

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.022

华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响

王庆杰 王宪良 李洪文 何进 张翼夫 黄幸媛

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:于2014—2016年在河北涿州保护性耕作试验田开展了设置6种不同秸秆覆盖还田量:5 t/hm²(全量还田,OM)、4 t/hm²(80%还田,EM)、3 t/hm²(60%还田,SM)、2 t/hm²(40%还田,FM)、1 t/hm²(20%还田,TM)及无秸秆覆盖地表(NM)的田间试验,分析了不同秸秆覆盖量对田间土壤含水率、冬小麦出苗率、叶面积指数(LAI)、根系生长及产量的影响。试验结果表明,秸秆覆盖量与土壤含水率之间呈线性关系,含水率随秸秆覆盖量增大而增大;冬小麦出苗率随秸秆覆盖量先增大后减小,FM处理出苗率最优,2014—2016年FM平均出苗率比TM、NM、SM、EM、OM分别大6.9%、10.0%、11.9%、23.8%、33.7%;2014—2016年冬小麦整个生长周期内,FM、TM、NM、SM、EM、OM处理平均LAI分别为5.3、4.5、3.6、4.0、3.3、3.0;2014—2016年FM、TM、NM、SM、EM、OM处理最大根长密度分别为0.98、0.95、0.93、0.93、0.86、0.67 cm/cm³;2014—2016年FM处理冬小麦平均产量分别比TM、NM、SM、EM、OM高2.94%、7.56%、7.91%、11.50%、13.53%。适量秸秆覆盖(2 t/hm²)能促进冬小麦生长,实现增产,秸秆覆盖量较大时应该增加播量并提高播种机防堵质量。

关键词:冬小麦;玉米秸秆覆盖;土壤含水率;出苗率;叶面积指数;产量

中图分类号: S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0192-07

Effect of Maize Straw Mulching on Winter Wheat Growth in Double Cropping Area of Northern China

WANG Qingjie WANG Xianliang LI Hongwen HE Jin ZHANG Yifu HUANG Xingyuan
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Straw mulching is one of the core techniques of conservation tillage, which can reduce soil erosion and improve soil water use efficiency. Some researchers believe that straw mulching is conducive to wheat growth, while some researchers repute that straw mulching could hinder winter wheat growth. In order to investigate the effect of maize straw mulching on winter wheat growth in North China region under double cropping area, a three-year (2014 to 2016) field experiment was carried out in Zhuozhou City, Hebei Province conservation tillage experiment land. The experiment was performed using randomized complete block design with three replications. A series of straw mulching were arranged in field experiment, including 5 t/hm² (OM), 4 t/hm² (EM), 3 t/hm² (SM), 2 t/hm² (FM), 1 t/hm² (TM) and 0 t/hm² (NM), which was controlled trials. The effect of maize straw mulching on soil volume water content, wheat emergence rate, wheat leaf area index, maize root dry weight and yield were evaluated. The results indicated that there was a linear relationship between maize straw mulching quantity and soil water content, the soil water content was increased with the increase of straw mulching amount. The emergence rate of wheat was increased with the increase of straw mulching amount, and FM treatment got the maximum emergence rate. The wheat emergence under FM treatment was significantly higher than those under TM, NM, SM, EM and OM treatments, and the average emergence rate under FM treatment was increased by 6.9%, 10.0%, 11.9%, 23.8% and 33.7%, respectively, compared with those under TM, NM, SM, EM and OM treatments during the period from 2014 to 2016. The mean wheat LAI under FM, TM, NM, SM, EM and OM treatments was 5.3, 4.5, 3.6, 4.0, 3.3 and 3.0, respectively, in the whole wheat growing season during the period from 2014 to 2016. The maximum mean wheat root

收稿日期:2016-12-28 修回日期:2017-02-08

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503136)

作者简介:王庆杰(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

通信作者:李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

density of wheat under FM, TM, NM, SM, EM and OM treatments was 0.98 cm/cm³, 0.95 cm/cm³, 0.93 cm/cm³, 0.93 cm/cm³, 0.86 cm/cm³ and 0.67 cm/cm³, respectively, during the period from 2014 to 2016. The mean yield of winter wheat under FM treatment was increased by 2.94%, 7.56%, 7.91%, 11.50% and 13.53%, respectively, compared with TM, NM, SM, EM and OM treatments during the period from 2014 to 2016. Finally, it was concluded that appropriate amount of straw mulching (2 t/hm²) could promote wheat growth and increase yield. The seeding rate should be increased and the qualities of no-tillage seeders should be improved, especially in anti-blocking device and sowing depth consistency. The research result can be helpful to the promotion of the technology of straw return in annual maize-wheat rotation cropping region of North China.

