

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036

秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响

刘继龙¹ 李佳文¹ 周延¹ 付强¹ 张玲玲² 刘璐¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 通过分析不同秸秆覆盖量以及耕作方式对 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤孔隙度、土壤持水性、土壤供水能力以及土壤水分有效性的影响, 揭示黑土区秸秆覆盖、耕作方式对土壤水分特性的影响机制。结果表明: 土壤持水性、土壤供水能力及土壤水分有效性与土壤孔隙度密切相关。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层的土壤总孔隙度、毛管孔隙度、相同土壤水吸力下土壤含水率、比水容量以及有效水含量, 在传统耕作条件下, 秸秆覆盖均高于无覆盖; 在秸秆覆盖条件下, 免耕均高于传统耕作。免耕秸秆覆盖处理影响土壤孔隙度、土壤持水性、土壤供水能力及土壤水分有效性, 随秸秆覆盖量增加, 土壤总孔隙度、毛管孔隙度、相同土壤水吸力下土壤含水率、比水容量以及有效水含量逐渐增大, 随土层加深, 各处理土壤孔隙度、土壤持水性及土壤供水能力逐渐减小。本研究区最适宜的秸秆覆盖与耕作方式为免耕 150% 秸秆覆盖处理。

关键词: 秸秆覆盖; 耕作方式; 土壤孔隙度; 土壤持水性; 土壤供水能力; 土壤水分有效性

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0333-07

Effects of Straw Mulching and Tillage on Soil Water Characteristics

LIU Jilong¹ LI Jiawen¹ ZHOU Yan¹ FU Qiang¹ ZHANG Lingling² LIU Lu¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: By analyzing the effects of different straw mulching amounts and tillage methods on the soil porosity, soil water retention property, soil water supply capacity and soil water effectiveness in 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm soil layers, the mechanism of straw mulching and tillage methods on soil water characteristics in black soil region was revealed. The result showed that soil water retention property, soil water supply capacity and soil water effectiveness were closely related to soil porosity. Under conventional tillage treatment, the soil total porosity, soil capillary porosity, soil water content under the same soil water suction, specific water capacity and available water content under straw mulching treatment were higher than those under bare soil in 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm soil layers. Under straw mulching treatment, the soil total porosity, soil capillary porosity, soil water content under the same soil water suction, specific water capacity and available water content under no-tillage treatment were higher than those under conventional tillage treatment in 0~20 cm, 20~40 cm and 40~60 cm soil layers. No-tillage with straw mulching treatment affected soil porosity, soil water retention property, soil water supply capacity and soil water effectiveness. Under no-tillage treatment, soil total porosity, soil capillary porosity, soil water content under the same soil water suction, specific water capacity and available water content were increased with the increase of straw mulching. Soil porosity, soil water retention property and soil water supply capacity were decreased gradually with soil depth. The most suitable straw mulching and tillage method in the study area was no-tillage with 150% straw mulching.

Key words: straw mulching; tillage methods; soil porosity; soil water retention property; soil water supply capacity; soil water effectiveness

收稿日期: 2019-05-12 修回日期: 2019-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409046)、黑龙江省自然科学基金项目(E2018005、E2016005)、东北农业大学学术骨干项目(16XG12)、黑龙江省博士后科研启动金项目(LBH-Q16023)、东北农业大学青年才俊项目(17QC25)和黑龙江省博士后经费项目(LBH-Z17009)

作者简介: 刘继龙(1981—),男,副教授,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: liujilong1981@163.com

通信作者: 周延(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业水资源管理与利用研究,E-mail: zhouyan_neau@126.com

