表现为增产。

黑龙江省典型黑土区农业用地土壤水分的补给主要依赖自然降雨,区域降雨多分布在7—8月,由于缺乏适宜的耕作方式,使得降雨径流损失较大。同时黑龙江省玉米种植面积较大,大量玉米秸秆被焚烧掉,不仅污染环境,而且浪费资源。采用秸秆覆盖可有效提高秸秆利用率,保护生态环境,为黑土区农业生产提供有力的支撑。因此,本研究以黑龙江省典型黑土区为研究区,应用玉米秸秆进行覆盖处理,主要研究秸秆覆盖对黑土区土壤水热及大豆生长状况及

产量的影响,旨在为改善黑土区土壤特性、提高土地生产率、实现作物高效增产奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2020年5—10月在黑龙江省绥化市北林区(46°41'N、126°58'E)进行,该区域属于温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,春秋季节短且多风,降雨分布不均,多集中在7—8月,属雨热同季,年平均气温约为2.4℃,年积温约为2566℃,日照时数约为2766h,无霜期129d左右,降水量547mm。2020年大豆生育期日气温及降水量变化如图1所示。生育期内最高气温及最低气温分别为28.1和5.99℃。最大降水量为64.9mm。

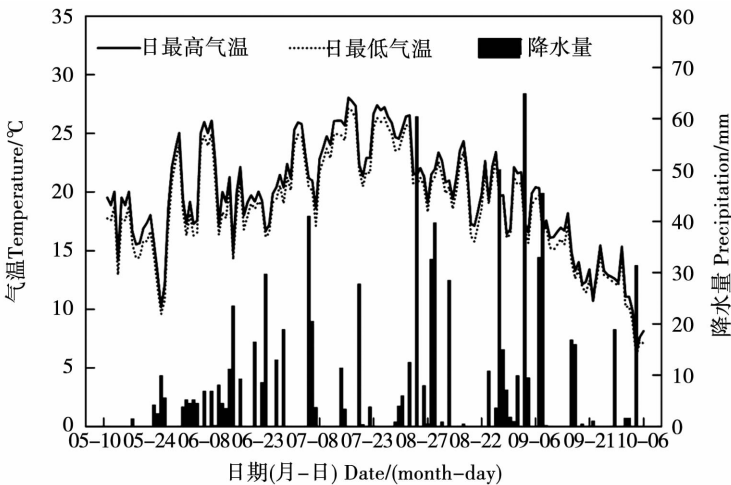


图1 2020年大豆生育期日气温及降水量变化

Fig.1 The changes in daily temperature and precipitation during soybean growth period in 2020

1.2 试验设计

试验地块地势平坦,划分12块10m×10m的区域,共设4个处理,分别为秸秆表面覆盖(T1);0~10cm土层秸秆还田覆盖(T2);10~20cm土层秸秆还田覆盖(T3)和无秸秆覆盖(CK)。试验采用单因素随机区组设计,每个处理3个重复,前茬作物为玉米,收获后秸秆粉碎均匀铺撒。试验用大豆品种为垦丰16,由黑龙江省农垦科学院作物所选育,该品种具有高产稳产、既适宜垄作又耐密植的特性,种植密度为30万株·hm⁻²,于2020年5月10日与底肥一起播施,田间管理与当地农户管理一致,于10月6日收获。各处理设置情况详见表1。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤温度及含水率 土壤温度及含水率采用

TDR时域反射仪进行测定,分别在各处理地块埋设TDR时域反射仪一台,每10cm深度测定一组温度及含水率,最大深度为100cm,每小时自动收集数据。

1.3.2 大豆生长状况 在每个试验处理内选取3株有代表性的植株,每3d测量1次株高和茎粗,株高用钢尺测量,茎粗用游标卡尺测量。

1.3.3 大豆光合特性 在每个试验处理中选取3株具有代表性的植株,采用AM-300型叶面积仪测定叶片面积指数;光合势为2次取样叶面积平均值与相隔天数的乘积;净同化率=干重增加量/(叶面积指数×相隔天数)。

