

赵政, 王呈玉, 米洋辰, 等. 秸秆还田方式对土壤水分影响的机制[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(5): 835-845.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.05.008

## 秸秆还田方式对土壤水分影响的机制

赵政<sup>1</sup>, 王呈玉<sup>1</sup>, 米洋辰<sup>1</sup>, 韩华<sup>1</sup>, 冯秋苹<sup>1</sup>, 高云航<sup>2</sup>, 刘淑霞<sup>1</sup>

(1. 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林 长春 130118; 2. 吉林农业大学动物科技学院, 吉林 长春 130118)

**摘要:** 为了探究不同秸秆还田方式对土壤水分的影响, 并揭示秸秆还田方式对土壤水分的影响机理, 本研究设置对照(CK)与6种处理[秸秆翻埋还田(SB)、秸秆轮耕还田(SRT)、秸秆碎混还田(SC)、秸秆覆盖还田(SM)、秸秆留高茬还田(SHS)、秸秆条带还田(SS)], 开展室内室外分析和定位试验, 测定土壤水分指标并进行相关性分析。结果表明, 秸秆还田可以提高土壤的蓄水和供水能力, 具体表现为土壤的含水量、饱和持水量、最大分子含水量、比水容量的提高, 与对照相比SB处理效果最好; 秸秆还田可以增强土壤中水分的运动能力, 提高土壤中可被植物利用的水分含量, 具体表现为土壤田间最小持水量、毛管持水量、自由水含量、有效水含量的提高; 秸秆还田可以提高土壤有机质含量, 降低容重, 提高黏粒含量, 增大土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比, 提高土壤水分的有效性, 与对照相比SB处理效果最好; 土壤有机质含量、土壤黏粒含量、土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比、土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)与土壤饱和持水量、田间最小持水量、萎蔫系数、水力传导度呈显著或极显著正相关; 土壤团聚体破坏率(PAD)、不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )与土壤饱和持水量、自由水含量、萎蔫系数、最大分子含水量呈显著或极显著负相关。结合秸秆还田对土壤水分特性的影响和相关性分析结果, 可以得出秸秆还田对土壤水分影响的作用机制: 秸秆在土壤中被分解后, 土壤有机质含量增高, 容重降低, 大大增加了土壤颗粒的比表面积, 土壤中黏粒含量增多, 总孔隙、大孔隙、中孔隙的占比提高, 土壤结构得到了优化, 综合提高了土壤的蓄水和供水能力, 促进了土壤对水分的吸收和利用。综合来看, 秸秆翻埋还田方式适合中国东北地区, 本研究结果为农民选择合适的秸秆还田方式提供了科学指导。

**关键词:** 秸秆还田; 土壤水分; 机理; 相关性分析

中图分类号: S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)05-0835-11

## Mechanism of the effect of straw returning on soil moisture

ZHAO Zheng<sup>1</sup>, WANG Chengyu<sup>1</sup>, MI Yangchen<sup>1</sup>, HAN Hua<sup>1</sup>, FENG Qiuping<sup>1</sup>, GAO Yunhang<sup>2</sup>, LIU Shuxia<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment of Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources of Commodity Grain Base of Jilin Province, Changchun 130118, China; 2. College of Animal Science and Technology of Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** To investigate the effects of different straw returning methods on soil moisture and to reveal the mechanism of the effects of straw returning methods on soil moisture, control (CK) and six treatments were set up in this study. The six treatments were straw burying and returning (SB), straw rotational tillage and returning (SRT), straw chopping and mixing and returning (SC), straw mulching and returning (SM), straw returning and leaving high stubble (SHS) and straw strip returning (SS), respectively. Indoor and outdoor analyses and location experiments were per-

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20210101100JC); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-37)

作者简介: 赵政(1999-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 从事土壤质量提升与养分循环研究。(E-mail) 807026494@qq.com

通讯作者: 刘淑霞, (E-mail) liushuxia69@163.com

formed to measure the soil moisture indices and to analyze the correlation between the two methods. The results showed that straw returning could improve the water storage and supply capacity of the soil, which was specifically manifested as the increase of soil water content, saturated water holding capacity, maximum molecular water content, specific water capacity value, and the SB treatment showed the best effect compared with the control. Besides, straw returning could enhance the movement ability of the water in the soil and increase the content of water in the soil that could be utilized by plants, which was specifically manifested as the increase of the minimum water holding capacity of the field soil, capillary water content, free water content and effective water content. Furthermore, straw returning could increase soil organic matter content, reduce the volumetric weight, increase the content of clay particles, improve the proportions of total soil pores, large soil pores and medium soil pores and could improve the effectiveness of soil water, and the SB treatment showed the best effect compared with the control. Soil organic matter content, soil clay particles content and the proportions of total soil pores, large soil pores and medium soil pores, mean weight diameter (*MWD*) of soil aggregates, geometric mean diameter (*GMD*) of soil aggregates showed significantly or highly significantly positive correlation with soil saturated water-holding capacity, field minimum water-holding capacity, coefficient of wilting, and hydraulic conductivity. Percentage of aggregate disruption (*PAD*) and unstable aggregate index ( $E_{LT}$ ) showed significantly or highly significantly negative correlation with soil saturated water holding capacity, free water content, wilting coefficient, and maximum molecular water content. Combined with the results such as the influence of straw returning on soil moisture characteristics and correlation analysis, the mechanism of the effect of straw returning on soil moisture can be concluded as follows: after the straws were decomposed in the soils, the soil organic matter content increased, the volumetric weight decreased, the specific surface area of soil particles increased greatly, the content of clay particles in the soil increased, the percentages of total soil pores, large soil pores and medium soil pores increased, the soil structure was optimized, the soil's abilities of storing water and supplying water were comprehensively improved, and the soil's abilities of water absorption and utilization were strengthened. In conclusion, the method of straw burying is suitable for lands in Northeast China, and the results in this study can provide scientific guidance for farmers to choose appropriate method of straw returning.