0 引言

土壤水分特性通常指土壤持水性、土壤供水能力及土壤水分有效性,土壤孔隙状况影响土壤水分特征曲线,土壤水分特征曲线则决定土壤水分特性^[1-2]。研究表明,秸秆还田及耕作方式的改变,可以改善土壤结构,从而影响土壤水分特性。如免耕秸秆集中深还田分解有机质后,改变土壤结构及水分在土壤中的运动特性,在水分不易通过的粘土试验田,有利于提高土壤孔隙度及持水能力,可以使水分沿着大孔隙更多地进入土壤,供作物更好地吸收利用^[3]。将秸秆粉碎后加入土壤,能有效改善土壤结构,迅速增大土壤持水能力^[4]。免耕能有效改善土壤结构,增大耕层土壤孔隙,增强持水能力^[5-8],秸秆覆盖还田能提高土壤孔隙度,显著改善土壤持水性^[9-11],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^[12-17]。相同土壤水吸力下,土壤中加入作物秸秆使水分特性显著增强^[1];粉碎氮化秸秆还田条件下,随秸秆分解,土壤结构连通性逐渐得到改善,使土壤持水特性显著增强^[17];免耕条件下,随秸秆覆盖量增加,土壤持水性能增强,土壤有效水含量增加^[18];覆盖物为枯落物时,土壤孔隙度增加,红壤坡地土壤持水及供水能力有效提高^[13];与草甸土、白浆土、碱土、褐土相比,黑土土壤结构疏松适宜,耕层土壤有效持水量较高^[19];降雨后,土壤总孔隙度及非毛管孔隙度下降,毛管孔隙度增多,重力水减少,有效水增加^[20]。不同秸秆还田方式、耕作方式、覆盖量、覆盖物等对土壤水分特性都有影响,随着秸秆覆盖的推广和应用,深入研究不同秸秆覆盖及耕作方式对土壤水分特性的影响机制具有重要意义。

东北黑土区是我国重要商品粮基地,受自然因素和人为因素影响,土壤退化严重,使土壤结构和土壤蓄水保墒能力等土壤性质不断恶化。研究解决该区土壤退化问题、提高土壤蓄水保墒等能力是保证该区土壤资源高效、可持续利用而亟需解决的关键问题。适宜的秸秆覆盖及耕作方式是改善土壤结构和提高土壤蓄水保墒等能力的有效途径,目前,关于黑土区秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性影响的研究较少。因此,本文以黑土区农田为研究对象,在利用 van-Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线基础上,分析不同秸秆覆盖量及耕作方式对 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤孔隙度、土壤持水性、土壤供水能力及土壤水分有效性的影响,深入探索秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响机制,为东北黑土区适宜秸秆覆盖和耕作方式的构建、

以及土壤水分的高效利用提供理论依据与指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区为东北农业大学向阳试验基地(45°45'37"N,126°54'30"E),该基地位于黑龙江省哈尔滨市香坊区向阳乡,属中温带大陆性气候,气候干燥寒冷,年平均降雨量 500~600 mm。试验设置 5 个处理,分别为传统耕作(CK)、免耕 50% 秸秆覆盖(NM0.5)、免耕 100% 秸秆覆盖(NM1)、免耕 150% 秸秆覆盖(NM1.5)以及传统耕作 100% 秸秆覆盖(CM1)。NM0.5、NM1、NM1.5 处理秋收后去茬并移走秸秆,次年春季免耕播种后将秸秆粉碎均匀覆盖地表,粉碎后秸秆长 12 cm 左右,覆盖量根据面积比例分别为前一年小区收获秸秆的 50%、100%、150%。CK 与 CM1 秋收后去茬并移走秸秆,次年旋地、起垄播种,其中 CM1 将秸秆粉碎后均匀覆盖地表,覆盖量为前一年小区收获秸秆的 100%。每个处理重复 3 次,共计 15 个小区,每个小区面积为 36 m²(6 m×6 m),试验于 2018 年 5 月 2 日播种,9 月 25 日收获,各处理施肥方案相同,播种时施用三宁复合肥 414 kg/hm²(N、P₂O₅、K₂O 质量分数分别为 14%、16%、15%),施肥量参考当地常规施肥标准,7 月 2 日追施尿素 251 kg/hm²,试验地种植作物为玉米,供试玉米品种为“中玉 9 号”。