1.3.4 大豆产量构成因素 用电子天平称取百粒重,同时统计空秕荚粒数和单株荚粒数等指标。

表 1 试验处理
Table 1 The experimental treatments

处理 Treatment	操作方法 Operation method
秸秆表面覆盖 (T1)	秋收后去玉米茬, 秸秆粉碎成 3~5 cm 碎段, 播种前均匀覆盖于地表
0~10 cm 土层秸秆还田覆盖 (T2)	秋收后去玉米茬, 秸秆粉碎成 3~5 cm 碎段, 播种前均匀拌入 0~10 cm 土层中
10~20 cm 土层秸秆还田覆盖 (T3)	秋收后去玉米茬, 秸秆粉碎成 3~5 cm 碎段, 播种前覆匀拌入 10~20 cm 土层中
无秸秆覆盖 (CK)	秋收后去玉米茬并移走秸秆, 翻耕耙地, 次年起垄播种大豆

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据处理, 采用 Origin 8.5 软件进行数据绘图, 应用 SPSS 22.0 软件对相关数据进行方差分析, 采用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对土壤温度及含水率的影响

2.1.1 土壤温度 2020 年大豆生育期 0~30 cm 土层温度变化如图 2 所示。T1 处理在苗期土壤 0~10 cm 温度上升较慢, 土壤温度随外界温度变化较小, 而在成熟期前后, 由于秸秆在土壤表层覆盖, 土壤温度下降也相对较慢, 10~20 cm 及 20~30 cm 土层随着外界温度变化较小; T2 处理土壤 0~10 cm 土层温度随外界温度变化较快, 并能很快将表层吸收的热量传至 10~20 cm 土层; T3 处理 10~20 cm 土层吸收热量后, 土壤保持温度的时间较长; T2 及 T3 处理在大豆成熟期后随着土壤温度的降低降幅较小, 这说明秸秆具有一定阻碍热量传递的作用。

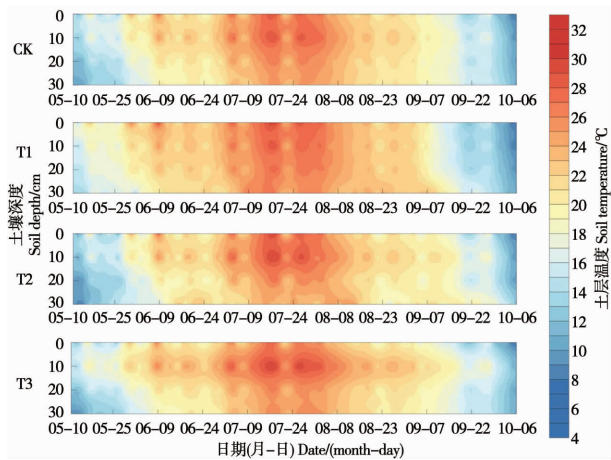


图 2 2020 年大豆生育期 0~30 cm 土层温度变化
Fig.2 The changes in soil temperature of 0-30 cm layer during the soybean growth period in 2020

2.1.2 土壤含水率 土壤含水率的变化主要受气候、作物生长状况、覆盖物及覆盖方式的影响。2020 年大豆生育期 0~30 cm 土层含水率变化如图 3 所示。0~30 cm 土层土壤含水率在大豆苗期、分枝至