**Key words:** straw returning; soil moisture; mechanism; correlation analysis

水是生命之源。土壤缺水会影响作物生长,甚至导致作物死亡,进而影响产量<sup>[1]</sup>。土壤水分对农业生产发展至关重要,它不仅为田间农作物提供生长、发育所需的水分,还可以作为载体来运输和转移溶质<sup>[2]</sup>。

干旱是世界上最常见的自然灾害<sup>[3]</sup>。近年来,抗旱已成为世界各国研究的热点,许多学者对干旱进行了广泛而深入的研究<sup>[4]</sup>。东北三省是中国主要粮食生产区,这里土地肥沃,被称为“天下粮仓”<sup>[5]</sup>。但近些年来,东北三省的气候呈现出降雨减少、气温上升的趋势,这使得农业水资源的收支失衡愈发严重<sup>[6]</sup>。并且,该地区生态环境较为脆弱,对旱灾造成的损害的复原能力较低,直接影响到中国的粮食供给<sup>[7]</sup>。

近几年,秸秆还田逐渐成为研究热点。有研究发现,秸秆还田具有提高土壤含水量、加快大团聚体形成、改善盐渍土、增加土壤肥力、提高农作物产量等诸多优点<sup>[8]</sup>。An 等<sup>[9]</sup>的研究结果表明,与秸秆未还田的土壤相比,秸秆还田处理的土壤含水量提

高了6.1%~7.8%,玉米的产量提高了6.7%~8.2%。李玉梅等<sup>[10]</sup>的研究结果表明,土壤水分含量在作物成熟期最高,且土层 30 cm 以下的水分含量显著增大,同一土层中深翻处理相对浅翻处理的含水量提升了3.23%~8.41%。Lin 等<sup>[11]</sup>研究发现,在中国北方地区,与常规种植方法相比,秸秆还田后玉米的产量与不还田相比提高了 7.5%,特别是在年降水量不超过 600 mm 的地区。

综上所述,在生产实践中秸秆还田改善了土壤的蓄水性,是缓解干旱危害的重要途径。由此可见,秸秆还田对东北农业生产有重要意义。但大多数研究只分析了秸秆还田对土壤水分的影响,并没有追本溯源,探究其具体作用机理。因此,本研究拟通过室内室外分析和定位试验,对不同秸秆还田方式下的土壤理化性质和土壤水分的各项指标进行分析,以期探究秸秆还田是否通过影响土壤理化性质来影响土壤水分状况。本研究结果将为东北地区农民选择合适的秸秆还田方式提供科学指导,为农业生产实践提供理论依据。

# 1 材料与方 法

## 1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院科研试验基地(47°15'N,123°40'E)。该地属于中国东北西部,土壤类型为碳酸盐黑钙土,土壤基本理化性质:pH 为 7.82,有机质含量为 26.50 g/kg,速效氮含量为 100.00 mg/kg,速效磷含量为 16.90 mg/kg,速效钾含量为 134.00 mg/kg,全氮含量为 0.16 g/kg,全磷含量为 0.09 g/kg,全钾含量为 0.50 g/kg。该地属于半干旱区,温带大陆性气候,年均降水量约 350 mm,年均温度 3.2 °C,4-9 月均温 17.6 °C,最高温度 27.1 °C,最低温度 4.9 °C,9 月 28 日为初霜日,春季终霜起到秋季初霜止跨度可达到 150 d。

## 1.2 试验设计

2016 年 3 月开始试验,共设计 1 个对照(CK)和 6 个处理,分别为秸秆翻埋还田(SB)、秸秆轮耕还田(SRT)、秸秆碎混还田(SC)、秸秆覆盖还田(SM)、秸秆留高茬还田(SHS)、秸秆条带还田(SS),具体处理方法见表 1。进行田间大区对比试验,小区长 70 m,宽 50 m,面积为 0.35 hm<sup>2</sup>,不设置重复,采取秸秆全量还田的方式,还田量为 10 700 kg/hm<sup>2</sup>,选用嫩单-19 品种玉米进行单作,各处理和对照按照 400 kg/hm<sup>2</sup>的标准施复合肥(氮含量 26%,钾含量 11%,磷含量 11%),在每年 4 月末进行机械播种,每行间距 65.0 cm,每株间距 19.5 cm,1 hm<sup>2</sup> 6.5×10<sup>4</sup>株,10 月初进行秋季机械收获,秋收后进行各项秸秆还田处理。

表 1 试验各处理秸秆还田具体方式

Table 1 Specific methods of straw returning method for each treatment

处理	秸秆还田具体方式
不施秸秆传统耕作(CK)	秸秆不还田,起垄种植
秸秆翻埋还田(SB)	秸秆粉碎,长度≤8 cm,深翻(20~30 cm)还田,翻耕后重耙 1 次
秸秆轮耕还田(SRT)	2 年覆盖 1 年深翻,采用免耕机进行平作
秸秆碎混还田(SC)	秸秆粉碎,长度≤8 cm,混拌入 0~20 cm 土层中
秸秆覆盖还田(SM)	秸秆粉碎,长度≤8 cm,覆盖地表,第 2 年二次机械粉碎
秸秆留高茬还田(SHS)	留茬,高度为 35~40 cm,上面的秸秆粉碎于地表
秸秆条带还田(SS)	2 行秸秆合并 1 行覆盖

常规耕按照常规起垄播种方式播种,其他 6 个处理在免耕播种的同时一次性施入底肥。

## 1.3 测定项目

1.3.1 土壤采集 2020 年 10 月进行土壤采集,采集表层土壤(0~20 cm)和表面土壤(21~40 cm),以“S”形选择 5 点样品进行混合,每个处理 3 次重复,装入保鲜盒中的土壤用于测定土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>2 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )、土壤团聚体破坏率(PAD)、土壤不稳定团粒指数(ELT),装入塑封袋中的土壤用于测定土壤理化性质,使用环刀采集 2 种深度的土层土壤,各重复 3 次,用于测定土壤水分相关指标。

1.3.2 土壤理化性质的测定 土壤含水量的测定采用烘干法,土壤水力传导度的测定采用环刀法,土壤水分特性的测定采用水分特征曲线法,土壤有机质含量的测定采用容量法,土壤容重的测定采用环刀法,水稳性团聚体粒径的分级采用萨维诺夫法<sup>[12]</sup>。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 对数据进行计算与整理,采用 IBM SPSS Statistics 27 和 Origin 2021 分析数据与作图。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同秸秆还田方式对土壤蓄水能力的影响

土壤饱和持水量是指土壤孔隙全部充满水分时的含水量,由土壤性质决定,代表土壤的最大蓄水能力。从表 2 可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,土壤饱和持水量排序为 SB>SC>SRT>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤饱和持水量排序为 SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田会对土壤饱和持水量产生有利影响,SB 处理的作用最明显,效果最好。