1.2 测定项目与分析方法

玉米成熟期后采集土壤样品,在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层采集田间小区原状土,用来测定土壤容重及土壤水分特征曲线。土壤容重、毛管孔隙度采用环刀法测定。

土壤总孔隙度及非毛管孔隙度计算式为^[21]

$$f = (1 - \rho_b / \rho_s) \times 100\% \quad (1)$$

$$f_a = f - f_b \quad (2)$$

式中 ρ_b ——土壤容重, g/cm³

ρ_s ——土壤比重,取 2.65 g/cm³

f ——土壤总孔隙度, %

f_b ——土壤毛管孔隙度, %

f_a ——土壤非毛管孔隙度, %

土壤水分特征曲线采用离心机法进行测定, van-Genuchten 模型进行拟合,即

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中 $\theta(h)$ ——土壤含水率, cm³/cm³

h ——土壤水吸力, kPa

θ_s ——饱和土壤含水率, cm³/cm³

θ_r ——残余土壤含水率, cm^3/cm^3

α ——进气吸力的倒数, kPa^{-1}

n ——形状系数

比水容量计算式为

$$C(h) = -\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) m n \alpha | \alpha h |^{n-1}}{(1 + | \alpha h |^n)^{m+1}} \quad (4)$$

1.3 数据分析

采用 Excel 计算不同处理各土层土壤孔隙度、土壤水分特征曲线、土壤比水容量以及土壤水分常数, Origin 9.0 绘图, SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖与耕作方式对土壤孔隙度的影响

不同处理各土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度以及非毛管孔隙度如图 1 (图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同) 所示。与 CK 相比,

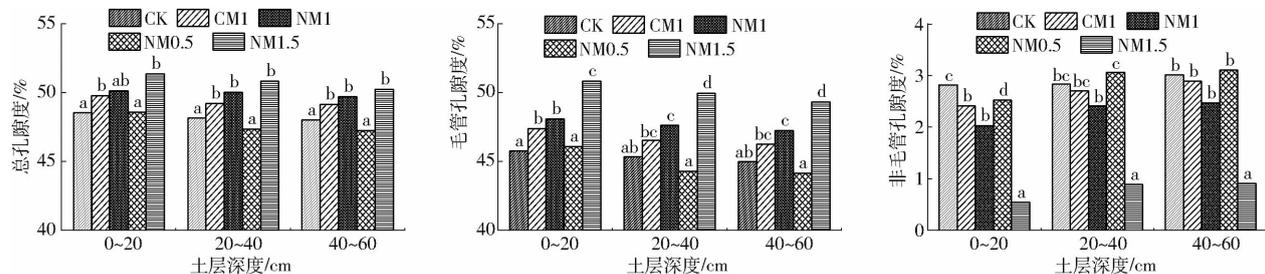


图 1 不同处理各土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度

Fig. 1 Total porosity, capillary porosity and non-capillary porosity of soil in different soil layers under different treatments

0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层 NM1 较 CM1 土壤总孔隙度分别增加 0.69%、1.63%、1.17%；土壤毛管孔隙度分别增加 1.52%、2.34%、2.16%；土壤非毛管孔隙度减少 15.58%、10.60%、14.74%。100% 秸秆覆盖条件下, 免耕较传统耕作相比改善土壤孔隙度, 是由于免耕对土壤的扰动减少, 降低土壤容重, 使土壤总孔隙度、毛管孔隙度增加。与 CK 相比, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 CM1 处理土壤总孔隙度分别显著增加 2.56%、2.23%、2.43%；CM1 处理 0~20 cm 土层土壤毛管孔隙度显著增加 3.60%, 非毛管孔隙度显著减少 14.36%。传统耕作条件下, 100% 秸秆覆盖增加各土层土壤总孔隙度及毛管孔隙度, 减少土壤非毛管孔隙度, 秸秆覆盖能有效改善土壤孔隙度, 主要是秸秆被腐蚀分解使土壤有机质含量增加, 减少了地表裸露, 缓解外界环境对土壤结构的影响, 增加土壤孔隙度^[24]。随土层加深各处理土壤总孔隙度及毛管孔隙度逐渐减小, 这与武均等^[12]、吕雯等^[24]研究结果一致, 由于秸秆随土层加深分解作用减弱, 土壤自身沉降, 导致土壤总孔隙度及毛管孔隙度减小。