Key words: winter wheat; maize straw mulching; soil water content; emergence rate; leaf area index; yield

引言

秸秆覆盖是保护性耕作核心技术之一,该技术可减少地表径流,减轻土壤风蚀、水蚀,降低水分蒸发,提高水分利用效率^[1],对华北一年两熟区农田节水具有重要意义。

目前,针对华北一年两熟区玉米秸秆覆盖的研究主要集中在秸秆覆盖对土壤理化特性、土壤墒情、温室气体排放等方面的影响。陈军锋等^[2]研究了冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响,表明秸秆覆盖后显著抑制了冻融期土壤温度的变化幅度,秸秆覆盖厚度为 5 cm 时的储水保墒效果最佳。STAGNARI 等^[3]研究了保护性耕作条件下,秸秆覆盖对大麦生长及产量的影响,发现秸秆地表覆盖能够显著增加土壤有机质,改善土壤环境,且覆盖量为 1.5 t/hm² 对大麦产量的影响最大。张翼夫等^[4]研究了华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响,表明砂土和壤土条件下,30% (1 600 kg/hm²) 秸秆覆盖能够显著提高土壤入渗总量,减少产沙总量 (22.2% ~ 46.4%),对水土流失具有良好的防治效果。付强等^[5]研究了秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响,发现秸秆覆盖能有效平抑冻融期 0 ~ 60 cm 土壤液态含水率的变化幅度,有助于增加土壤墒情。

科研工作者已研发出一系列防堵效果较好的小麦免耕播种机^[6-7],为玉米秸秆覆盖地小麦免耕播种技术在华北一年两熟区的推广应用奠定了基础。但玉米秸秆覆盖对冬小麦出苗生长影响研究结论不一:部分学者指出,秸秆覆盖能够增加土壤水分,提高土壤有机质含量,改善土壤特性,提高小麦产量^[8-9];也有学者认为,秸秆覆盖引起土壤温度日较差减小,造成小麦根区温度较低,导致小麦根系发育滞后,影响小麦生长及产量^[10-11]。因此研究秸秆覆盖量对土壤水分及冬小麦生长的影响,对秸秆覆盖还田技术推广应用具有重要意义。

本文基于田间定位试验,秸秆覆盖量设置为 5、4、3、2、1 t/hm²,以及无秸秆覆盖 6 种措施,通过对比土壤含水率,冬小麦出苗率、叶面积指数、根系生长及产量,研究玉米秸秆覆盖量对土壤水分及冬小麦生长的影响,旨在为华北一年两熟区玉米秸秆还田技术实施提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置在中国农业大学农业部河北北部耕地保育科学观测实验站,于 2014 年 9 月—2016 年 7 月进行。实验站位于河北省保定市涿州东城坊镇(东经 115°44'、北纬 39°21',海拔高度 45 m),该地区属于典型暖温带半湿润大陆性季风气候,全年平均日照时数 2 560 h,2014—2016 年平均气温分别为 12.3、13.6、11.2℃,年降水量分别为 460、490、480 mm。土质为砂壤土,土壤 pH 值 7.8,有机质质量分数 1.5%。

1.2 试验设置

试验区为冬小麦-夏玉米一年两作制,2011 年实验站结合当地种植模式,开始施行保护性耕作。全年作业模式为:玉米联合收获—秸秆全量粉碎还田—冬小麦免耕施肥播种—喷除草剂—小麦联合收获—秸秆粉碎还田—玉米免耕施肥播种—喷药除草—玉米联合收获。

试验区使用 2BMSF-12/6 型小麦免耕播种机进行小麦播种,如图 1 所示。该播种机通过条带旋耕驱动防堵,实现秸秆覆盖少耕播种。播种时选用鲁垦麦 9 号种子,播种量 300 kg/hm²,平均行距 20 cm。施肥量为 N 284 kg/hm²,P₂O₅ 102 kg/hm²,K₂O 95 kg/hm²。

试验区每年玉米收获秸秆总量为 5 t/hm²,试验在保护性耕作模式基础上设置 5、4、3、2、1 t/hm² (编号为 OM、EM、SM、FM、TM) 的秸秆覆盖还田量,分别对应秸秆总量的 100%、80%、60%、40% 和 20%,