开花期以 T1 处理效果最好, 土壤含水率较其他 3 种处理随外界温度变化较小, 说明秸秆表面覆盖可有效阻止水分散失, 有利于提高土壤贮水量。在大豆开花至成熟期前后, T2 及 T3 处理土壤含水率较大, 其中 T2 处理 10~20 cm 土层含水率最大, T3 处理 20~30 cm 土层含水率最大。由图 3 可以看出, 各处理 0~30 cm 土层含水率与 0~10 cm 处的土壤含水率差异较大, 大豆生育前期秸秆表面覆盖含水率明显高于秸秆还田覆盖; 在 10~20 cm 土层差异逐渐缩小, 各处理间差异不显著, 20~30 cm 土层差异变大, 但 CK 处理含水率始终低于其他几种处理, 说明不同秸秆覆盖方式对表层土壤含水率影响较大, 均较 CK 处理更有利于土壤含水率的提高。

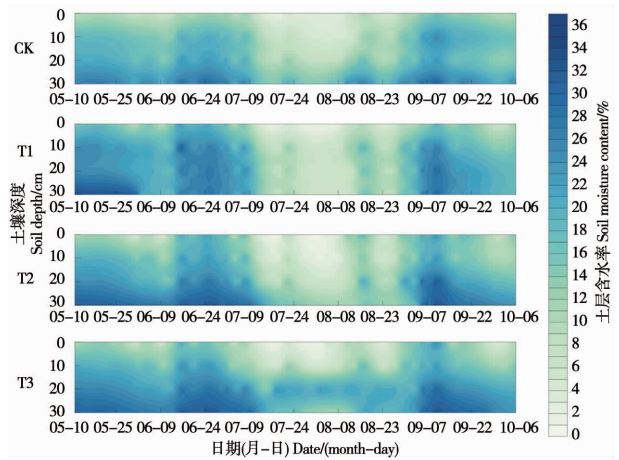


图 3 2020 年大豆生育期 0~30 cm 土层含水率变化
Fig.3 The changes in soil moisture content of 0-30 cm layer during soybean growth period in 2020

2.2 秸秆覆盖对大豆生长状况的影响

2.2.1 出苗率 图 4 为 2020 年 5 月 10 日播种大豆后出苗率的变化曲线。CK 处理在播种后土壤含水率虽会降低, 但播种前的降雨满足了大豆出苗时对水分的需求, 因此 CK 处理在播种 7 d 后出苗率最优, 达 90.5%; T1 处理在播种 7 d 后的出苗率仅为 75.3%, 而由于秸秆表面覆盖增加了土壤温度, 使得随着时间的增加 T1 处理的出苗率快速增长; T2 及 T3 处理播种 7 d 后的出苗率分别为 88.3% 及 85.2%。所有处理在 5 月 21 日进行补苗, 7 d 后进

行出苗统计,各处理大豆出苗率均达到 90%。5 月 27 日完成出苗。总体来说,T1 处理出苗情况最好,补苗少,效果最好,属于集中出苗;CK 及 T2 处理出苗情况较好,效果较好;T3 处理出苗情况最差,补苗最多。

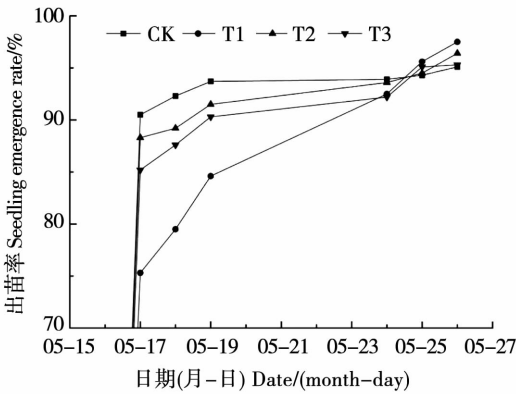


图 4 大豆苗期出苗率变化曲线

Fig.4 The variation curve of soybean seedling emergence rate in soybean seedling stage