NM0.5、NM1、NM1.5 处理 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度均随秸秆覆盖量增加逐渐增加, 非毛管孔隙度逐渐降低; 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NM1.5 土壤总孔隙度显著增加 5.87%、5.59%、4.71%；0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NM1.5 土壤毛管孔隙度显著增加 11.19%、10.21%、9.66%；NM0.5 处理 20~40 cm、40~60 cm 土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度减少, 非毛管孔隙度增加。NM1.5 与 NM0.5、NM1 相比 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤毛管孔隙度差异显著。免耕秸秆覆盖改善土壤孔隙度状况^[22-23], 且随秸秆覆盖量增加各土层土壤总孔隙度及毛管孔隙度均逐渐增加, 非毛管孔隙度逐渐减少。免耕 50% 秸秆覆盖与 CK 相比, 深层土壤总孔隙度及毛管孔隙度有所减少, 但差异不显著, 可能由于秸秆分解的有机质含量随秸秆覆盖量减少逐渐减少, 且随土层加深逐渐减少。

2.2 秸秆覆盖与耕作方式对土壤持水性的影响

根据图 2 中 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤水分特征曲线呈现的变化趋势, 分为低吸力段 (0~150 kPa) 和中高吸力段 (大于 150 kPa)^[25], 低吸力段在相同水吸力下, 各处理 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤含水率差别较小, 高吸力段时不同土层各处理土壤含水率随土壤水吸力变化规律明显, 各处理间曲线趋于平缓且相对平行, 这主要是因为高吸力段土壤水分主要保留在土壤毛管孔隙, 不同处理下 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤持水性变化规律与土壤毛管孔隙度变化规律一致。

0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NM0.5、NM1、NM1.5 土壤持水性随秸秆覆盖量增加而增强, 与各土层毛管孔隙度随秸秆覆盖量变化趋势一致。免耕条件下, NM0.5 与 NM1、NM1.5 相比对 20~40 cm 及 40~60 cm 土层土壤持水性影响减弱; NM1.5 与 NM0.5、NM1 相比有效抑制土壤水分蒸发, 且对 0~20 cm 土层的影响最明显。传统耕作条件下, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 CM1 土

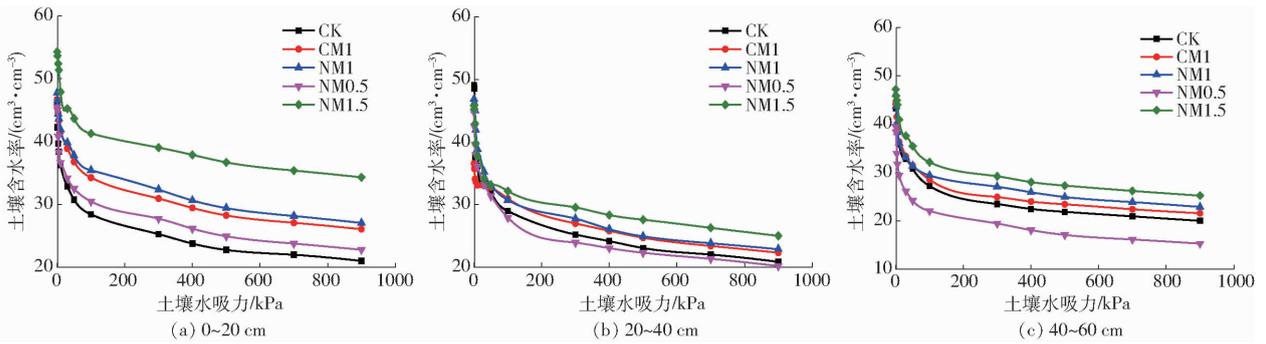


图2 0~60 cm 土层各处理土壤水分特征曲线

Fig.2 Soil moisture characteristic curves in 0~60 cm soil layers for each treatment