土壤最大分子含水量是指土壤分子靠引力保存的最大水分含量,由土壤质地、有机质含量和矿物组成决定,代表土壤所能容纳的最大含水量。从表 2 可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,最大分子含水量排序为 SB>SC>SRT>CK>SM>SHS>SS,各处理与对照相比差异显著( $P<0.05$ );表面土壤土层中,最大分子含水量排序为 SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田会对土壤最大分子含水量产生有利影响,SB 处理的作用最明显,效果最好。

土壤含水量是土壤中水分的质量分数,其数值可以反映作物对水的需求情况,对农业生产有很重

要的指导意义。从表 2 可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,土壤含水量的排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤含水量排序为SB>SRT>SM>SHS>SC>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田会对土壤含水量产生有利影响,SB 处理效果最好。

土壤水力传导度是指土壤在单位时间内所通过

的水量,可以衡量水在土壤中移动的难易程度。从表 2 可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,土壤水力传导度排序为SC>SB>SRT>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤水力传导度排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>CK>SS,除 SS 处理外,其他处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田会对土壤水力传导度产生有利影响,SB 处理效果最好。

表 2 不同秸秆还田方式下土壤蓄水能力

Table 2 Soil water storage capacity of different straw returning methods

土层	处理	土壤饱和持水量 (%)	最大分子含水量 (%)	土壤含水量 (%)	土壤水力传导度 (m/d)
表层土壤(0~20 cm)	对照(CK)	25.61±0.20g	16.82±0.06d	20.98±0.39f	19.49±0.34g
	SB	58.33±0.09a	35.06±0.21a	36.05±0.94a	38.22±0.33b
	SRT	52.33±0.34c	25.28±0.23c	33.34±0.60b	36.09±0.45c
	SC	54.78±0.38b	26.23±0.31b	30.43±0.18c	40.89±0.08a
	SM	45.72±0.26d	16.14±0.22e	25.43±1.19d	29.56±0.03d
	SHS	39.24±0.29e	14.12±0.09f	24.50±0.43d	28.47±0.02e
	SS	30.26±0.17f	13.23±0.17g	22.66±0.21e	23.23±0.20f
表面土壤(21~40 cm)	对照(CK)	22.98±0.55g	8.31±0.07g	17.13±0.40f	17.47±0.37f
	SB	60.33±0.13a	33.10±0.03a	30.92±0.92a	35.35±0.18a
	SRT	52.97±0.14b	22.61±0.11b	28.46±0.42b	32.29±0.32b
	SC	48.79±0.19c	17.40±0.37c	23.79±0.38d	28.48±0.19c
	SM	40.36±0.19d	14.88±0.27d	27.68±0.30b	21.65±0.38d
	SHS	35.57±0.26e	13.98±0.08e	26.50±0.63c	19.27±0.25e
	SS	26.73±0.16f	11.95±0.10f	19.68±0.34e	16.29±0.17g

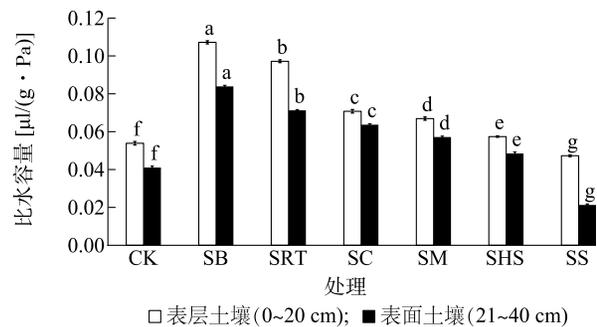
CK、SB、SRT、SC、SM、SHS、SS 见表 1。同一土层的数据后不同小写字母表示不同秸秆还田方式下土壤蓄水能力差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同秸秆还田方式对土壤供水能力的影响

比水容量是分析土壤水分保持和运动的重要参数之一,比水容量值可以很好地代表土壤供水能力,比水容量值越大,土壤的供水能力越强<sup>[13]</sup>。图 1 显示,在 2 个土层中,与对照相比,比水容量值排序是一致的,均为SB>SRT>SC>SM>SHS>CK>SS,除 SS 处理外,其他处理显著高于对照( $P<0.05$ );表层土壤土层的比水容量大于表面土壤土层。结果表明,SB 处理提高土壤供水能力的效果最好。

## 2.3 不同秸秆还田方式对土壤水分常数的影响

土壤田间最小持水量是指无地下水干扰的情况下,充分灌溉或降雨后水分充分下渗,在一定时期内保持相对稳定的含水量,它能决定植物可利用的水分含量和灌溉量的上限,对农业灌溉管理和排水设计具有重要意义。从表 3 可以看出,与对照相比,表



CK、SB、SRT、SC、SM、SHS、SS 见表 1。不同小写字母表示不同秸秆还田方式下比水容量差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同秸秆还田方式下的比水容量

Fig. 1 Specific water capacity of different straw returning methods

层土壤土层中,土壤田间最小持水量排序为SC>SB>

SRT>SM>SHS>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ ); 表面土壤土层中, 土壤田间最小持水量排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。结果表明, 秸秆还田会对土壤田间最小持水量产生有利影响, 提高土壤中可被植物利用的水分含量, 结合 2 个土层来看, SB 处理效果较好。

土壤毛管持水量是指土壤中能够被毛管系统保持的最大水分含量, 毛管水是对植物生长发育最有

效的水分, 有利于植物根系吸收水分和作物对水分的有效利用。从表 3 可以看出, 与对照相比, 表层土壤土层中, 土壤毛管持水量排序为SM>SC>SRT>SHS>SS>SB>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ ); 表面土壤土层中, 土壤毛管持水量排序为SC>SHS>SM>SRT>SB>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。结果表明, 秸秆还田会对土壤毛管持水量产生有利影响, 提高了土壤中植物生长发育所需的水分含量, 结合 2 个土层来看, SM 处理效果较好。