图1 田间小麦播种

Fig.1 Photo of field wheat sowing

以无秸秆覆盖(NM)为试验对照组。每个小区面积为 180 m^2 ($15 \text{ m} \times 12 \text{ m}$), 试验采用完全随机设计, 各处理进行3次重复。

10月初玉米收获后, 利用秸秆均匀抛撒机将玉米秸秆粉碎并抛撒覆盖于地表, 再使用条带旋耕式小麦少免耕播种机直接播种(图1)。

1.3 测试方法

1.3.1 土壤体积含水率

分别在播种期、乳熟期、成熟期3个冬小麦关键生育期, 用铁铲挖尺寸为 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 方形剖面, 使用环刀(高 5 cm 、直径 5 cm) 分别取 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 和 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 的土样, 每个剖面重复3次, 每个处理随机沿“S”型重复取3个点。将土壤样品带回实验室, 用干燥箱($105 \sim 110^\circ\text{C}$) 将土样干燥至质量恒定, 用精度 0.01 g 的天平测定土壤的质量并计算其质量含水率, 换算为体积含水率

$$\theta_v = \rho_b \theta_m \quad (1)$$

式中 θ_v ——土壤体积含水率, %

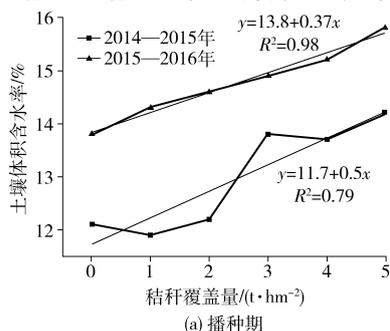
ρ_b ——土壤容重, g/cm^3

θ_m ——土壤质量含水率, %

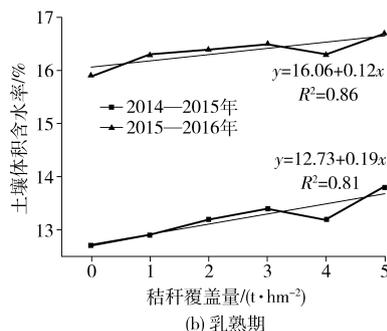
1.3.2 小麦生长指标

(1) 出苗率

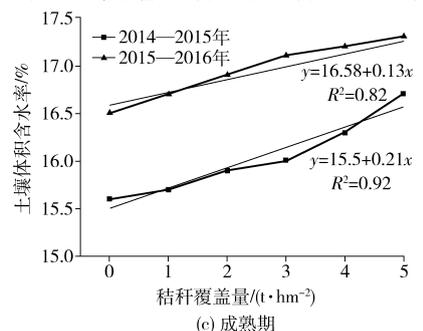
在每个试验小区的每种处理区域内随机选取3个测量点, 每个测量点以 1 m^2 为测量单位, 测定小麦出苗率。播种前测定所用冬小麦种子的千粒质量及播种机播种量, 并计算其出苗率



(a) 播种期



(b) 乳熟期



(c) 成熟期

图2 2014—2016年秸秆覆盖量对土壤含水率的影响

Fig.2 Effects of straw mulching amount on soil moisture content from 2014 to 2016

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_h}{1000 m_s n} B_z \times 100\% \quad (2)$$

式中 C_m ——小麦出苗率, %

m_h ——每行出苗数

n ——每平方米行数

m_s ——播种机 1 m 播种量

B_z ——小麦种子千粒质量

(2) 叶面积指数

利用便携式 SunScan 植物冠层分析系统(英国 Delta-T 公司)测量冬小麦叶面积指数(LAI)。分别在小麦越冬期、拔节期、开花灌浆期、成熟期, 每个处理随机选取3个点, 在每个测试点利用 SunScan 植物冠层分析系统进行 LAI 测量。

(3) 根系生长

在小麦成熟期的种植行利用 Bi-partite 型根钻系统测量小麦根长密度。用根钻取整株冬小麦根系, 钻取根系时按 10 cm 的间距向下分层钻取, 测至 100 cm 深度, 将取得的根系用蒸馏水洗净, 利用 AZR-100 型根系生态监测系统扫描、分析, 计算根长密度。

1.3.3 产量

小麦成熟后, 进行考种与计产, 每个处理按照“S”型随机取5个点, 每个点将 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 范围内的小麦全部取回, 进行考种测产。

1.4 数据分析

运用 Excel 2003 和 IBM SPSS Statistics 20.0 对数据进行统计分析, 利用 Origin 9.1 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对土壤体积含水率的影响