壤持水性均高于 CK, 秸秆覆盖增加了土壤毛细孔隙度, 增大土壤水库容, 从而增强了土壤持水性。秸秆覆盖条件下, NM1 与 CM1 相比 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层土壤持水性均增强, 秸秆覆盖条件下免耕处理较传统耕作处理增强土壤持水性。随土层加深各处理土壤持水性减弱, 主要由于随土层加深土壤毛细孔隙度减小。免耕秸秆覆盖土壤持水性强于传统耕作秸秆覆盖, 主要由于免耕和秸秆覆盖共同作用, 免耕减少对土壤扰动, 且秸秆的集雨效果显著, 能有效减少土壤水分无效蒸发^[26]。

2.3 秸秆覆盖与耕作方式对土壤供水能力的影响

通常土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量可很好地衡量土壤的供水能力^[26], 图 3 为各处理不同土层土壤比水容量。各处理间 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层土壤供水能力均与土壤持水性变化趋势一致。相同土壤水吸力下, 0~20 cm 土层土壤比水容量由大到小依次为 NM1.5、NM1、CM1、NM0.5、CK 处理, 20~40 cm 及 40~60 cm 土壤比水容量由大到小则依次为 NM1.5、NM1、CM1、CK、NM0.5 处理。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NM0.5、NM1、NM1.5 土壤比水容量均随秸秆覆盖量增加而增加; 传统耕作条件下, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 CM1 土壤比水容量较 CK 相比分别高 11.86%、9.03%、9.24%, 秸秆覆盖增强了土壤供水能力, 这与李航等^[25]研究一致; 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤比水容量 NM1 较 CM1 分别高 2.58%、17.78%、3.94%, 秸秆覆盖条件下, 免耕较传统耕作相比增强土壤供水能力。

2.4 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分有效性的影响

根据被植物吸收利用的难易程度, 土壤水可分为重力水、全有效水、速效水、迟效水^[1]。由表 1 可知, 与 CK 相比, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NM0.5、NM1、NM1.5 处理土壤水分常数基本呈线性变化, 各土层重力水含量均随秸秆覆盖量增加而减少, 即由大到小为 NM0.5、NM1、NM1.5 处理;

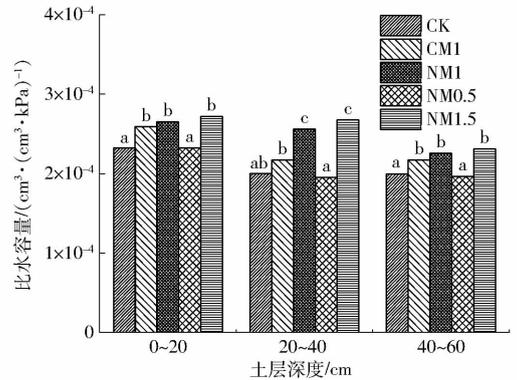


图3 不同处理各土层的比水容量

Fig.3 Specific water capacity of soil suction in each layer

全有效水、速效水、迟效水含量随秸秆覆盖量增加而增加, 即由大到小为 NM1.5、NM1、NM0.5 处理。NM1.5 较 CK 显著增加 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤全有效水、速效水及迟效水含量, 且与 NM0.5、NM1 相比差异显著。

