

# 玉米大豆长期轮作对土壤物理特性与水热特征的影响

郭金瑞<sup>1</sup>, 宋振伟<sup>2</sup>, 高洪军<sup>1</sup>, 闫孝贡<sup>1</sup>, 朱 平<sup>1</sup>, 任 军<sup>1</sup>

(1. 吉林省农业科学院 资源与环境研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国农业科学院 作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:**合理耕层能够提高土壤应对气候变化的缓冲能力,有利于协调土壤中水、肥、气、热的关系,为作物生长发育创造适宜的水热环境。借助长期定位试验,开展了玉米连作、玉米-大豆轮作以及大豆连作等不同处理下的土壤物理性状与土壤水热特征评价。土壤采样分析与田间水热定位观测发现,玉米连作处理与玉米-大豆轮作和大豆连作处理相比,可显著降低土壤容重,增加土壤总孔隙度( $P<0.05$ ),其中0~10 cm 土壤层次下土壤容重分别降低 12.9% 和 19.8%,10~20 cm 层次分别低 21.4% 和 23.2%,20~40 cm 层次分别降低 23.9% 和 29.2%,40~60 cm 层次则分别降低 20.3% 和 25.2%;玉米连作处理可显著提高5~6月份土壤水分储量,特别是0~40 cm 土层下,玉米连作处理分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理高 6.5% 和 6.3%、3.6% 和 3.4%,且差异显著,而玉米连作处理下较高的土壤水分含量有利于促进作物前期生长和后期群体质量改善;从0~30 cm 土壤温度来看,不同处理间全生育期无显著差异。上述结果表明,长期玉米连作配合合理施肥可显著改善土壤结构,增加土壤水分储量,促进作物前期生长发育。

**关键词:**物理特性;土壤水分;温度;种植模式  
**中图分类号:**S157.1;S565.1      **文献标识码:**A      **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.02.0226

## Effects of Long Term Rotation of Maize and Soybean on Soil Physical Properties and Water and Heat Characteristics

GUO Jin-rui<sup>1</sup>, SONG Zhen-wei<sup>2</sup>, GAO Hong-jun<sup>1</sup>, YAN Xiao-gong<sup>1</sup>, ZHU Ping<sup>1</sup>, REN Jun<sup>1</sup>

(1. Institute of Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Reasonable tillage can improve the buffer capacity of soil to deal with climate change, and it's helpful to coordinate the relationship of water, fertilizer, gas and heat in soil, and create suitable hydrothermal treatments. The soil physical properties and soil water and heat properties were evaluated under different treatments, such as corn continuous cropping, maize-soybean rotation and soybean continuous cropping, with the aim of providing theoretical basis and technical support for the sustainable use of black soil in Northeast China. The results of soil samples analysis and water-heat localized observation showed that CMC treatment significantly decreased soil bulk density but increased soil porosity compared to MSR and CSC treatments ( $P<0.05$ ), where the decreased rates in soil bulk density of 0-10 cm soil were 12.9% and 19.8%, also 21.4% and 23.2% for 10-20 cm, 23.9% and 29.2% for 20-30 cm, 20.3% and 25.2% for 30-40 cm, respectively. CMC treatment significantly increased soil water storage in May and June compared to the MSR and CSC environment for crop growth and development, especially for 0-10 cm soil layer with increased rates of 6.5% and 6.3%, 3.6% and 3.4%, respectively. The relative high soil water storage was benefit for the growth at early stage and population quality improvement at later stages in CMC treatment. Soil temperatures of 0-30 cm didn't significantly differ between cropping regimes in the whole growing stage. The above findings showed that the long-term corn continuous cropping with reasonable fertilization can significantly improve the soil structure, increase soil water reserves, and promote the growth and development of crops.

**Keywords:** Physical characteristics; Soil moisture; Temperature; Cropping pattern

近几十年来受全球气候变化影响,东北地区的水热条件发生了显著改变,主要表现为最低温度、最高温度和平均温度呈现出每10年增加0.31、0.42和0.23℃的趋势,热量条件的改善总体上对粮食生产有利<sup>[1-4]</sup>。但与气候变暖相伴的春季低温冷害、季节性干旱等气候变率同样增加,加大了东北地区粮食生产的不确定性<sup>[5-8]</sup>。构建合理耕层,有利于协调土壤中水、肥、气、热的关系,提高土壤应对气候变化的缓冲能力,为作物生长发育创造适宜的水热环境,保证作物持续高产、稳产<sup>[9-12]</sup>。

土壤物理特性受土壤类型、土壤质地、耕作方式以及种植模式等多种因素的影响<sup>[13-15]</sup>。耕作方式对土壤水热动态也存在影响,东北地区春季进行耕作起垄,增大了土壤与空气的接触面积,造成土