表 3 不同秸秆还田方式下的土壤水分常数

Table 3 Soil moisture constant of different straw returning methods

土层	处理	土壤田间最小持水量 (%)	土壤毛管持水量 (%)	土壤自由水含量 (%)	土壤萎蔫系数 (%)	土壤有效水含量 (%)
表层土壤(0~20 cm)	对照(CK)	24.93±0.34f	8.11±0.14g	17.50±0.09f	7.53±0.10g	17.40±0.08g
	SB	47.64±1.29b	12.58±0.18f	45.75±0.14a	28.88±0.20a	18.26±0.08f
	SRT	43.18±0.12c	17.90±0.14c	34.43±0.11b	20.75±0.09c	22.43±0.10c
	SC	47.81±0.16a	21.58±0.10b	33.20±0.06c	21.13±0.12b	26.68±0.10b
	SM	42.62±0.20c	26.48±0.17a	19.24±0.06e	11.28±0.12d	31.34±0.04a
	SHS	31.40±0.14d	17.28±0.15d	21.96±0.28d	10.54±0.11e	20.86±0.05d
	SS	29.14±0.14e	16.51±0.10e	13.75±0.07g	9.81±0.09f	19.93±0.06e
表面土壤(21~40 cm)	对照(CK)	23.88±0.15g	15.57±0.11e	7.41±0.05g	5.71±0.11g	18.17±0.08g
	SB	47.79±0.10a	16.69±0.10d	43.64±0.09a	28.54±0.16a	21.25±0.04e
	SRT	42.35±0.10b	19.69±0.20c	33.28±0.09b	18.95±0.10b	23.40±0.17d
	SC	41.32±0.18c	23.92±0.17a	24.87±0.07c	12.65±0.09c	28.67±0.09a
	SM	37.79±0.07d	22.51±0.07b	17.85±0.07d	10.59±0.09d	26.80±0.05c
	SHS	36.61±0.26e	22.63±0.09b	12.94±0.03e	9.46±0.08e	27.15±0.06b
	SS	28.44±0.21f	16.49±0.15d	10.24±0.11f	8.83±0.09f	19.61±0.08f

CK、SB、SRT、SC、SM、SHS、SS 见表 1。同一土层数据后不同小写字母表示不同秸秆还田方式下土壤水分常数差异显著 ( $P<0.05$ )。

土壤自由水是指土壤中可以移动, 和各土壤粒子间没有相互作用的水分, 具有滞留时间短的特点, 被植物吸收利用的机会少。与对照相比, 表层土壤土层中, 土壤自由水含量排序为SB>SRT>SC>SHS>SM>CK>SS, 除 SS 处理外, 其他处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。表面土壤土层中, 土壤自由水含量排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。结果表明, 秸秆还田会对土壤自由水含量产生有利影响, 有效增强土壤水分的运动能力, SB 处理效果较好。

土壤萎蔫系数是指生长在湿润土壤上的作物经过长期的干旱后, 因吸水不足而补偿蒸腾消耗, 叶片出现萎蔫状况时的土壤含水量。与对照相比, 表层土壤土层中, 土壤萎蔫系数排序为SB>

SC>SRT>SM>SHS>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ ); 表面土壤土层中, 土壤萎蔫系数排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。结果表明, 秸秆还田会对土壤萎蔫系数产生有利影响, SB 处理效果最好。

土壤有效水主要指作物能够有效利用的水分, 土壤有效水含量可以反映土壤对水分吸收利用的程度。与对照相比, 表层土壤土层中, 土壤有效水含量的排序为SM>SC>SRT>SHS>SS>SB>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ ); 表面土壤土层中, 土壤有效水含量的排序为SC>SHS>SM>SRT>SB>SS>CK, 各处理显著高于对照 ( $P<0.05$ )。结果表明, 秸秆还田对土壤有效水含量的提高具有较好的效果, 能够增强土壤对水分吸收和利用的能力, 结合 2 个土层来

看,SM处理效果较好。

#### 2.4 不同秸秆还田方式对土壤理化性质的影响

从表4可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,土壤有机质含量的排序为SB>SC>SRT>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤有机质含量的排序为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK,除SS处理外,各处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田对土壤有机质含量的增加具有较好的效果,SB处理效果最好。

与对照相比,表层土壤土层中,土壤容重的排序为CK>SS>SHS>SM>SC>SRT>SB,各处理显著低于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤容重的排序为CK>SS>SM>SHS>SC>SRT>SB,各处理显著低于

对照( $P<0.05$ )。2个土层中各处理与对照相比,容重均显著降低。结果表明,秸秆还田对土壤容重的降低具有较好的效果。

与对照相比,2个土层中,不同处理间的砂粒含量均无显著差异;粉粒含量在表层土壤土层的排序为CK>SS>SHS>SM>SC>SRT>SB,各处理显著低于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,粉粒含量的排序为CK>SS>SHS>SM>SB>SC>SRT,各处理显著低于对照( $P<0.05$ );黏粒含量在2个土层中的排序一致,均为SB>SRT>SC>SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田可以降低土壤粉粒含量,提高黏粒含量,但是对砂粒含量无显著影响。

表4 不同秸秆还田方式下的土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties of different straw returning methods

土层	处理	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	黏粒含量 (%)	容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	有机质含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ )
表层土壤(0~20 cm)	对照(CK)	24.56±0.15a	49.91±1.41a	25.53±0.18f	1.49±0.13a	11.95±0.21f
	SB	26.18±0.10a	15.42±0.28f	57.78±0.21a	1.22±0.07f	39.04±0.53a
	SRT	25.84±0.71a	24.22±0.63e	49.94±0.53b	1.31±0.13e	37.68±1.41b
	SC	22.59±0.58a	30.62±0.68d	46.79±1.41c	1.34±0.13d	38.31±1.65b
	SM	29.26±0.15a	30.81±1.66d	39.63±1.65d	1.36±0.07cd	29.53±0.18c
	SHS	29.49±0.18a	40.08±0.56c	29.53±0.18e	1.39±0.20c	19.73±0.98d
	SS	27.86±0.36a	44.45±0.89b	27.69±0.98e	1.43±0.05b	13.53±0.18e
表面土壤(21~40 cm)	对照(CK)	21.44±1.27a	54.38±1.23a	24.68±1.25f	1.53±0.05a	11.91±1.09f
	SB	28.23±1.10a	33.57±1.11e	58.20±1.09a	1.21±0.02f	36.64±0.67a
	SRT	25.46±0.34a	26.71±0.87f	47.83±0.67b	1.28±0.14e	33.71±0.53b
	SC	28.70±0.23a	28.59±0.23f	42.71±0.73c	1.39±0.03d	31.73±0.98c
	SM	27.25±0.88a	35.02±0.23d	37.73±0.98d	1.43±0.13c	22.53±0.18d
	SHS	28.53±0.67a	43.34±0.94c	28.13±0.18e	1.42±0.02c	16.01±1.08e
	SS	26.73±0.29a	46.95±1.01b	26.95±1.08e	1.50±0.09b	12.68±1.25f