表1 不同处理各土层土壤水分常数

Tab.1 Soil moisture constant of different soil layers under different treatments

土层深度/cm	处理	重力水含量/有效水含量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)			易利用水比例系数	
		全有效水	速效水	迟效水		
0~20	CK	12.83 ^c	17.03 ^a	11.50 ^a	5.53 ^b	0.252 ^{ab}
	CM1	12.61 ^c	18.09 ^b	12.22 ^c	5.88 ^c	0.257 ^a
	NM1	8.90 ^a	18.54 ^b	12.55 ^d	6.00 ^d	0.280 ^b
	NM0.5	11.37 ^b	17.02 ^a	11.96 ^b	5.06 ^a	0.263 ^{ab}
	NM1.5	8.63 ^a	25.47 ^c	15.98 ^e	9.49 ^e	0.294 ^b
20~40	CK	15.73 ^c	13.05 ^a	11.33 ^a	2.02 ^a	0.236 ^a
	CM1	15.29 ^c	13.85 ^b	11.55 ^a	2.29 ^b	0.239 ^a
	NM1	11.54 ^b	16.05 ^d	12.37 ^b	3.69 ^c	0.264 ^b
	NM0.5	11.55 ^b	15.24 ^c	11.63 ^a	3.61 ^c	0.260 ^b
	NM1.5	9.47 ^a	16.83 ^c	12.72 ^c	4.11 ^d	0.278 ^c
40~60	CK	14.42 ^c	13.25 ^b	11.49 ^b	1.76 ^b	0.243 ^a
	CM1	14.14 ^c	13.42 ^b	11.57 ^b	1.84 ^b	0.245 ^a
	NM1	13.08 ^b	15.07 ^c	11.58 ^b	3.49 ^c	0.251 ^{ab}
	NM0.5	13.35 ^b	10.09 ^a	9.16 ^a	0.93 ^a	0.232 ^a
	NM1.5	10.60 ^a	17.52 ^d	12.81 ^c	4.71 ^d	0.271 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

秸秆覆盖条件下, 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm

土层 NM1 较 CM1 土壤重力水含量分别减少 29.42%、24.53%、8.91%；全有效水含量分别增加 2.49%、15.88%、12.30%；速效水含量分别增加 2.70%、7.10%、0.86%；迟效水含量分别增加 2.29%、57.64%、89.67%。传统耕作条件下,CM1 较 CK 相比 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层重力水含量分别减少 1.71%、2.80%、19.42%；全有效水含量分别增加 6.23%、3.71%、1.10%；速效水含量分别增加 6.24%、2.01%、0.73%；迟效水含量分别增加 6.21%、13.21%、2.25%。

易利用水比例系数可用来表征土壤保水性,其值为速效水含量与饱和含水率之比^[1]。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层的土壤易利用水比例系数,NM0.5、NM1、NM1.5 处理均随秸秆覆盖量增加而增加;传统耕作条件下,CM1 与 CK 相比分别增加 2.15%、1.57%、0.82%,但差异不显著;秸秆覆盖条件下,NM1 较 CM1 分别增加 9.06%、10.29%、2.93%。传统耕作秸秆覆盖有效水含量与易利用水比例系数均高于无覆盖,秸秆覆盖增强作物对土壤水的吸收利用能力。免耕秸秆覆盖土壤水分常数除重力水均高于传统耕作秸秆覆盖,说明在秸秆覆盖条件下,免耕处理能增强作物对土壤水分吸收利用能力。重力水存在大孔隙中,不易被植物吸收利用,秸秆覆盖量增加,除重力水含量逐渐减少外,其他土壤水分常数均逐渐增加,免耕条件下秸秆覆盖量为 150% 时,作物对土壤水分的吸收利用最佳。

2.5 综合评价分析

矩阵法是环境影响综合评价的基本方法,本文将各试验处理作为矩阵中的各项开发活动,将土壤孔隙度、土壤持水性、土壤供水能力以及土壤水分有效性作为受影响的各环境因子,共同组成环境影响矩阵,建立各处理与土壤水分特性间的直接因果关系,通过优劣排序值来表示不同处理对土壤水分特性产生的影响^[27]。本文应用矩阵法对土壤水分特性进行综合评价,毛管孔隙度与土壤水分特性密切相关,因此仅对毛管孔隙度进行评分;比水容量反映土壤供水能力,值越大得分越高;土壤持水性、土壤水分有效性分别以相同水吸力下土壤含水率、有效水含量进行评分。最终以综合得分对不同处理进行评价,结果如表 2 所示,NM1.5 处理综合得分最高,明显优于其他处理,NM1.5 处理毛管孔隙度最大,土壤持水性、供水能力最强,土壤有效水含量最高,有利于作物吸收利用。