土壤水是作物吸收水分的主要来源, 是保证作物生长发育的关键, 是获得作物高产的基础。各秸秆覆盖量处理下, 2014—2015 年和 2015—2016 年冬小麦生长期 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层体积含水率如图2所示。2014—2016 年冬小麦播种期、乳熟期及成熟期

土壤体积含水率总体上随着秸秆覆盖量增加而增大。2014—2015 年, 整个冬小麦生长周期内 OM、EM、SM、FM、TM 及 NM 处理条件下, 平均土壤含水率分别为 14.6%、14.1%、14.0%、13.6%、13.4%、13.3%; 2015—2016 年, 整个冬小麦生长周期内 OM、EM、SM、FM、TM 及 NM 处理条件下, 平均土壤含水率分别为 16.5%、16.2%、16.1%、15.9%、15.6%、15.4%。

对土壤体积含水率曲线拟合及回归分析可得, 不同年份的冬小麦生长周期土壤体积含水率随秸秆覆盖量变化的线性拟合模型 R^2 均在 0.75 以上, 拟合程度较高; 方差分析结果显示相应 p 值均小于 0.05, 说明秸秆覆盖对土壤体积含水率具有显著影响; 由不同年份各个关键生育期内的拟合方程系数对比可知, 土壤体积含水率较低的年份系数较大, 表明秸秆覆盖量对于干旱年份的土壤体积含水率的提高作用较明显。

2.2 秸秆覆盖对冬小麦植株生长的影响

2.2.1 出苗率

图 3 为 2014—2016 年秸秆覆盖量对冬小麦出苗率的影响情况。由图 3 可知, 2015—2016 年冬小麦出苗率高于 2014—2015 年冬小麦出苗率, 随着秸秆覆盖量逐渐增大, 2 个季度的冬小麦出苗率均出现先增大后减小的趋势, 且 2014—2016 年出苗率数据显示, 秸秆覆盖量为 2 t/hm^2 (FM) 时冬小麦出苗率最大, 2014—2015 年、2015—2016 年最大出苗率分别为 94.3%、95.7%。

2.2.2 冬小麦叶面积指数

叶面积指数 (LAI) 反映作物生长状况及生产力水平, 对比农作物 LAI 及动态变化状况, 对作物长势及产量预估具有重要意义^[12]。图 4 为 2014—2016 年, 不同秸秆覆盖量对小麦不同关键生育期叶面积指数的影响。由图 4 可知, 每种处理条件下, 冬小麦生长期叶面积指数均呈现先增大后减小的趋势, 从越冬期到拔节期 LAI 实现快速增长, 到开花灌浆期达到最大值, 之后在成熟期缓慢下降。2014—

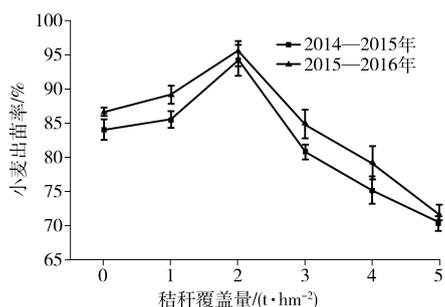


图 3 2014—2016 年秸秆覆盖量对冬小麦出苗率的影响
Fig. 3 Effect of straw mulching amount on winter wheat emergence rate from 2014 to 2016

2016 年在不同冬小麦关键生育期内, 各处理间冬小麦 LAI 由大到小表现为: FM、TM、SM、NM、EM、OM, 且在拔节期、灌浆期、成熟期内 FM 处理 LAI 均显著大于其他秸秆覆盖量处理。

2.2.3 冬小麦根系生长

根系是小麦获取水分和养分的重要器官, 根系的生长状况直接影响作物的生长发育及产量^[13]。图 5 为 2014—2016 年秸秆覆盖量对冬小麦根长密度的影响。由图 5 可知, 2014—2016 年 FM 处理小麦根长密度明显大于 TM、NM、SM、EM 和 OM 处理, 变化趋势由大到小为: FM、TM、NM、SM、EM、OM。各处理的根长密度均在 10 cm 左右达到最大值, 2014—2015 年 FM、TM、NM、SM、EM、OM 处理最大根长密度分别为 0.98、0.97、0.95、0.93、0.84、0.65 cm/cm^3 ; 2015—2016 年最大根长密度分别为 0.99、0.95、0.93、0.88、0.80、0.69 cm/cm^3 。