CK、SB、SRT、SC、SM、SHS、SS见表1。同一土层数据后不同小写字母表示不同秸秆还田方式下土壤理化性质差异显著( $P<0.05$ )。

#### 2.5 秸秆还田对土壤孔隙分布的影响

土壤孔隙是土壤结构组成要素之一,孔隙的分布情况影响了土壤物理、化学、生物特性及其生态功能,通常将土壤孔隙分成3个等级,即大孔隙、中孔隙和小孔隙<sup>[14]</sup>,大孔隙的作用在于土壤通气和迅速排水<sup>[15]</sup>,中孔隙的作用在于保存植物生长所需要有效水分<sup>[16]</sup>,而小孔隙中的水分通常不能被植物利用,限制了各种微生物活动<sup>[17]</sup>。从表5可以看出,与对照相比,表层土壤土层中,土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比的排序为SB>SRT>SC>SM>

SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );表面土壤土层中,土壤总孔隙占比、大孔隙占比的排序与表层土壤土层的排序相同,而中孔隙占比的排序为SB>SRT>SC=SM>SHS>SS>CK,各处理显著高于对照( $P<0.05$ );小孔隙占比的排序为CK>SS>SB>SHS>SRT>SC>SM,各处理显著低于对照( $P<0.05$ )。结果表明,秸秆还田可以提高土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比,增强土壤透气、排水以及保存有效水分的能力,还可以降低表面土壤土层中小孔隙占比,减小深层土壤中水分不能被植物利用所带

来的负面影响。综合来看,SB 处理对提高土壤水分有效性的效果最好。

表 5 不同秸秆还田方式下的土壤孔隙分布

Table 5 Soil pore distribution of different straw returning methods

土层	处理	总孔隙占比 (%)	大孔隙(>0.200 mm) 占比 (%)	中孔隙(0.002~0.020 mm) 占比 (%)	小孔隙(<0.002 mm) 占比 (%)
表层土壤(0~20 cm)	对照(CK)	40.26±0.10f	16.98±0.38g	12.58±0.11g	10.70±0.29c
	SB	53.96±0.04a	25.14±0.14a	18.25±0.11a	10.57±0.15c
	SRT	51.21±0.24b	23.87±0.34b	17.29±0.15b	11.65±0.22b
	SC	49.97±0.36c	22.26±0.26c	16.87±0.11c	9.23±0.17e
	SM	44.91±0.20d	21.00±0.34d	15.83±0.06d	12.09±0.18a
	SHS	44.53±0.32d	19.89±0.20e	14.45±0.05e	10.19±0.11d
	SS	43.77±0.49e	17.78±0.18f	13.72±0.05f	12.27±0.12a
表面土壤(21~40 cm)	对照(CK)	41.77±0.21f	18.03±0.19f	13.69±0.05e	12.35±0.13a
	SB	54.34±0.36a	26.26±0.24a	18.00±0.12a	10.08±0.12c
	SRT	48.91±0.51b	24.28±0.11b	16.08±0.10b	7.98±0.08e
	SC	46.79±0.33c	23.52±0.24c	15.96±0.14b	7.36±0.11f
	SM	45.66±0.25d	21.89±0.12d	15.96±0.17b	7.18±0.10f
	SHS	44.53±0.38e	19.15±0.11e	15.15±0.11c	9.45±0.12d
	SS	42.26±0.29f	18.85±0.12e	13.91±0.09d	10.81±0.11b

CK、SB、SRT、SC、SM、SHS、SS 见表 1。同一土层数据后不同小写字母表示不同秸秆还田方式下土壤孔隙分布差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.6 秸秆还田方式对土壤水分特性的影响机制

2.6.1 土壤水分常数与土壤容重、有机质含量的相关性 从表 6、表 7 可以看出,土壤有机质含量与土壤水力传导度、自由水含量、最大分子含水量、田间最小持水量、饱和持水量、萎蔫系数都呈显著或极显著正相关;土壤容重与土壤萎蔫系数、自由水含量、最大分子含水量都呈显著或极显著负相关。

研究结果可以解释 2 个科学问题,一是秸秆还田如何使土壤水库容量变大;二是秸秆还田如何提高土壤对水的吸附性。前者是因为土壤容重的降低,容重是土壤最重要的物理指标之一,能够反映土壤颗粒之间的紧实程度和土壤孔隙状况,直接影响土壤储存水库容量的大小,对保持土壤水分具有重要作用<sup>[18-19]</sup>,且相关研究结果表明,土壤饱和持水量、萎蔫系数、有效水含量等指标均可与土壤容重建立函数关系,土壤容重的减小导致土壤大孔隙占总孔隙的比例增大,土壤水库容量增大,土壤的蓄水和供水能力得到增强,可以满足作物生长发育的需要<sup>[20]</sup>;后者是因为土壤有机质含量的提高使土壤胶体状况得到改善,土壤有机质可以改变土壤结构,改变土壤的胶体状况,增强土壤对水的吸附能力,减少土壤水分的流失,使土壤水分得到充分的利用。因此,土壤有机质对土壤水分的运动具有调节作用,其含量较高时,作用会更加明

显<sup>[21]</sup>。

2.6.2 土壤水分常数与土壤质地的相关性 从表 6、表 7 可以看出,土壤黏粒含量与土壤水力传导度、萎蔫系数、饱和持水量、自由水含量、田间最小持水量、最大分子含水量呈显著或极显著正相关;土壤粉粒含量与土壤自由水含量、饱和持水量、水力传导度、田间最小持水量呈显著或极显著负相关。

研究结果可以解释秸秆还田如何增强土壤的蓄水能力,是因为秸秆与土壤混合时,产生了分解作用,大大增加了土壤颗粒的比表面积,土壤中黏粒变多,而黏粒含有丰富的细小孔隙,土壤毛管的持水作用增强,提高了土壤对水分的吸附作用,在这些因素的影响下,土壤的蓄水能力得到了提升,并且当土壤中黏粒、粉粒等各级颗粒组成比例适中,土壤松紧程度较好的时候,才有利于作物的生长和发育<sup>[22]</sup>。所以,土壤质地是通过作用于土壤养分供给和土壤水分存储来影响农作物生长发育的,对土壤的理化性状的影响尤为重要<sup>[23]</sup>。

2.6.3 土壤水分常数与土壤孔隙的相关性 从表 6、表 7 可以看出,土壤总孔隙、大孔隙、中孔隙的占比都与土壤田间最小持水量、饱和持水量、自由水含量、萎蔫系数、最大分子含水量、水力传导度呈显著或极显著正相关。