3 讨论

土壤水分是影响研究区作物生长的一个重要因

表 2 不同处理土壤水分特性矩阵

Tab.2 Matrix of soil moisture characteristics under different treatments

影响因子	CK	CM1	NM1	NM0.5	NM1.5
毛管孔隙度	5	9	12	4	15
土壤持水性	5	9	12	4	15
比水容量	5	9	12	4	15
土壤水分有效性	5	8	12	5	15
综合得分	20	35	48	17	60

素,如何提高土壤蓄水保墒能力是研究区亟需解决的一个关键问题,本文通过分析秸秆覆盖与耕作方式对黑土区土壤水分特性的影响机制,提出了研究区适宜秸秆覆盖量与耕作方式,为提高土壤蓄水保墒能力以及作物产量等提供了依据。除此之外,秸秆覆盖与耕作方式对土壤养分、土壤温度和土壤微生物等也都具有明显影响,这进而都会影响作物的生长发育,开展这一方面的研究更有利于提出研究区适宜秸秆覆盖量与耕作方式,提高作物产量,保证土壤资源高效可持续利用。后续研究中应进一步开展秸秆覆盖与耕作方式对土壤各个方面以及作物的综合影响。年限、降雨、地形等外界因素以及有机质分解、作物根系生长状况等都会影响土壤孔隙度进而影响土壤水分特性,后续试验中可在此试验基础上进一步考虑外界条件(降水等)、土壤养分、土壤通气性及作物根系对土壤水分特性的影响。

4 结论

(1)传统耕作条件下,0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层秸秆覆盖处理较无覆盖处理增大了土壤总孔隙度及毛管孔隙度,减小了非毛管孔隙度;秸秆覆盖条件下,免耕较传统耕作方式增大了各土层土壤总孔隙度及毛管孔隙度,减小了非毛管孔隙度。免耕 150% 秸秆覆盖 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤总孔隙度显著增加 5.87%、5.59% 和 4.71%,土壤毛管孔隙度显著增加 11.19%、10.21% 和 9.66%。

(2)土壤孔隙度是决定土壤水分特性的关键因素,各处理不同土层相同土壤水吸力下土壤含水率、土壤比水容量及土壤有效水含量均与毛管孔隙度的变化趋势一致。免耕处理和秸秆覆盖处理均增强土壤水分特性,免耕秸秆覆盖相结合对土壤水分特性的影响更为显著。免耕秸秆覆盖下,土壤持水性、土壤供水能力、土壤水分有效性随覆盖量增加而逐渐增强。

(3)矩阵法综合评价分析表明,免耕 150% 秸秆覆盖处理最优,能有效改善土壤孔隙度,有利于土壤水分蓄积及作物对土壤水分的高效利用,是研究区最适宜的秸秆覆盖与耕作方式。