2.3 秸秆覆盖对产量的影响

由图 6 可知, 随着秸秆覆盖量增加, 2014—2015 年及 2015—2016 年冬小麦产量出现先增加后减小的变化趋势, 当秸秆覆盖量为 2 t/hm^2 时冬小麦产量最大, 2014—2016 年 FM 处理小麦平均产量分别比 TM、NM、SM、EM、OM 高 2.94%、7.56%、7.91%、11.50%、13.53%。2014—2015 年 SM 处理比 NM 处理产量高 1.3%, 而 2015—2016 年 SM 处理比 NM 处理产量低 2.0%。

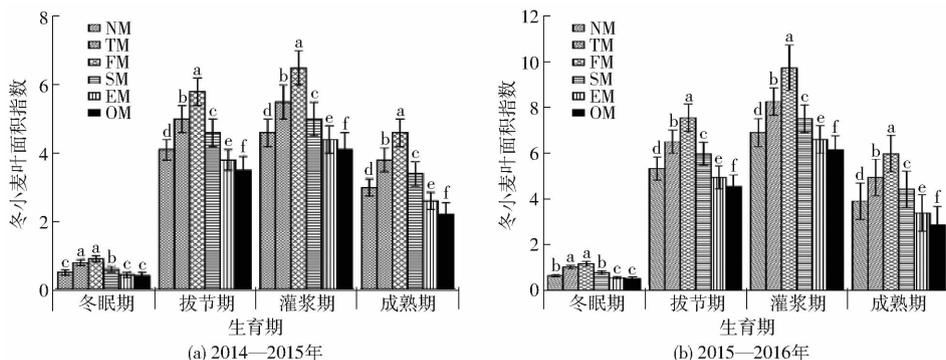


图 4 秸秆覆盖量对冬小麦生育期叶面积指数的影响

Fig. 4 Effects of straw mulching amount on winter wheat leaf area index

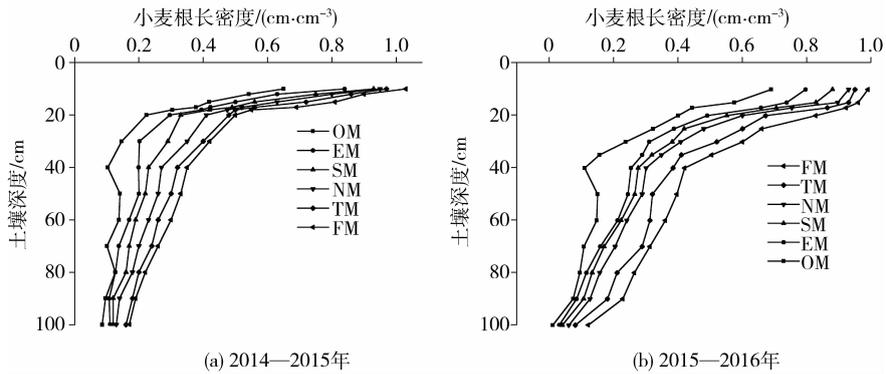


图5 秸秆覆盖量对冬小麦根长密度的影响

Fig. 5 Effects of straw mulching amount on winter wheat root length density

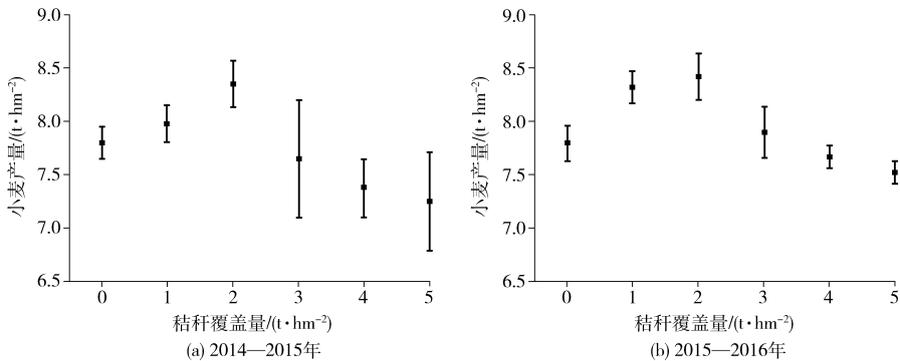


图6 秸秆覆盖量对冬小麦产量的影响

Fig. 6 Effects of straw mulching amount on winter wheat yield

3 讨论

3.1 秸秆覆盖量对土壤含水率的影响

本文研究结果显示,秸秆覆盖能够增加土壤含水率,两者呈正相关,线性拟合程度较高,主要原因可能是秸秆覆盖能够显著增加土壤入渗率,减少土壤水蚀^[14],且秸秆覆盖能够有效减少土壤水分蒸发^[15-16]。大量研究还表明,秸秆覆盖能够增加土壤有机质含量,改善土壤团粒特性,增加土壤空隙,减少土壤板结现象,改善土壤理化特性和持水特性^[4,17-18]。对冬小麦不同生育期拟合方程进行对比,还发现秸秆覆盖量对土壤保墒作用与土壤自身含水率有关,主要因为前期土壤含水率较高时,与前期土壤含水率较低条件相比,土壤入渗率降低,土壤水蚀增大^[19],不利于土壤水分保持。