2.2.2 株高 由于不同秸秆覆盖处理对大豆苗期出苗率、土壤温度及含水率等因素的影响不同,使得不同秸秆覆盖处理下大豆株高呈现不同的变化特征。由图 5 可以看出,4 种处理下大豆生育期内株高变化趋势大致相同,苗期和分枝期株高增长速率最快,此时期 CK 处理株高最大,但 T3 处理增速最快;开花期以后,各处理株高增速变缓,T3 处理株高最大,其次为 T2 处理。T1 处理株高在大豆整个生育期内都一直低于其他处理。不同秸秆覆盖方式对株高的影响效果依次为 T3 > T2 > CK > T1。

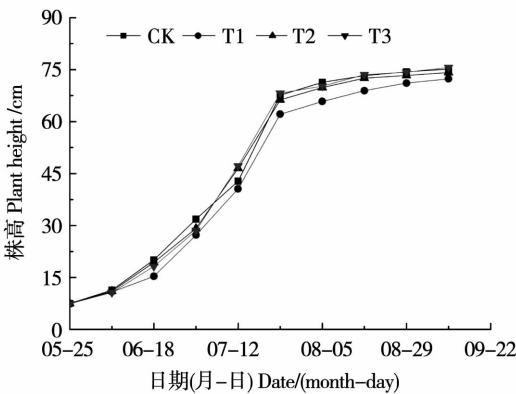


图 5 大豆株高变化曲线

Fig.5 The variation curve of soybean plant height

2.2.3 茎粗 大豆生育期茎粗变化曲线如图 6 所示,大豆茎粗在整个生育期内增速呈现由快至慢的增长规律。在苗期和分枝期大豆茎粗增长速率最快,而在开花期以后缓慢增长,增长趋势和株高很相似。苗期 CK 处理茎粗最大,在进入分枝期后,4 种处理茎粗随植株的生长迅速增大;开花期以后,

CK 茎粗增长变缓,而 T2 处理茎粗迅速增至最大,茎粗排序为 T2 > CK > T3 > T1。总之,T2 处理对大豆茎粗的影响效果好于 CK,T2 处理对茎粗的增长增粗有利,而 T1 处理对茎粗的增长最为不利。

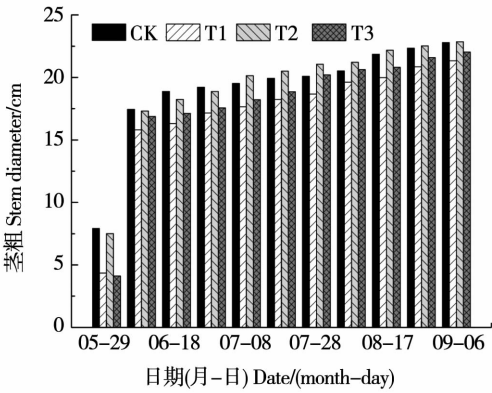


图 6 大豆生育期茎粗变化

Fig.6 The variation of stem diameter in soybean growth period

2.3 秸秆覆盖对大豆光合特性的影响

2.3.1 叶面积指数 如图 7 所示,不同秸秆覆盖处理下大豆生育期内的 LAI 整体上呈单峰曲线变化,均在结荚期达到最大值。在分枝期前,CK 处理 LAI 最大,但与其他几种处理相差不大;进入分枝期后,各处理间的 LAI 差距逐渐增大,到开花期后,大豆主要表现为营养器官的生长,所以各处理的 LAI 的增长在开花期至结荚期时变缓;T2 处理 LAI 在进入分枝期后迅速增长,在结荚期 LAI 达到生育期的最大值并超过 CK,结荚期至成熟期 LAI 呈现缓慢下降的趋势,T1 和 T3 处理 LAI 从苗期至成熟期均低于 CK 处理, T1 处理秸秆表面覆盖会导致土壤升温较慢,而 T3 处理秸秆还田至 10 ~ 20 cm 土层,不利于植株的出苗与生长,出苗质量差,直接影响大豆各生育期生长发育。