收稿日期:2016-12-09  
基金项目:国家自然科学基金(31671642)。  
第一作者简介:郭金瑞(1975-),男,博士,副研究员,主要从事黑土生态方面研究。E-mail: gir88@163.com。  
通讯作者:朱平(1962-),男,博士,研究员,主要从事黑土肥力研究。E-mail: zhuping1962@sohu.com;  
任军(1960-),男,博士,研究员,主要从事土壤培肥研究。E-mail: renjun557@163.com。

壤透气性提高,散墒快,底墒蒸发过多,短期干旱加重;而春季不进行耕作起垄,采取平地直接播种,虽然可提高保墒能力,但可能丧失起垄的增温效应,影响玉米生长发育<sup>[16]</sup>。春季农田条件有利于土壤水分保持,对作物生长具有重要作用<sup>[17]</sup>。此外,有机质的施用对构建合理耕层,提高土壤蓄水增温能力也存在一定影响<sup>[18]</sup>。前人对土壤水热动态变化特征方面进行了大量研究,但作物连作与轮作条件下,由于不同作物对土壤质地存在影响,且作物的需水规律不同,造成了不同种植模式下土壤水热差异的相关研究鲜有报道。为此,本研究借助吉林公主岭长期种植模式定位试验,开展了施用有机质条件下,玉米连作、玉米-大豆轮作以及大豆连作等不同处理下的土壤物理性状与土壤水热特征评价研究,旨在为东北黑土可持续利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在吉林省公主岭市吉林省农业科学院公主岭试验站(N43°30'23",E124°48'34",海拔 220 m)进行。长期定位试验开始于 1990 年,共设 3 个种植模式处理,即玉米连作模式(CMC)、大豆连作模式(CSC)和玉米-大豆轮作模式(MSR)。

土壤类型为淡黑钙土,成土母质为第四纪黄体状沉积物,地势平坦。试验地所在区域属寒温带大陆性季风气候,年平均气温 5~6℃,无霜期 110~140 d,年日照时数 2 500~2 700 h,有效积温 2 600~3 000℃,年降水量 450~600 mm,其中 4~9 月份降水量占全年总量的 80% 以上,每年 12 月至第 2 年 3 月份为土壤冻结期,冻土层厚可达 1.5 m 左右。试验地属于一年一季雨养农区,种植作物以玉米为主。定位试验开始前测定的耕层(0~20 cm)土壤理化性状如下:有机碳 13.5 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.6 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.9 g·kg<sup>-1</sup>,有效氮 114.0 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 27.0 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 190.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH7.6。

1.2 测定项目、方法

1.2.1 土壤样品采集 于 2011 年 10 月作物收获后,在每个大区随机选取 3 个 3 m×3 m 的样方作为重复,每个样方内随机取 3 个点,利用土壤圆环采样器采集 0~60 cm 深度土壤,取样层次包括 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 共 4 个层次,采用烘干法测定土壤容重。土壤总孔隙度采用如下公式计算:

土壤总孔隙度 = 100 × (1 - 土壤容重/2.65)

1.2.2 土壤含水量测定 每个小区在玉米或大豆

行内株间埋设铝制测管 1 根,利用 CNC100(北京超能科技公司)中子水分测定仪测定 20~120 cm 土层土壤含水量,每 20 cm 为 1 个测定层次。为避免中子水分测定仪在表层土壤含水量测定中存在的误差<sup>[19]</sup>,0~20 cm 土壤含水量采用 Hydrosense 土壤水分仪进行测定。土壤水分测定时间为 2011 年 5~9 月每个月的 15 日左右。

1.2.3 土壤温度测定 采用 ZDR-41 型温度记录仪(杭州泽大仪器有限公司)监测 5,10,15 和 30 cm 层次的土壤温度。该仪器采用加拿大进口感温探头,传感器线长 3 m,集成的内存可存储约 7 400 组数据,满足试验期间的数据存储要求。监测土壤温度前,对温度探头进行校正,确保温度变幅为 ±0.1℃<sup>[20]</sup>。数据采集和记录时间间隔分别为 2 s 和 30 min,获得的数据用于计算逐日最低、最高与平均温度值,并折算为逐月土壤温度值。土壤温度测定时间为 2011 年 5~9 月。

1.3 数据分析

试验中所获得的数据采用 Excel 2003 和 SPSS 12.0 等统计分析软件进行数据处理与统计分析,显著性检验采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性状

由表 1 可以看出玉米连作、玉米-大豆轮作以及大豆连作等 3 种处理下,土壤容重均随土层增加而呈增加的趋势,其中 40~60 cm 土层的土壤容重比表层 0~10 cm 分别增加 21.8%、29.8% 和 27.2%。而同层次不同处理间的土壤容重表现为玉米连作<玉米-大豆轮作<大豆连作。0~10 cm 层次下玉米连作处理分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理低 12.9% 和 19.8%,且处理间差异显著(P<0.05);10~60 cm 土层表现为玉米连作处理的土壤容重显著低于玉米-大豆轮作和大豆连作处理。其中 10~20 cm 分别低 21.4% 和 23.2%;20~40 cm 土层玉米连作分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理低 23.9% 和 29.2%;40~60 cm 土层玉米连作则分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理低 20.3% 和 25.2%。