3.2 秸秆覆盖量对冬小麦生长的影响

3.2.1 秸秆覆盖对出苗率及 LAI 的影响

秸秆覆盖方式及秸秆覆盖量均会影响冬小麦出苗率和冬小麦苗后生长状况^[20-21],本文研究表明,2014—2016年 NM、TM、FM、SM、EM、OM 处理冬小麦出苗率分别为 86.4%、88.9%、95.0%、84.9%、76.7%、71.1%,出苗率随秸秆覆盖量的增大呈单峰变化趋势。覆盖量 0~2 t/hm²时,覆盖量越大,出苗率越高,这是因为秸秆覆盖量较少,不仅不能阻碍冬

小麦突破秸秆层,并且因为秸秆覆盖改善土壤水热特性促进冬小麦出苗,这与陈素英等^[16]、沈学善等^[22]的研究结果一致。而当覆盖量大于 3 t/hm²时,出苗率减小。该结果与赵丽等^[23]的研究结果一致,可能是因为秸秆覆盖量过大时,导致小麦发芽后难以突破秸秆层,导致麦苗接收不到阳光,造成黄苗、死苗现象^[21]。但是沈学善等^[22]研究发现,玉米秸秆还田可通过改善耕层土壤理化性状提高冬小麦出苗质量,这可能是因为由于降水等气候原因或者播种机播量播深等问题导致冬小麦出苗受秸秆覆盖影响较小。

另外部分研究表明^[24-27],免耕播种机的种床准备、排种流畅性及防堵性能等质量问题也是影响冬小麦出苗率的重要原因。王宁等^[28]研究表明,玉米秸秆半量覆盖还田处理小麦叶面积指数显著高于全量还田和未还田处理,玉米秸秆还田能提高小麦 LAI。本研究表明随着秸秆覆盖量增加,冬小麦 LAI 先增大后减小,冬小麦 LAI 在 FM 处理时达到最大值,LAI 增大的主要原因可能是覆盖的秸秆腐解过程改善了土壤理化性状,促进小麦生长发育^[29]。

3.2.2 秸秆覆盖对冬小麦根系的影响

本研究结果显示,2014—2015年 FM、TM、NM、SM、EM、OM 处理最大根长密度分别为 0.98、0.97、0.95、0.93、0.84、0.65 cm/cm³;2015—2016年最大

根长密度分别为 0.99、0.95、0.93、0.88、0.80、0.69 cm/cm³, 在不同秸秆覆盖量条件下, 随秸秆覆盖率增加根系密度增大, 其主要原因是秸秆还田能够促进冬小麦次生根发生, 提高根系活力, 同时秸秆覆盖增大土壤含水率, 对深层根系具有延缓衰老的作用^[30], 但随着秸秆覆盖率增加的同时会出现根系密度减小的趋势, 主要因为大量秸秆覆盖会严重影响冬小麦出苗率及冬小麦生长, 且大量秸秆使土壤湿度较大, 土壤容易受外力影响而发生紧实现象, 此外大量秸秆覆盖还会因农机具轮胎滑移率增加而压实土壤, 这些是根长密度减小的诱因^[31]。

3.3 秸秆覆盖量对冬小麦产量的影响

小麦产量变化是众多因素综合影响的结果, 高亚军等^[32]通过大量分析得出秸秆大量覆盖导致作物减产的机理, 主要包括秸秆覆盖降低地温、导致病虫害发生、影响水热交换等。本文结果显示, 2014—2016 年 FM 处理冬小麦产量分别比 TM、NM、SM、EM、OM 高 2.94%、7.56%、7.91%、11.50%、13.53%, 主要因为少量秸秆覆盖能够增加土壤水

分, 改善土壤环境, 提高作物出苗率, 促进冬小麦生长及根系发育, 引起冬小麦增产, 而过量秸秆覆盖主要通过影响冬小麦出苗, 导致减产。2014—2015 年 SM 处理比 NM 处理产量高 1.3%, 而 2015—2016 年 SM 处理比 NM 处理产量低 2.0%, 产生这种变化可能主要由于 2015—2016 年降水较 2014—2015 年多所致。