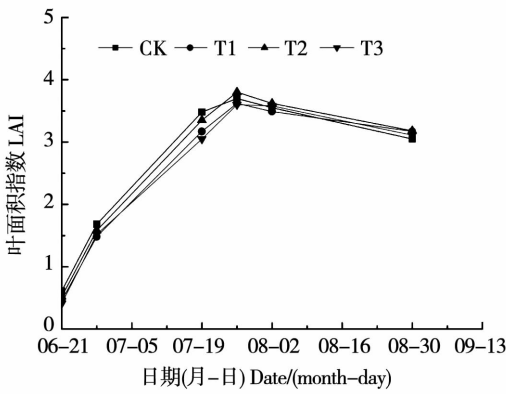


图 7 叶面积指数 (LAI) 变化曲线

Fig.7 The variation curve of leaf area index

2.3.2 光合势 大豆群体光合势是用来反映作物光合功能的潜势指标。在一定范围内,光合势越大,干物质积累量越多,越有利于产量的增加。从

表 2 看出,T2 处理光合势在苗期—开花期最大,CK 次之,T1 和 T3 处理最小;开花期—结荚期 T2 处理保持较高的光合势,原因是开花至结荚期是大豆营养生长与生殖生长并进的时期,是植株增长最快的时期,T3 光合势迅速增长;结荚期—鼓粒期,各处理光合势都得到大幅度提高,此期 T2 光合势最大,T3 次之,结荚期—鼓粒期主要为生殖生长,此期主要

为荚粒的生长,这种生育后期维持较高的光合势为大豆获得最终高产提供了保证。此外大量研究^[23-24]表明,鼓粒期保持较高的群体光合势有利于提高大豆产量。不同秸秆覆盖方式对大豆群体光合势的影响呈显著差异,其中在提高群体光合势上效果最好的为 T2,T3 次之,T1 效果最差。

表 2 大豆群体光合势

Table 2 The group photosynthetic potential of soybean

单位:m²·d

生育阶段 Growth stage	T1	T2	T3	CK
苗期—开花期 Seedling stage-Flowering stage	552766.55	607716.15	587934.25	597597.35
开花期—结荚期 Flowering stage-Podding stage	595067.80	667163.95	643211.35	614937.25
结荚期—鼓粒期 Podding stage-Seed filling stage	835717.95	925202.80	883992.00	848764.45

2.3.3 净同化率 净同化率是指植物光合作用的净效率,也叫净光合生产率,是测定田间光合效率的常用方法。T1、T2、T3 处理和 CK 大豆生育期内平均净同化率分别为 4.21、5.06、4.96 和 4.43 g·m⁻²·d⁻¹,以 T2 净同化率最高。由表 3 可知,T1、T2、T3 和 CK 处理在苗期至开花期的净同化率高于开花至结荚期,大豆净同化率在结荚至鼓粒期出现最大值,T2

净同化率最大,T1 最小,T1、T2、T3 和 CK 处理在结荚至鼓粒期的净同化率分别占生育期总净同化率的 46.99%、43.19%、42.47% 和 45.60%,此时期为干物质积累的关键期,必需满足作物生长所需的各种养分,否则会影响作物产量。总的来说,不同秸秆覆盖方式下的净同化率大小表现为 T2>T3>CK>T1。

表 3 大豆生育期的净同化率

Table 3 The net assimilation rate in soybean growth period

单位:g·m⁻²·d⁻¹

生育阶段 Growth stage	T1	T2	T3	CK
苗期—开花期 Seedling stage-Flowering stage	4.11	4.57	4.54	3.93
开花期—结荚期 Flowering stage-Podding stage	2.58	4.06	4.02	3.30
结荚期—鼓粒期 Podding stage-Seed filling stage	5.93	6.56	6.32	6.06

2.4 秸秆覆盖对大豆产量及其构成因素的影响 不同秸秆覆盖方式对大豆产量及其构成的影响详见表 4。T2 处理的百粒重和单株有效粒数最优,空秕荚率也为最低,T3 次之,T1 最差。T2 单株有效粒数较 T1、T3 和 CK 分别增加了 8.09%、2.20% 和 5.30%。由于不同秸秆覆盖方式对大豆