不同处理下的土壤总空隙度变化与土壤容重的变化趋势相反(表 2),即随着土壤深度增加呈降低的趋势,不同处理间则表现为玉米连作>玉米-大豆轮作>大豆连作。其中 0~10 cm 土层,3 个处理间差异显著,而 10~60 cm 土层则以玉米连作显著高于玉米-大豆轮作和大豆连作处理。

表1 不同种植模式下0~60 cm 层次土壤容重变化  
Table 1 Soil bulk density at 0–60 cm soil depth under different planting cropping regimes (g·cm<sup>-3</sup>)

土壤深度 Soil depth /cm	玉米连作 CMC	玉米-大豆轮作 MSR	大豆连作 CSC
0~10	1.01±0.04 c	1.14±0.02 b	1.21±0.04 a
10~20	1.12±0.01 b	1.36±0.06 a	1.40±0.10 a
20~40	1.13±0.04 b	1.40±0.02 a	1.46±0.04 a
40~60	1.23±0.13 b	1.48±0.03 a	1.54±0.11 a

同行不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
Different lowercase in the same line means significant difference at  $P<0.05$  level. The same below.

表2 不同种植模式下0~60 cm 层次土壤总孔隙度变化  
Table 2 Soil total porosity at 0–60 cm soil depth under different planting cropping regimes (%)

土壤深度 Soil depth /cm	玉米连作 CMC	玉米-大豆轮作 MSR	大豆连作 CSC
0~10	62.0±2.8 a	56.9±0.7 b	54.2±1.1 c
10~20	57.8±0.5 a	48.6±2.1 b	47.2±3.9 b
20~40	57.4±1.7 a	47.3±0.7 b	44.9±1.4 b
40~60	54.3±5.1 a	44.2±1.0 b	41.7±4.0 b

2.2 土壤水分变化

由图1可以看出,不同处理下的土壤储水量在不同月份间的变化幅度随着土壤层次的加深而趋于缓和。0~40 cm 土层的土壤储水量在5月和8月明显高于其它月份,表明浅层土壤受作物需水和自然降水的影响较大。从不同处理间的土壤储水量变化来看,5~6月表现为玉米连作处理高于大豆连作处理,玉米-大豆轮作处理居中,这可能与玉米连作处理下土壤容重较低,在春季有利于积蓄水分有关;而7~9月则表现为大豆连作处理高于玉米连作处理的趋势,这可能与大豆耗水量少,同时地表植株覆盖度高以致土壤蒸发量低有关。从0~40 cm 土层储水量来看,5~6月玉米连作处理分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理高6.5%和6.3%、3.6%和3.4%,且差异显著;而7~8月,大豆连作处理则分别比玉米连作和玉米-大豆轮作高0.5%和1.9%、0.4%和2.0%。从0~120 cm 土层储水量来看,5~6月玉米连作处理分别比玉米-大豆轮作和大豆连作处理高4.1%和3.3%、1.8%和1.2%;在7~8月,大豆连作处理分别比玉米连作和玉米-大豆轮作高0.5%和1.9%、0.4%和2.0%。