4 结论

(1) 秸秆覆盖能够显著增加 0~20 cm 土壤含水率, 且土壤含水率与秸秆覆盖量之间呈线性相关性。秸秆覆盖量对土壤含水率增加作用与前期土壤含水率有关系, 秸秆覆盖对干旱土壤保墒作用较明显。

(2) 玉米秸秆覆盖量对冬小麦出苗率及后期生长影响呈单峰值变化, 呈现先增加后降低的趋势。

(3) 在华北一年两熟区, 玉米秸秆覆盖条件下少免耕播种冬小麦, 玉米秸秆还田量应适宜, 不宜过小或过大, 秸秆覆盖量 2 t/hm² 较佳。

参 考 文 献

- 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 62-67. HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 62-67. (in Chinese)
- 陈军锋, 郑秀清, 秦作栋, 等. 冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 102-110. CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, QIN Zuodong, et al. Effects of maize straw mulch on spatiotemporal variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 102-110. (in Chinese)
- STAGNARI F, GALIENI A, SPECA S, et al. Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to conservation agriculture in Mediterranean environment[J]. Field Crops Research, 2014, 167: 51-63.
- 张翼夫, 王庆杰, 胡红, 等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 138-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160519&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.019. ZHANG Yifu, WANG Qingjie, HU Hong, et al. Effect of maize straw mulching on water and soil conservation in sandy soil and loam soil of North China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 138-145. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 141-146. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150620&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.020.
- FU Qiang, LI Tienan, LI Tianxiao, et al. Influence of straw mulching on soil moisture characteristics during seasonal freeze-thaw period[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 141-146. (in Chinese)
- 李洪文, 姚宗路, 高焕文, 等. 小麦免耕播种机开沟器对作物生长的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 120-124. LI Hongwen, YAO Zonglu, GAO Huanwen, et al. Effect of three furrow openers for no-till wheat seeder on crop growth performance[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 120-124. (in Chinese)
- 张学敏, 姚宗路, 王晓燕, 等. 小麦免耕播种机种肥分施机构的改进与应用效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 120-124. ZHANG Xuemin, YAO Zonglu, WANG Xiaoyan, et al. Improvement and experiment on the device for separate application of fertilizer and seed for no-till wheat drill[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 120-124. (in Chinese)
- 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131-135. LIU Yiguo, LIU Yonghong, LIU Hongjun, et al. Effects of straw returning amount on soil physical and chemical properties and yield of wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(3): 131-135. (in Chinese)
- 杨荣光, 毕建杰, 王升国, 等. 秸秆覆盖对麦田土壤含水量及小麦生长状况的影响[J]. 山东农业科学, 2009(2): 43-44. YANG Rongguang, BI Jianjie, WANG Shengguo, et al. The effect of straw mulch on soil moisture and wheat growth[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009(2): 43-44. (in Chinese)
- 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 519-525. CHEN Suying, ZHANG Xiying, SUN Hongyong, et al. Cause and mechanism of winter wheat yield reduction under straw mulch in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 519-525. (in Chinese)
- 董文旭, 陈素英, 胡春胜, 等. 少免耕模式对冬小麦生长发育及产量性状的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 141-144. DONG Wenxu, CHEN Suying, HU Chunsheng, et al. The effect of minimum tillage and no-tillage on growth and yield of winter