百粒重、单株粒数和单株荚粒数的影响不同,造成最终产量有较大差别,T2 产量较 T1、T3 和 CK 分别增加了 11.43%、5.02% 和 7.99%。可见不同秸秆覆盖方式影响单株有效粒数、空秕荚率,进而影响大豆的最终产量,对比发现 T2 处理为 4 种处理中的最优处理。

表 4 不同处理对大豆产量及其构成因素的影响

Table 4 The effects of different treatments on soybean yield and its composition

处理 Treatment	空秕荚率 Empty pods rate/%	百粒重 100-seed weight/g	株数 Plants number	单株有效粒数 Seeds number per plant	单株荚数 Pods number per plant	单产 Yield/(kg·hm ⁻²)
T1	11.77±0.31 ab	27.2±0.28 a	18	90.1±6.34 b	31±0.73 bc	4431.44±513.26 c
T2	9.86±0.24 b	28.5±0.23 a	18	97.4±6.83 a	39.4±1.23 a	4937.96±425.33 a
T3	10.46±0.52 ab	27.9±0.19 a	18	95.3±7.26 a	37.3±2.13 a	4702.09±393.12 ab
CK	13.72±0.41 a	27.4±0.35 a	18	92.5±8.21 ab	33.2±1.04 ab	4572.56±405.33 b

注:同列不同小写字母代表 0.05 水平差异显著(P<0.05)。
Note:Different lowercase in the same column indicate significant difference(P<0.05).

3 讨论

秸秆覆盖处理可有效阻碍温度的传递,即在气温上升期对土壤温度上升起阻碍作用,而在气温下降期可有效阻碍土壤温度的下降,这和付强等^[25]的研究一致。

不同的秸秆覆盖处理方式对作物的生长状况会产生一定影响。对于大豆的生长而言,播种初期无秸秆覆盖情况较秸秆覆盖处理更有利于大豆出苗,原因是秸秆覆盖不利于地表温度的上升,又抑制大豆出苗;同为秸秆覆盖处理情况下,0~10 cm 秸秆还田覆盖较秸秆表面覆盖及 10~20 cm 秸秆还田覆盖更有利于大豆出苗,原因是 0~10 cm 秸秆还田覆盖既能吸收一定热量又能在秸秆上储蓄一定水分,这和卢星航等^[19]的研究一致。受苗期长势影响,秸秆覆盖对大豆生育期株高及茎粗也会产生不同影响,0~10 cm 秸秆覆盖处理更利于大豆的株高及茎粗的生长。

秸秆覆盖会影响大豆的光合特性及产量构成,其中,叶面积指数是表征群体组成大小和植株生长繁茂程度的重要参数,大豆叶面积指数与产量之间存在着显著的相关性,一般在结荚期达到最大值,本研究中,0~10 cm 秸秆覆盖下叶面积指数相对较大,说明覆盖秸秆有利于延长大豆叶片的功能期,使叶片合成更多的营养物质来满足营养器官和生殖器官生长的需求,进而影响了大豆的产量构成,从而为大豆增产提供了生理基础。

本研究基于单年试验数据,体现出 2020 年在代表性黑土区—绥化市北林区不同秸秆覆盖模式下大豆的生长状况及产量,后续应针对年际变化及多点试验结合具体种植情况选择不同秸秆覆盖模式,并结合土壤养分等指标进行进一步研究。因此,长期定位试验及不同环境因素的多地点试验将作为下一步研究重点。

4 结论

通过 2020 年 5—10 月大豆田间试验,分析不同秸秆覆盖模式对大豆生长及产量构成的影响,得到以下结论:

(1)不同秸秆覆盖对土壤温度及含水率会产生一定影响。秸秆表面覆盖在苗期使土壤温度随外界温度变化较小,而在成熟期前后,土壤温度下降也相对较慢,说明秸秆具有一定的阻碍热量传递作用。各处理 0~30 cm 土层含水率与 0~10 cm 土层含水率差异较大,大豆生育前期秸秆表面覆盖含水率明显高于秸秆还田覆盖,不同秸秆覆盖方式对表层土壤含水率影响较大,均较 CK 处理更有利于土

壤含水率的提高。

(2)秸秆覆盖会影响播种初期的出苗率,而在播种 10 d 后秸秆表面覆盖处理出苗情况最好。4 种处理下大豆生育期内株高变化趋势大致相同,在苗期和分枝期株高增长速率最快,开花期以后,各处理株高增速变缓。不同秸秆覆盖方式对株高的影响效果依次为 T3 > T2 > CK > T1。T2 处理对大豆茎粗的影响效果好于 CK,此处理对茎粗的增长增粗有利,而 T1 对茎粗的增长最为不利,茎粗排序为 T2 > CK > T3 > T1。

(3)不同秸秆覆盖处理下大豆生育期内 LAI 整体上呈单峰曲线变化,均在结荚期达到最大值。不同秸秆覆盖方式对大豆群体光合势的影响呈显著差异,其中在提高群体光合势上效果最好的为 T2, T3 次之, T1 效果最差。

(4)秸秆还田覆盖处理下空秕荚率较低,其中 0~10 cm 秸秆还田覆盖最低,且 0~10 cm 秸秆还田覆盖单株有效粒数及百粒重均高于其他处理。由于不同秸秆覆盖模式对大豆百粒重、单株粒数和单株荚粒数的影响不同,造成最终产量有较大差别,对比发现 T2 处理为 4 种处理中的最优处理。

参考文献

- [1] HALLSTED A L, MATHEWS O R. Soil moisture and winter wheat with suggestions on abandonment [R]. Kansas: Bulletin No. 273, 1936.
- [2] TEBRUGGE F, DURING R A. Reducing tillage intensity-A review of results from a long-term study in Germany[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 53(1):15-28.
- [3] AUSTIN E E, WICKINGS K, MCDANIEL M D, et al. Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2017, 9(7):1252-1263.
- [4] 张万锋,杨树青,潘春洋,等. 优化井渠轮灌下秸秆覆盖对夏玉米根系分布与产量影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 25-33. (ZHANG W F, YANG S Q, PAN C Y, et al. Effects of straw mulching under optimized alternate irrigation of well-canal on root distribution and yield of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 51(1): 25-33.)
- [5] 常磊,韩凡香,柴雨葳,等. 秸秆带状覆盖对半干旱雨养区冬小麦耗水特征和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12):4150-4158. (CHANG L, HAN F X, CHAI Y W, et al. Effects of strip mulching on water consumption characteristics and yield of winter wheat in semi-arid rain-fed areas[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12):4150-4158.)
- [6] 温夏伟,谭红兵,黄锦忠,等. 黄土山地典型覆被类型对土壤水分运动的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9):170-175. (WEN X W, TAN H B, HUANG J Z, et al. Effects of typical cover types on soil water movement in the loess plateau [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9):