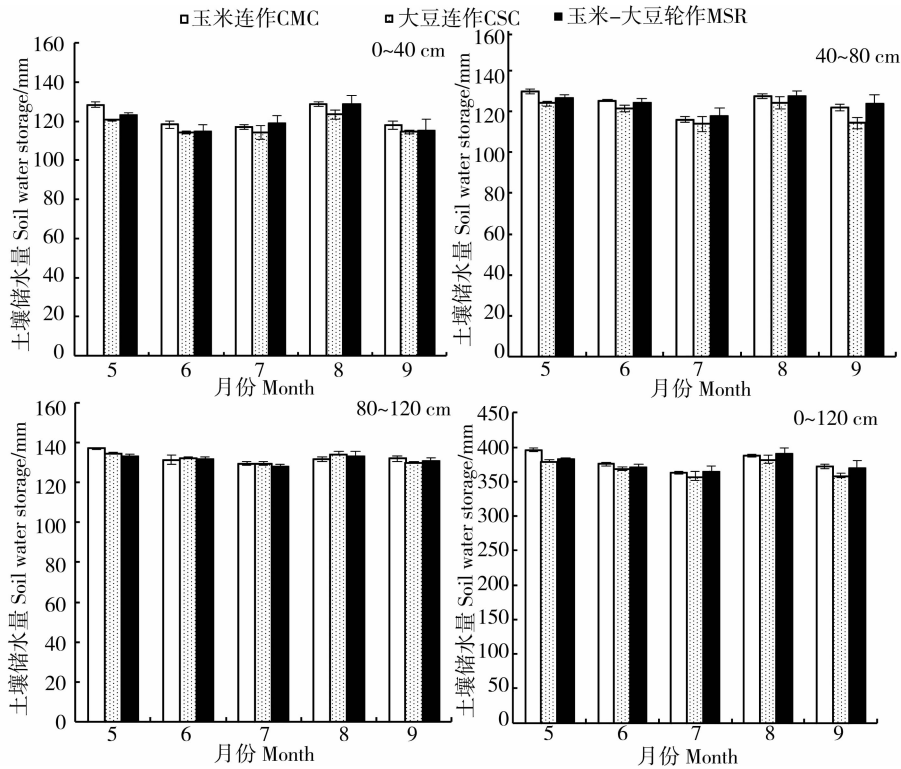


图1 不同种植模式下土壤储水量变化(2011年)

Fig. 1 Dynamics of soil water storage under different cropping regimes in 2011

图 2 为不同月份下各处理土壤体积含水量随土壤深度变化情况。从中可以看出,不同处理下的土壤体积含水量在不同月份间的变化趋势表现不同。其中 5~6 月土壤体积含水量随土壤深度增加呈增加的趋势,各处理间玉米连作处理在各土壤层次高于玉米-大豆轮作和大豆连作处理,特别是 0~80 cm 土壤层次下差异显著,而 80~120 cm 土层,各处

理间的土壤体积含水量差异呈缩小的趋势。7~8 月各处理土壤体积含水量表现为 0~80 cm 层次逐渐降低,而 80~120 cm 逐渐增加的趋势,但不同处理间的土壤体积含水量差异总体表现为不显著。在 9 月份,土壤体积含水量呈现与 5~6 月相同的趋势,即随土壤深度增加土壤体积含水量逐渐增加。

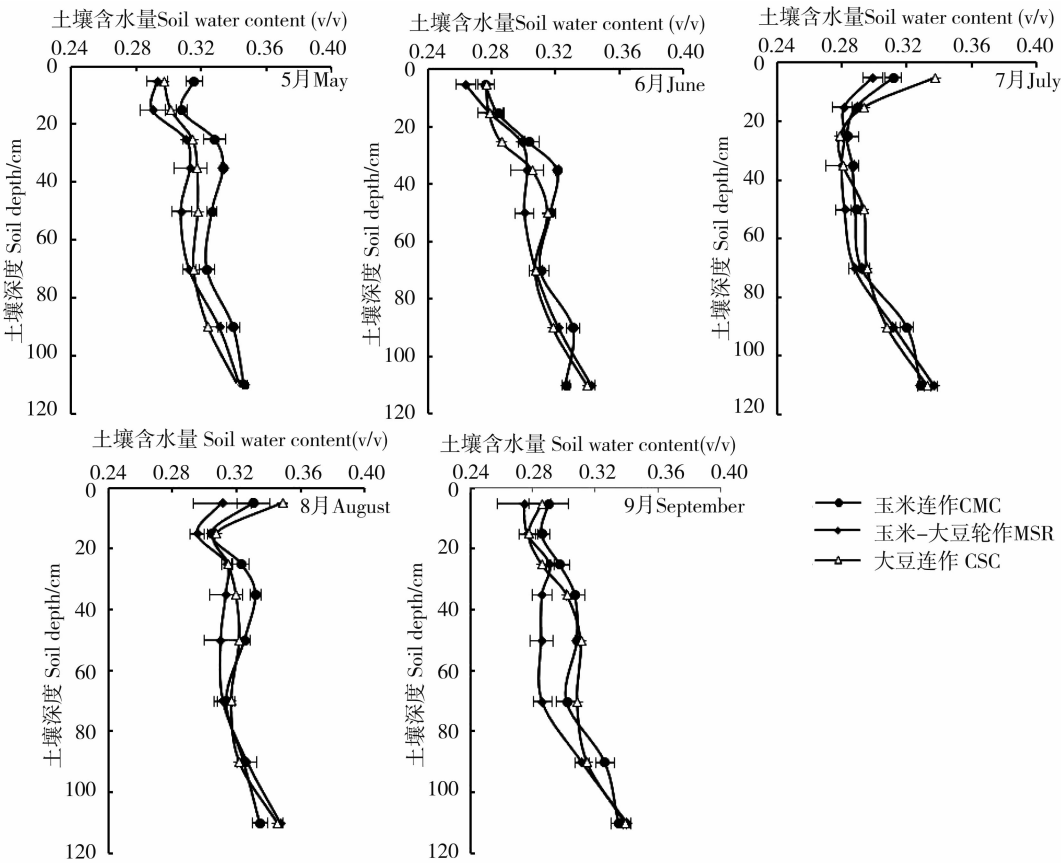


图 2 不同种植模式下土壤体积含水量变化(2011 年)  
Fig. 2 Dynamics of soil volumetric water content under different cropping regimes in 2011