- wheat[J]. *Acta Agriculture Boreali-sinica*,2007,22(2): 141-144. (in Chinese)
- 12 刘轲,周清波,吴文斌,等. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 155-162.
LIU Ke,ZHOU Qingbo,WU Wenbin,et al. Comparison between multispectral and hyperspectral remote sensing for LAI estimation [J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(3): 155-162. (in Chinese)
- 13 刘立杰,黄明,何伟娜. 耕作方式对冬小麦根系特性的影响[J]. *农业科技通讯*, 2012(12): 42-44, 170.
- 14 ZHANG Y, LI H, He J, et al. Effect of mulching with maize straw on water infiltration and soil loss at different initial soil moistures in a rainfall simulation [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2016, 3(2): 161-170.
- 15 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 Suying,ZHANG Xiying,PEI Dong,et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005,21(10): 171-173. (in Chinese)
- 16 CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, 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*,2007, 150(3): 261-268.
- 17 马晓丽,贾志宽,肖恩时,等. 渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 59-64.
MA Xiaoli,JIA Zhikuan,XIAO Enshi,et al. Effects of wheat-residue application on soil water and water use efficiency in the Weibei Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010,28(5): 59-64. (in Chinese)
- 18 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.
CAI Taiyi,JIA Zhikuan,HUANG Yaowei,et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011,27(Supp.1): 238-243. (in Chinese)
- 19 刘柳松,任红艳,史学正,等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2010,26(1): 108-112.
LIU Liusong,REN Hongyan,SHI Xuezheng,et al. Effect of straw mulching on sediment yielding process of soil with different initial water contents[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(1): 108-112. (in Chinese)
- 20 陈素英,张喜英,孙宏勇,等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 519-525.
CHEN Suying,ZHANG Xiying,SUN Hongyong,et al. Cause and mechanism of winter wheat yield reduction under straw mulch in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 519-525. (in Chinese)
- 21 张萍,王宁宁. 秸秆覆盖量对小麦出苗及生长的影响[J]. *中国集体经济*, 2009(21): 185-186.
- 22 沈学善,屈会娟,李金才,等. 小麦玉米秸秆全量还田对冬小麦出苗和光合生产的影响[J]. *西南农业学报*, 2012,25(3): 847-851.
SHEN Xueshan,QU Huijuan,LI Jincai,et al. Effects of wheat and maize straw returned to field on emergence and production of photosynthesis of winter wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2012,25(3): 847-851. (in Chinese)
- 23 赵丽,赵秋霞,张晋国. 玉米秸秆覆盖对小麦出苗率的影响[J]. *农机化研究*, 2007(8): 116-117.
ZHAO Li,ZHAO Qiuxia,ZHANG Jinguo. Affection of straw covering on the wheat seeding rate [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2007(8): 116-117. (in Chinese)
- 24 姚宗路,李洪文,高焕文,等. 一年两熟区玉米覆盖地小麦免耕播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2007,38(8): 57-61.
YAO Zonglu,LI Hongwen,GAO Huanwen,et al. Experiment on no-till wheat planter under the bestrow of the maize stubble in double cropping area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(8): 57-61. (in Chinese)
- 25 张喜瑞,李洪文,仪坤秀,等. 主动圆盘防堵式小麦免耕播种机的设计研究[J]. *农机化研究*, 2009(7): 53-55.
ZHANG Xirui,LI Hongwen,YI Kunxiu,et al. Experiment and design on disk cutter with power type of wheat no-till planter[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2009(7): 53-55. (in Chinese)
- 26 李太伟,李洪文,何进. 2BMF-5 固定垄小麦免耕播种机的设计[J]. *农机化研究*, 2008(10): 50-53.
LI Taiwei,LI Hongwen,HE Jin. Design of 2BMF-5 type no-till wheat planter in ridge-field [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2008(10): 50-53. (in Chinese)
- 27 刘立晶,杨学军,李长荣,等. 2BMG-24 型小麦免耕播种机设计[J]. *农业机械学报*, 2009,40(10): 39-43.
LIU Lijing,YANG Xuejun,LI Zhangrong,et al. Design of 2BMG-24 no-till wheat planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(10): 39-43. (in Chinese)
- 28 王宁,闫洪奎,王君,等. 不同量秸秆还田对玉米生长发育及产量影响的研究[J]. *玉米科学*, 2007(5): 100-103.
WANG Ning,YAN Hongkui,WANG Jun,et al. Research on effects of different amount straws return to field on growth development and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007(5): 100-103. (in Chinese)
- 29 杜兵,邓健,李问盈,等. 冬小麦保护性耕作法与传统耕作法的田间对比试验[J]. *中国农业大学学报*, 2000,5(2): 55-58.
DU Bing,DENG Jian,LI Wenying,et al. Field experiments for comparison of winter wheat conservation tillage and conventional tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000,5(2): 55-58. (in Chinese)
- 30 张素瑜,王和洲,杨明达,等. 水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(13): 2484-2496.
ZHANG Suyu,WANG Hezhou,YANG Mingda,et al. Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2016,49(13): 2484-2496. (in Chinese)
- 31 王宪良,王庆杰,李洪文,等. 农业机械土壤压实研究方法现状[J]. *热带农业科学*, 2015,35(6): 72-76.
WANG Xianliang,WANG Qingjie,LI Hongwen,et al. Current research status of soil compaction by agricultural machinery[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*,2015,35(6): 72-76. (in Chinese)
- 32 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 Yajun,LI Shengxiu. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005,21(7): 15-19. (in Chinese)