表 6 表层土壤(0~20 cm)水分常数与理化性质、质地、孔隙分布、土壤结构的相关性

Table 6 Correlation between soil water constant and physical and chemical properties, texture, pore distribution and soil structure in top soil (0~20 cm)

指标	饱和持水量	田间最小持水量	毛管持水量	有效水含量	自由水含量	萎蔫系数	最大分子含水量	水力传导度
容重	-0.619	-0.553	0.248	0.250	-0.801 *	-0.805 *	-0.818 *	-0.517
有机质含量	0.966 **	0.936 **	0.229	0.248	0.935 **	0.945 **	0.909 **	0.939 **
砂粒含量	-0.236	-0.269	0.296	0.146	-0.409	-0.406	-0.526	-0.368
粉粒含量	-0.949 **	-0.914 **	-0.274	-0.255	-0.893 **	-0.916 **	-0.852 *	-0.865 *
黏粒含量	0.894 **	0.832 *	-0.005	-0.021	0.977 **	0.991 **	0.961 **	0.886 **
总孔隙占比	0.940 **	0.884 **	0.161	0.100	0.941 **	0.977 **	0.900 **	0.923 **
大孔隙占比	0.954 **	0.893 **	0.180	0.182	0.947 **	0.936 **	0.896 **	0.894 **
中孔隙占比	0.986 **	0.959 **	0.345	0.320	0.896 **	0.929 **	0.851 *	0.940 **
小孔隙占比	-0.088	-0.015	0.368	0.239	-0.285	-0.166	-0.287	-0.209
<i>MWD</i>	0.983 **	0.929 **	0.412	0.362	0.858 *	0.867 *	0.768 *	0.950 **
<i>GMD</i>	0.918 **	0.862 *	0.512	0.385	0.736	0.774 *	0.617	0.878 **
<i>R</i> <sub>0.25</sub>	0.517	0.517	-0.203	-0.248	0.667	0.762 *	0.744	0.502
<i>PAD</i>	-0.925 **	-0.904 **	-0.377	-0.322	-0.814 *	-0.863 *	-0.765 *	-0.857 *
<i>E</i> <sub>LT</sub>	-0.808 *	-0.727	-0.015	-0.006	-0.872 *	-0.851 *	-0.826 *	-0.709

\* 表示显著相关( $P<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ ); *MWD* 代表土壤团聚体平均重量直径; *GMD* 代表几何平均直径; *R*<sub>0.25</sub> 代表>2 mm 水稳性团聚体含量; *PAD* 代表土壤团聚体破坏率; *E*<sub>LT</sub> 代表土壤不稳定团粒指数。

表 7 表面土壤(21~40 cm)水分常数与理化性质、质地、孔隙分布、土壤结构的相关性

Table 7 Correlation between soil water constant and physical and chemical properties, texture, pore distribution and soil structure in surface soil (21~40 cm)

指标	饱和持水量	田间最小持水量	毛管持水量	有效水含量	自由水含量	萎蔫系数	最大分子含水量	水力传导度
容重	-0.966 **	-0.948 **	-0.079	-0.184	-0.984 **	-0.965 **	-0.974 **	-0.956 **
有机质含量	0.981 **	0.926 **	0.257	0.344	0.952 **	0.857 *	0.876 **	0.982 **
砂粒含量	0.543	0.672	0.615	0.697	0.404	0.389	0.457	0.347
粉粒含量	-0.887 **	-0.851 *	-0.550	-0.605	-0.779 *	-0.637	-0.674	-0.822 *
黏粒含量	0.973 **	0.931 **	0.077	0.181	0.990 **	0.948 **	0.956 **	0.974 **
总孔隙占比	0.913 **	0.887 **	-0.068	0.047	0.966 **	0.969 **	0.970 **	0.935 **
大孔隙占比	0.942 **	0.875 **	0.120	0.209	0.947 **	0.870 *	0.879 **	0.971 **
中孔隙占比	0.839 *	0.838 *	0.059	0.163	0.856 *	0.854 *	0.866 *	0.825 *
小孔隙占比	-0.325	-0.268	-0.739	-0.703	-0.146	0.067	0.024	-0.272
<i>MWD</i>	0.980 **	0.982 **	0.385	0.479	0.919 **	0.849 *	0.882 **	0.919 **
<i>GMD</i>	0.950 **	0.966 **	0.420	0.513	0.878 **	0.814 *	0.851 *	0.865 *
<i>R</i> <sub>0.25</sub>	0.766 *	0.652	-0.049	0.014	0.808 *	0.723	0.713	0.875 **
<i>PAD</i>	-0.985 **	-0.974 **	-0.246	-0.354	-0.960 **	-0.905 **	-0.932 **	-0.964 **
<i>E</i> <sub>LT</sub>	-0.946 **	-0.890 **	-0.079	-0.171	-0.962 **	-0.908 **	-0.913 **	-0.950 **

\* 表示显著相关( $P<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ ); *MWD* 代表土壤团聚体平均重量直径; *GMD* 代表几何平均直径; *R*<sub>0.25</sub> 代表>2 mm 水稳性团聚体含量; *PAD* 代表土壤团聚体破坏率; *E*<sub>LT</sub> 代表土壤不稳定团粒指数,下同。

土壤孔隙是水气运输和生物运动的通道,其控制着气体、水、胶体和颗粒的运输,为植物根系发育

和微生物繁殖提供了空间和养分,决定了土壤的保水、透水、通气等性能<sup>[24]</sup>,在调节土壤肥力和生态功能方面起着至关重要的作用<sup>[25]</sup>。土壤的孔隙分布情况、大小和连续性都影响了土壤水的存储和运输,土壤总孔隙度占比越大,容重越小,土壤发育得越好<sup>[26]</sup>,大孔隙占比越大,土壤通气和排水的效果越好,中孔隙占比越大,土壤所能存储的有效水分就越多。结合本研究结果可以说明在秸秆还田过程中,作物秸秆与土壤充分混合后,土壤变得松散,容重降低,土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比提高,因此提高了土壤水分的有效性。

**2.6.4 水分常数与土壤结构的相关性** 从表6、表7可以看出,土壤团聚体平均重量直径(*MWD*)、几何平均直径(*GMD*)都与土壤田间最小持水量、饱和持水量、萎蔫系数、水力传导度呈显著或极显著正相关。在表层土壤土层中,>2 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )与土壤萎蔫系数呈显著正相关。在表面土壤土层中,>2 mm 水稳性团聚体含量( $R_{0.25}$ )与土壤自由水含量、水力传导度、饱和持水量呈显著或极显著正相关。在2个土层中,土壤团聚体破坏率(*PAD*)和不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )与土壤饱和持水量、自由水含量、萎蔫系数、最大分子含水量呈显著或极显著负相关。