2.3 土壤温度变化

图 3、图 4 和图 5 为 5、10、15 和 30 cm 层次下土壤最高、最低和平均温度变化情况。从图中可以看出,不同层次土壤温度在 5~9 月间呈抛物线变化趋势,这与大气温度变化趋势一致;不同土壤层次间温度变化幅度则随着土壤层次增加而降低,即表层土壤的土壤温度在不同月份间的变化较大,而深层土壤温度在不同月份间的变化相对较小。从不同处理间的差异来看,除大豆连作处理在 7 和 9 月的土壤温度表现为高于其它 2 个处理外,其余月份 3 个处理在不同土壤层次间的最高、最低和平均温度

均无显著差异。10~30 cm 大豆轮作处理土壤最高温高于玉米连作和玉米-大豆连作处理;而最低温在不同月份不同土层则各有不同,大豆轮作 10~30 cm 土层 7 月份最低,其它月份较高于玉米连作和玉米-大豆连作处理;玉米连作和玉米-大豆连作处理最高温和最低温基本持平。平均最高温度与最低温度,各个月份基本呈大豆轮作处理最高的趋势,这可能因为大豆需水量低,土壤含水量高,有利于保持土壤温度。从平均温度看,各个月份基本呈大豆轮作处理最高的趋势,这可能因为大豆需水量低,土壤含水量高,有利于保持土壤温度。

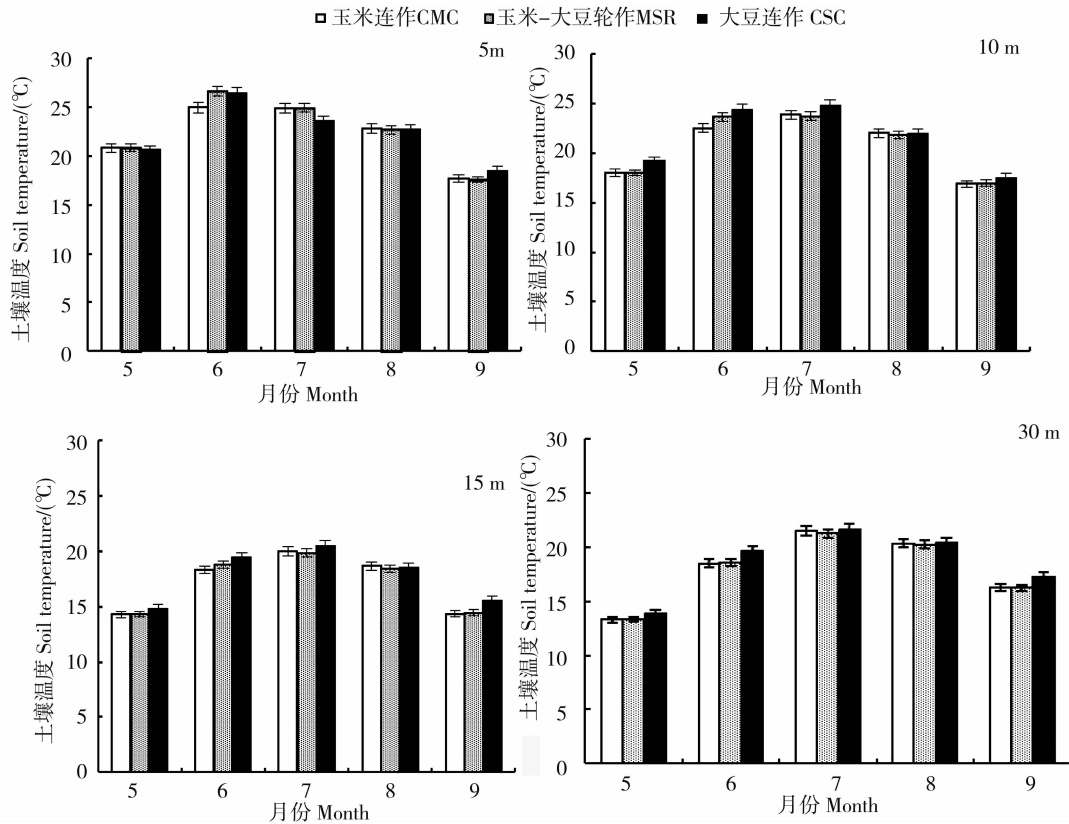


图3 不同种植模式下不同层次土壤最高温度月变化(2011 年)  
Fig. 3 Dynamics of monthly soil maximum temperature at different soil layers under different cropping regimes in 2011