参 考 文 献

- [1] 仵峰, 张凯, 宰松梅, 等. 小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 101-105.
WU Feng, ZHANG Kai, ZAI Songmei, et al. Impact of mixed straw on soil hydraulic properties[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 101-105. (in Chinese)
- [2] HWANG S I, POWERS S E. Estimating unique soil hydraulic parameters for sandy media from multi-step out flow experiments [J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(4): 445-456.
- [3] 王胜楠, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 秸秆集中深还田对土壤水分特性及有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 154-158.
WANG Shengnan, ZOU Hongtao, ZHANG Yulong, et al. Effect of straw deep returning on the soil water features and soil organic carbon components[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 154-158. (in Chinese)
- [4] 王珍. 秸秆不同还田方式对土壤水分特性及土壤结构的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
WANG Zhen. Effect of different straw-incorporation methods on soil water characteristics and soil structure[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [5] DA VEIGA M, HORN R, REINERT D J. Soil compressibility and penetrability of an oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 104-113.
- [6] KUSHWAHA C P, TRIPATHI S K, SINGH K P. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 16: 229-241.
- [7] HUANG G B, CHAI Q, FENG F, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(8): 1286-1296.
- [8] ZHOU H, LI B G, LU Y Z. Micromorphological analysis of soil structure under no tillage management in the black soil zone of northeast China[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(2): 173-180.
- [9] SCSAL M C, ANDRIULO A E, TABOADA M A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 9-18.
- [10] YAN Q Y, DONG F, LOU G, et al. Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dryland farming[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(11): 2558-2569.
- [11] 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.
- [12] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 112-117.
WU Jun, CAI Liqun, LUO Zhuzhu, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties of rain-fed field of the Loess Plateau in central of Gansu[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 112-117. (in Chinese)
- [13] 聂小飞, 郑海金, 左继超, 等. 枯落物覆盖对红壤坡地土壤水分特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 85-89, 95.
NIE Xiaofei, ZHENG Haijin, ZUO Jichao, et al. Effects of litter mulch on soil water properties in red soil sloping-land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 85-89, 95. (in Chinese)
- [14] 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?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 王增丽. 秸秆不同处理还田方式对土壤理化特性和作物生长效应的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
WANG Zengli. Effect of different straw incorporation manners on soil physical and chemical properties and crop growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [18] 张宝林, 陈阜. 晋西旱塬地覆盖耕作农田土壤水分有效性研究[J]. 华北农学报, 2005, 20(3): 57-61.
ZHANG Baolin, CHEN Fu. Availability of soil water under mulch tillage in Jinxi Highland[J]. Acta Agriculturae Boreali-

- Sinica, 2005, 20(3): 57–61. (in Chinese)
- [19] 王秋菊, 焦峰, 刘峰, 等. 东北主要类型旱田土壤持水特性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 23–29.
WANG Qiuju, JIAO Feng, LIU Feng, et al. Study on the water retention characteristics of the main types of soil in northeast China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(6): 23–29. (in Chinese)
- [20] 陈浩. 鄂东南红壤水分特性及入渗性能的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
CHEN Hao. Study on the water characteristics and the infiltration capacity of red-soil in the southeast of Hubei Province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [21] 陈学文, 张小平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 114–120.
CHEN Xuewen, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al. Tillage effects on soil pore size distribution and soil moisture in northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 114–120. (in Chinese)
- [22] 侯贤清, 李荣. 免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 112–119.
HOU Xianqing, LI Rong. Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of southern Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 112–119. (in Chinese)
- [23] 鲁天平, 史征, 刘永萍, 等. 深沟造林条件下秸秆覆盖对土壤养分和盐分变化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 165–172.
LU Tianping, SHI Zheng, LIU Yongping, et al. Effect of straw mulching on soil nutrient and salinity changes under condition of deep trench planting[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 165–172. (in Chinese)
- [24] 吕雯, 孙兆军, 陈小莉, 等. 地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土水盐特性提高油葵产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 125–133.
LÜ Wen, SUN Zhaojun, CHEN Xiaoli, et al. Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of takyrsolonetzs and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 125–133. (in Chinese)
- [25] 李航, 严方晨, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3889–3898.
LI Hang, YAN Fangchen, JIAO Juying, et al. Soil water availability and holding capacity of different vegetation types in hilly-gullied region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3889–3898. (in Chinese)
- [26] 滕云, 张忠学, 司振江, 等. 振动深松耕作对不同类型土壤水分特征曲线影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 52–58.
TENG Yun, ZHANG Zhongxue, SI Zhenjiang, et al. Impact of vibration-tillage of subsoils on their water retention curves[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 52–58. (in Chinese)
- [27] 甘露, 范海燕, 吴文勇, 等. 无土栽培基质水分特性参数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 113–118, 142.
GAN Lu, FAN Haiyan, WU Wenyong, et al. Water retention parameters of soilless-culture substrates[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 113–118, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.021. (in Chinese)