土壤内部不同粒径的团聚体中,粒径较大的团聚体在土壤力学结构中起到“骨架”作用,土壤团聚体平均重量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)越大,土壤团聚体的团聚度越高,稳定性越强,土壤结构越好<sup>[27]</sup>。土壤团聚体破坏率(*PAD*)和土壤不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )均为土壤团聚体稳定性指标,其数值越小说明土壤团聚体破坏率越小,土壤结构越稳定<sup>[28]</sup>。

结合本研究结果,可以解释秸秆还田如何增强土壤水分入渗能力,秸秆在土壤中被分解后,土壤有机质含量增加,容重降低,增加了土壤颗粒的比表面积,改善了土壤的胶体状况,对土壤结构进行了优化,增强了土壤结构的稳定性,增加了土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比,土壤水分入渗能力得到了增强。

## 3 讨论

### 3.1 秸秆还田对土壤水分特性的影响

农作物残渣的结构蓬松,当它被施用在土壤中

的时候,能够改变土壤理化性质,提高土壤的含水量,从而达到储水、保墒、抗旱的效果<sup>[29]</sup>。一般情况下,秸秆碳氮比较高,腐解速度慢,可以较好地抵抗雨水的冲击,降低土壤水分的蒸发量和径流量<sup>[30]</sup>,是一种多用途资源<sup>[31]</sup>,在作物生长的后期,大部分的秸秆都被分解,这样能够显著地增加土壤有机质含量和储水量<sup>[32]</sup>,随着时间的推移,土壤和秸秆的结合越来越充分,分解也逐渐完全,营养物质被充分释放,使土壤有机质含量提高,土壤蓄水保水能力因此得以提升<sup>[33-36]</sup>。本研究结果显示,秸秆翻埋还田处理对土壤蓄水能力的提高效果最好,而部分土层秸秆条带还田处理的土壤有机质含量、比水容量、水力传导度与对照相比没有显著提高,甚至出现了降低的情况,分析原因可能是耕作时机械器材没能将土壤的犁底层打破,若打破犁底层,会加速秸秆与土壤的融合,秸秆的分解速度也会随之加快,使养分得到充分的释放,提高土壤有机质含量,有机质含量的提升又可以优化土壤结构<sup>[21]</sup>,增加土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比,促进土壤水分运动,提高土壤有效水含量,土壤的蓄水和供水能力得到了增强。土壤比水容量值可以很好地代表土壤供水能力,比水容量值越大,土壤的供水能力越强<sup>[13]</sup>,本研究结果显示,秸秆翻埋还田处理对土壤比水容量值的提升幅度较大,也就是说,对土壤供水能力的增强效果最好,这与张文可等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。本研究结果显示,在表层土壤土层中,秸秆条带还田处理的土壤自由水含量与对照相比有所降低,原因可能是降雨量、温度的影响,本研究的试验田属于半干旱地区,降雨量少,且秸秆在还田时也没有彻底覆盖在土面,秸秆所释放的有机物质没能和土壤矿物充分结合,影响土壤结构<sup>[38-39]</sup>,导致土壤水分的运动能力变差。本研究结果显示,秸秆还田可以显著提高土壤黏粒含量,降低土壤粉粒含量,分析原因可能是土壤黏粒颗粒较小,秸秆还田后,黏粒先与秸秆发生黏结,土壤紧实度得以提升,在风蚀及雨水的冲刷下黏粒产生堆积,而粉粒颗粒较大,未能及时与秸秆黏结,造成了土壤粉粒流失。相关研究表明,土壤有机质的含量与黏粒的含量呈正比<sup>[40]</sup>,为了防止土壤有机物质变多而被分解,可增大土壤黏粒含量,利于吸附有机质,与腐殖质结合形成复合体,同时,秸秆的腐解可以产生草酸、酒石酸、苹果酸等有机酸,这些有机酸在一定程度上可以促进土壤黏粒矿

物的转化<sup>[41]</sup>,使土壤黏粒含量得到提升。综上所述,秸秆翻埋还田处理可显著提高土壤有机质含量,降低土壤容重,提高土壤总孔隙占比、大孔隙占比、中孔隙占比,从而加快大团聚体的形成,改善土壤结构,这与陈盛等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。说明秸秆翻埋还田方式适合中国东北地区,本研究为农民选择合适的秸秆还田方式提供了科学指导。

### 3.2 秸秆还田对土壤水分特性的影响机制

秸秆还田可以提高土壤有机质含量,降低土壤容重,防止土壤板结,为作物生长提供有利的条件<sup>[42-48]</sup>。本研究结果显示,土壤有机质含量与土壤水力传导度、自由水含量、最大分子含水量、田间最小持水量、饱和持水量、萎蔫系数都呈显著或极显著正相关,土壤容重与土壤萎蔫系数、自由水含量、最大分子含水量都呈显著或极显著负相关,说明土壤有机质含量和容重与土壤水分常数紧密相连,土壤有机质含量的增大和容重的减小导致大孔隙占总孔隙的比例增大,土壤水库库容增大,土壤的蓄水和供水能力得到增强,土壤容重和各孔隙占比对土壤含水量有重要影响,与孙媛媛<sup>[49]</sup>的研究结论一致。本研究结果显示,土壤黏粒含量与土壤水力传导度、萎蔫系数、饱和持水量、自由水含量、田间最小持水量、最大分子含水量呈显著或极显著正相关;土壤粉粒含量与土壤自由水含量、饱和持水量、水力传导度、田间最小持水量呈显著或极显著负相关,说明土壤黏粒含量与土壤水分常数紧密相连,当秸秆在土壤中分解后,增加了土壤颗粒的比表面积,黏粒含量增加,而黏粒具有丰富的细小孔隙,增强了土壤对水分吸收的能力,土壤的蓄水能力得到提升。本研究结果显示,土壤团聚体平均重量直径(*MWD*)、几何平均直径(*GMD*)都与土壤田间最小持水量、饱和持水量、萎蔫系数、水力传导度呈显著或极显著正相关,土壤团聚体破坏率(*PAD*)和不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )与土壤饱和持水量、自由水含量、萎蔫系数、最大分子含水量呈显著或极显著负相关,与杨欣坤<sup>[50]</sup>的研究结果一致,说明土壤结构与土壤水分常数紧密相连,秸秆中有机物进入土壤,改善土壤胶体状况,对土壤结构进行了优化,土壤水分入渗能力得到了增强。结合秸秆还田对土壤水分特性的影响和相关性分析结果,可以得出秸秆还田对土壤水分影响的作用机理:秸秆在土壤中被分解后,土壤有机质含量增高,容重降低,大大增加了土壤颗粒的比表面积,土