- 170-175.)
- [7] FAN J, GAO Y, WANG Q, et al. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138:10-16.
- [8] GOURANGA K, ASHWANI K. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in Eastern India [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 97(1-3):109-116.
- [9] SIDHU A S, SEKHON N K, THIND S S, et al. Soil temperature, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) as affected by wheat straw mulch[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2007, 53(1):95-102.
- [10] 柴守玺, 黄彩霞. 旱地冬小麦地膜覆盖的土壤温度效应综述 [C]//第十五次全国小麦栽培科学学术研讨会论文集. 北京: 中国作物协会, 2012:429-434. (CHAI S X, HUANG C X. Summary of soil temperature effect of plastic film mulching on dryland winter wheat [C]// Proceedings of the 15th National Symposium on wheat cultivation science. Beijing: China Crop Association, 2012:429-434.)
- [11] 付强, 李铁男, 李天霄, 等. 秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6):141-146. (FU Q, LI T N, LI T X, et al. Influence of straw mulching on soil moisture characteristics during seasonal freeze-thaw period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 46(6):141-146.)
- [12] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I. 不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应 [J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5):63-74. (CAI T Y, JIA Z K, HUANG Y W, et al. Research progress of comprehensive effect under different rates straw mulch on the rainfed farming areas, China I. Effect of different rates of straw mulch on farmland eco-environment[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(5):63-74.)
- [13] 余坤, 冯浩, 李正鹏, 等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10):116-123. (YU K, FENG H, LI Z P, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 45(10):116-123.)
- [14] INSELSBACHER E, NASHOLM T. A novel method to measure the effect of temperature on diffusion of plant-available nitrogen in soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1-2):251-257.
- [15] 谢云灿, 何孝磊, 杜鹏, 等. 外源油菜素内酯对高温胁迫下大豆光合特性及产量品质的影响[J]. *大豆科学*, 2017, 36(2):237-243. (XIE Y C, HE X L, DU P, et al. Effect of heat acclimation and EBR on photosynthesis characteristics in leaves of soybean flowering stage, yield and quality maturation stage [J]. *Soybean Science*, 2017, 36(2):41-43.)
- [16] 汪可欣, 付强, 姜辛, 等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12):181-186. (WANG K X, FU Q, JIANG X, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 45(12):181-186.)
- [17] 陆文龙, 赵标. 秸秆改良土壤对玉米生长发育特征的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(4):309-312. (LU W L, ZHAO B. Effect of soil straw amendment on corn development [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(4):309-312.)
- [18] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):37-42. (LI F, HAN X, MA X L, et al. Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4):37-42.)
- [19] 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. (LU X H, SHI H B, LI R P, et al. Effect of autumn irrigation after mulching on water-heat-salt and yield of following spring maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):148-154.)
- [20] 韦灵, 陈晓冰, 吴晗, 等. 秸秆覆盖对岩溶区稻田土壤优先路径特征的影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(29):11891-11900. (WEI L, CHEN X B, WU H, et al. Effect of straw mulching on characteristics of preferential flow paths of paddy soils in karst area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(29):11891-11900.)
- [21] 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. (SHI X S, LI F H, PUBU D J, et al. Effects of straw mulching on tillage soil temperature and growth of spring highland barley in high altitude cold region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 47(2):151-160.)
- [22] 刘爽, 张兴义. 保护性耕作对黑土农田土壤水热及作物产量的影响[J]. *大豆科学*, 2011, 30(1):56-61. (LIU S, ZHANG X Y. Effect of conservation tillage on soil temperature water content and yield in arable black soil [J]. *Soybean Science*, 2011, 30(1):56-61.)
- [23] 卢城, 宫青涛, 陶雨佳, 等. 盛花期高温对大豆结荚及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2021, 40(4):504-509, 516. (LU C, GONG Q T, TAO Y J, et al. Effects of high temperature at full flowering stage on podding and yield of soybean [J]. *Soybean Science*, 2021, 40(4):504-509, 516.)
- [24] 王乐政, 华方静, 曹鹏鹏, 等. 不同播期夏大豆的产量、光合特性和气象因子效应研究[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(5):750-757. (WANG L Z, HUA F J, CAO P P, et al. Effect of sowing date and climatic factor on yield and photosynthetic characteristics summer soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(5):750-757.)
- [25] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 覆盖物对冻融土壤热量空间分布与传递效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2):292-298. (FU Q, MA Z A, LI T X, et al. Influence of different covers on heat spatial distribution and transfer efficiency of freezing-thawing soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 49(2):292-298.)