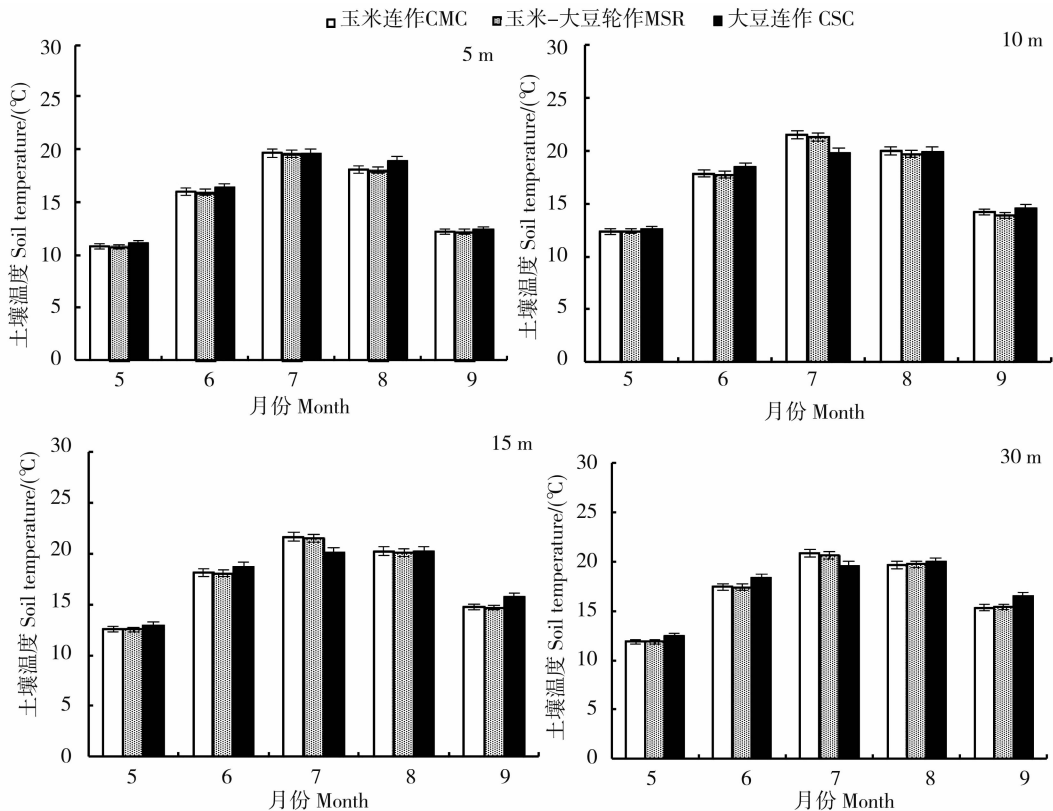


图4 不同种植模式下不同层次土壤最低温度月变化(2011 年)  
Fig. 4 Dynamics of monthly soil minimum temperature at different soil layers under different cropping regimes in 2011

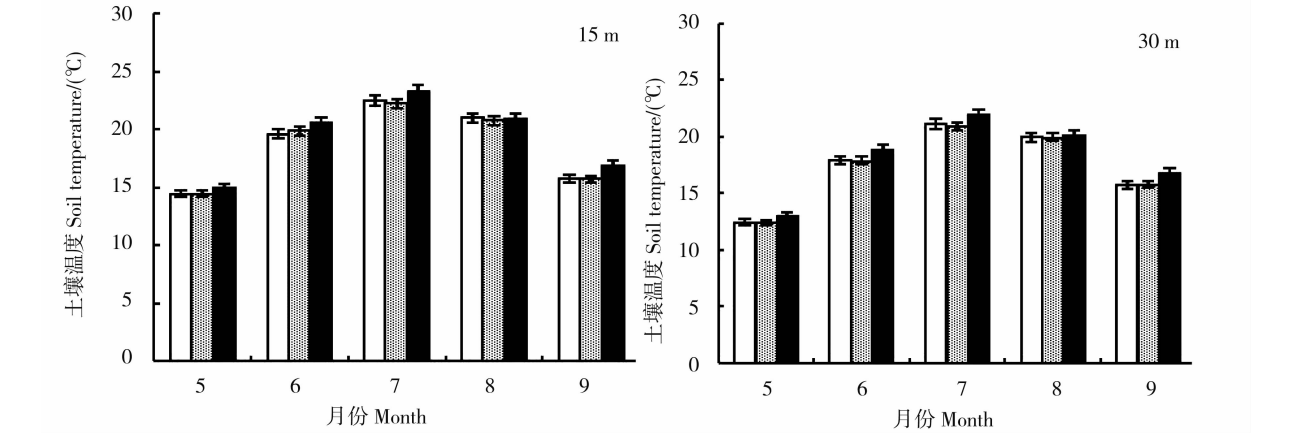


图5 不同处理下不同层次土壤平均温度月变化(2011 年)