壤中黏粒含量增多,总孔隙、大孔隙、中孔隙的占比提高,土壤结构得到了优化,综合提高了土壤的储水和供水能力,加强了土壤对水分的吸收和利用。

### 参考文献:

- [1] 丁凯鑫,王立春,田国奎,等. 马铃薯生长及生理特性对水分胁迫的响应研究[EB/OL]. (2022-03-16) [2023-03-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20230209.1527.012.html>.
- [2] 甘磊,郑思文,黄大庆,等. 桂林喀斯特地区干湿循环过程中土壤水含量的空间变异[J]. 南方农业学报,2017,48(9):1587-1593.
- [3] GAO F F, ZHANG Y, HE Y, et al. Risk assessment of drought in the yangtze river delta based on natural disaster risk theory[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*,2017,2017(2):1-7.
- [4] 李臻,季民,李云岭,等. 山东省干旱灾害风险评估与区划研究[J]. 人民长江,2023,54(1):80-87.
- [5] 杨俊彦,陈印军,王琦琪. 东北三省区耕地资源与粮食生产潜力分析[J]. 土壤通报,2017,48(5):1055-1060.
- [6] 吴金华,盛芝露,杜加强,等. 1956-2017年东北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究,2021,28(3):340-347.
- [7] 王晓丹. 标准化植被干旱指数在东北地区的构建与应用[D]. 兰州:西北师范大学,2021.
- [8] 陈盛,黄达,张力,等. 秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报,2022,41(6):1-11.
- [9] AN J P, LI C F, QI H, et al. Effects of straw strip returning on spring maize yield, soil moisture, nitro-gen contents and root distribution in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2018,44(5):774.
- [10] 李玉梅,王根林,孟祥海,等. 不同耕作方式对土壤水分和养分变化的影响[J]. 东北农业大学学报,2019,49(9):54-60.
- [11] LIN W, LIU W Z, XUE Q W. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*,2017,15(7):38995.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 1版.北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] ALLAIRELEUNG S E, GUPTA S C, MONCRIEF J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*,2000,41(3/4):303-315.
- [14] 陈学文,张晓平,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.
- [15] TABOADA M A, MICUCCI F G, COSENTINO D J, et al. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina[J]. *Soil and Tillage Research*,1998,49(1):57-63.
- [16] SCHJONNING P, RASMUSSEN K J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils[J]. *Soil and Tillage Research*,2000,57(1/2):69-82.
- [17] HILL R L, HORTON R, CRUSE R M. Tillage effects on soil water

- retention and pore size distribution of two Mollisols1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(5): 1264-1270.
- [18] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 2004(3): 53-56.
- [19] MOUAZEN A M, RAMON H. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(2): 218-229.
- [20] HOLLIS J M, LILLY A, HIGGINS A, et al. Predicting the water retention characteristics of UK mineral soils[J]. European Journal of Soil Science, 2015(1): 239-252.
- [21] KAY B D, VANDENBYGAART A J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 107-118.
- [22] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种土壤的持水性质[J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 277-281.
- [23] 邹 诚, 徐福利, 月亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 424-427.
- [24] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLUTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review[J]. Geoderma, 2018, 3028(314): 122-137.
- [25] 蔡位子, 刘怡颖, 江 俊, 等. 土壤孔隙结构检测技术研究现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(5): 627-640.
- [26] 李文凤, 范如芹, 张晓平, 等. 短期免耕对黑土孔隙度的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 26(4): 458-462.
- [27] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228-231.
- [28] 王润泽, 谌 芸, 李 铁, 等. 紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 210-216.
- [29] 李 波, 陈天助, 姚名泽, 等. 东北半湿润地区深埋秸秆周围土壤水分的动态变化[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(9): 51-55.
- [30] 王 婧, 张 莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177-183.
- [31] 伍玉鹏, 彭其安, MUHAMMAD S, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 175-183.
- [32] 张宏媛, 逢焕成, 卢 闯, 等. CT扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 114-122.
- [33] LI R F, RUAN X H, BAI Y, et al. Effect of wheat-maize straw return on the fate of nitrate in groundwater in the Huaihe River Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 2017(592): 78-75.
- [34] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(2): 2695-2702.
- [35] FENG X M, HAO Y B, LATIFMANESH H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of Northeastern China [J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1607-1615.
- [36] 丁瑞霞, 王维钰, 张 青. 两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1106-1118.
- [37] 张文可, 苏思慧, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田模式对东北春玉米根系分布和水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2300-2308.
- [38] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [39] 王 珍, 冯 浩, 吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 533-539.
- [40] 万松华, 胡厚军, 邓桂芹. 浅析土壤有机质含量与土壤物理性能参数的相关性[J]. 农业与技术, 2013, 33(8): 8.
- [41] 王东升, 王 君. 低分子量有机酸作用下土壤矿物钾释放机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(增刊2): 259-261.
- [42] 张 燕, 李亮生, 陈帅伟, 等. 小麦秸秆及其生物炭对植烟土壤养分、酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 213-220.
- [43] 刘丽华, 李 杨, 秦 猛, 等. 膨化秸秆还田对寒地水稻养分积累、转运、分配及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(2): 497-505.
- [44] 胡中泽, 衣政伟, 杨大柳, 等. 氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氨挥发、氮肥利用率及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1492-1499.
- [45] 李国齐, 吴 汉. 免耕与秸秆还田对直播稻产量及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(9): 945-951.
- [46] 陶玥玥, 周新伟, 金梅娟, 等. 湿润稻作体系中还田小麦秸秆分解及土壤活性碳变化特征[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 94-101.
- [47] 张 婷, 张一新, 向洪勇. 秸秆还田培肥土壤的效应及机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(3): 14-20.
- [48] FAN W, WU J G, LI J M, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chemozem in northeast China and maize yield therein [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 835-846.
- [49] 孙媛媛. 秸秆不同还田方式对北方稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [50] 杨乾坤. 松辽平原玉米带主要土壤的水分特征研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.

(责任编辑: 陈海霞)