Fig. 5 Dynamics of monthly soil mean temperature at different soil layers under different cropping regimes in 2011

3 讨 论

3.1 不同种植模式对土壤容重的影响

本研究表明玉米连作、玉米-大豆轮作和大豆连作3个处理下的土壤容重在0~10、10~20、20~40以及40~60 cm层次分别为1.01~1.21,1.12~1.40,1.13~1.46和1.23~1.54 g·cm<sup>-3</sup>,3个处理相比较则呈玉米连作<玉米-大豆轮作<大豆连作的趋势,且玉米连作与玉米-大豆轮作和大豆连作处理间的差异显著,这可能与两种种植作物根系特性及其在土壤中的分布特征不同有关。玉米连作与玉米-大豆轮作体系的玉米较大豆连作体系的大豆产量显著提高<sup>[21]</sup>,而较高的地上部产量对应着较高的根干重与根系分泌物量,因此进一步增加了土壤中有有机物质的还田量及其向有机质转化的效率,土壤中有机质的含量的增加,改善了土壤结构,降低了土壤容重;另一方面,与大豆根系相比,玉米的根系多为较粗壮的须根,在土壤中易于形成较大的孔隙,因此其土壤总孔隙度显著增加,进而促进土壤容重降低,这一结果与苏文泉等<sup>[22-24]</sup>的研究结果一致。此外,同一试验地的研究结果发现,长期玉米连作处理下耕层土壤≥53~250 μm土壤团聚体所占比例与玉米-大豆处理相比显著降低,但<53 μm黏粉粒所占比例显著增加<sup>[25]</sup>,不利于促进土壤大团聚体的形成,降低了土壤团聚体的稳定性和土壤的抗侵蚀能力。

3.2 不同种植模式对土壤水热条件变化的影响

近几十年来东北地区春季干旱现象频发,同时由于不合理的耕种措施导致农田土壤退化、水土流失严重,进一步加剧了春季干旱,对粮食生产造成了不利的影响。本研究发现,玉米连作处理下的5月土壤储水量在0~40 cm层次显著高于玉米-大豆轮作和大豆连作处理,该阶段正处于作物播种

至出苗阶段,较好的土壤水分状况对促进作物前期生长和后期群体质量改善提供了保障<sup>[26]</sup>。相关研究表明,土壤温度变化与土壤水分状况之间存在相互作用。土壤温度主要受土壤热容量与热传导率影响,土壤颗粒与土壤水分相比,具有较低的热容量和较高的热传导率,造成含水量较低的土壤的温度变化幅度较大<sup>[27]</sup>。土壤水分的增加与土壤结构的改善有关,特别是土壤容重的降低,有利于增加土壤总孔隙度,在冬季增加土壤水分储量,并为来年作物前期生长提供水分保障。此外,东北地区的春低温也是影响作物增产的另外一个重要因素,但本研究结果表明,大豆轮作处理在各个月份的平均温度最高,但不同种植模式下的土壤各层温度在3个处理间并无显著差异,这与宋振伟等<sup>[28]</sup>研究结果不一致,具体原因有待进一步分析。

4 结 论

本研究发现长期施用化肥条件下,玉米连作处理与玉米-大豆轮作和大豆连作处理相比,可显著降低0~60 cm层次的土壤容重并增加土壤总孔隙度,土壤结构得到显著改善;玉米连作处理可显著提高5月土壤0~120 cm层次的水分含量,有利于促进作物前期生长和后期群体质量改善,但不同处理间的土壤温度无显著差异。上述结果表明,长期玉米连作结合合理的肥料施用可显著改善土壤结构,增加播种期土壤水分储量,促进作物前期生长发育。

参考文献

[1] 孙风华,杨修群,路爽,等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. 气象科学,2006,26(2):157-163. (Sun F H, Yang X Q, Lu S, et al. Spatial and temporal variation characteristics of average, maximum and minimum air temperature in Northeast China and its comparative analysis[J]. Meteorologi-

- cal Science, 2006, 26(2): 157-163. )
- [2] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206. (Liu Z J, Yang X G, Wang W F, et al. Climate change characteristics of agricultural climate resources in the three northeastern provinces of China under the background of climate change [J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206. )
  - [3] Chen C, Lei C, Deng A. Will higher minimum temperatures increase corn production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965 to 2008[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1580-1588.
  - [4] Chen C Q, Qian C R, Deng A X, et al. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 94-103.
  - [5] 袭祝香, 马树庆, 王琪. 东北区低温冷害风险评估及区划[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 98-102. (Xi Z X, Ma S Q, Wang Q. Journal of northeast region risk evaluation and zonation of chilling damage [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 38: 94-103. )
  - [6] 刘晓英, 林而达. 东北地区农作物生长期中温度变化的时空特征[J]. 中国农业气象, 2004, 24(1): 11-15. (Liu X Y, Lin E D. Temporal and spatial characteristics of temperature variation in crop growing period in Northeast China [J]. China Agricultural Meteorology, 2004, 24(1): 11-15. )
  - [7] 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1588-1597. (Zu D W, Jin Z Q. Impacts of climate change and change rate on grain production in Northeast China[J]. Journal of Crop Science, 2008, 34(9): 1588-1597. )
  - [8] Qin R J, Stamp P, Richner W. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85: 50-61.
  - [9] Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus* L. var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93: 94-101.
  - [10] 秦红灵, 高旺盛, 李春阳. 北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 40-47. (Qin H L, Gao W S, Li C Y. Ecotone of no tillage on farmland soil temperature effect [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 40-47. )
  - [11] 刘战东, 高阳, 刘祖贵, 等. 降雨特性和覆盖方式对麦田土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 113-120. (Liu Z D, Gao Y, Liu Z G, et al. Effects of rainfall characteristics and mulching methods on soil moisture in wheat field [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 113-120. )
  - [12] Benjamin J G, Blaylock A D, Brown H J, et al. Ridge tillage effects on simulated water and heat transport[J]. Soil and Tillage Research, 1990, 18: 167-180.
  - [13] 张晓平, 方华军, 杨学明, 等. 免耕对黑土春夏季节温度和水分的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 313-316. (Zhang X P, Fang H J, Yang X M, et al. The effect of no tillage on temperature and moisture in the spring and summer seasons of black soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 313-316. )
  - [14] 邹文秀, 韩晓增, 李良皓, 等. 黑土区不同土地利用方式土壤水分动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 236-239. (Zou W X, Han X Z, Li L H, et al. Study on dynamic characteristics of soil moisture in different land use patterns in black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 236-239. )
  - [15] 张岁岐, 周小平, 慕自新, 等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 1-6. (Zhang S Q, Zhou X P, Mu Z X, et al. Effects of different irrigation patterns on growth and water use efficiency of maize root [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 1-6. )
  - [16] Hatfield J L, Allmaras R R, Rehm G W, et al. Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 48: 145-154.
  - [17] Liu C A, Zhou L M, Jia J J, et al. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge - furrow system in a semiarid region of China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 103-111.
  - [18] Song Z, Gao H, Zhu P, et al. Organic amendments increase corn yield by enhancing soil resilience to climate change[J]. The Crop Journal, 2015, 3: 110-117.
  - [19] Wang H, Zhang L, Dawes W R, et al. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain measurements and modeling[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(2): 151-167.
  - [20] 张彬, 郑建初, 田云录, 等. 农田开放式夜间增温系统的设计及其在稻麦上的试验效果[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 620-628. (Zhang B, Zheng J C, Tian Y L, et al. Design of an open night warming system and its effect on rice and wheat [J]. Journal of Crop Science, 2010, 36(4): 620-628. )
  - [21] Kou T J, Zhu P, Huang S, et al. Effects of long-term cropping regimes on soil carbon sequestration and aggregate composition in rainfed farmland of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118: 132-138.
  - [22] 苏文泉, 郑百义, 王宜利, 等. 试论黑土耕层土壤容重的自身调节作用[J]. 作物杂志, 1993(4): 20-22. (Su W Q, Zheng B Y, Wang Y L, et al. The tillage layer soil bulk density self regulatory mechanism of [J]. Crops, 1993(4): 20-22. )
  - [23] 王凤, 韩晓增, 李海波, 等. 不同黑土生态系统的土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 67-70. (Wang F, Han X Z, Li H B, et al. Study on the physical properties of soil moisture in different black soil ecosystem [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 67-70. )
  - [24] Shisanya C A, Mucheru M W, Mugendi D N, et al. Effect of organic and inorganic nutrient sources on soil mineral nitrogen and maize yields in central highlands of Kenya[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103: 239-246.
  - [25] 郭金瑞, 宋振伟, 彭宪现, 等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178-185. (Guo J R, Song Z W, Peng X, et al. Evaluation of soil C and N characteristics under long term different cropping patterns in black soil region of Northeast China [J]. Journal of agricultural engineering, 2015, 31(6): 178-185. )
  - [26] 宋振伟, 郭金瑞, 邓艾兴, 等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 108-114. (Song Z W, Guo J R, Deng A X, et al. Effects of Tillage Methods on soil water and heat characteristics of Spring Maize in Northeast China [J]. Journal of agricultural engineering, 2012, 28(16): 108-114. )
  - [27] Hillel D. Environmental soil physics[M]. USA: Academic Press, 1998.
  - [28] Song Z W, Guo J R, Zhang Z P, et al. Impacts of planting systems on soil moisture, soil temperature and corn yield in rainfed area of Northeast China [J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 66-74.