

秸秆深还田对东北半干旱区土壤
结构及水分特征影响

邹洪涛,王胜楠,闫洪亮,马迎波,范庆锋,黄毅,张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院,农业部东北耕地保育重点实验室,土肥资源高效利用国家工程实验室,辽宁 沈阳 110866)

摘 要:采用定位田间小区试验方法,研究秸秆深还田对东北半干旱区农田土壤结构和土壤水分特征的影响。结果表明,秸秆深还田能够有效地改良土壤结构和土壤水分分布状况。秸秆深还田第 3 年土壤 0~50 cm 层对照处理容重为 1.45 g·cm⁻³,各处理的平均容重为 1.34 g·cm⁻³,土壤容重显著减小;干筛团聚体以 >5 mm 团聚体增加为主占 18.69%~27.20%,抵抗外力破坏而保持原有形态的能力增强;平均重量直径及几何平均直径均较对照和深耕有所提高;施入秸秆量 800 kg·667m⁻²处理的水稳性团聚体稳定率和土壤结构体破碎率降低最为明显。不同处理之间表现出秸秆深还田处理的持水量要高于对照处理。

关键词: 秸秆深还田;土壤结构;团聚体;水分特征

中图分类号: S151.9;S152.3;S157.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)02-0052-09

Effects of straw deep returning on soil structure moisturein
semiarid region of Northeast China

ZOU Hong-tao, WANG Sheng-nan, YAN Hong-liang, MA Ying-bo, FAN Qing-feng, HUANG Yi, ZHANG Yu-long

(College of Land and Environment Shenyang Agricultural University, Key Open Laboratory of
Northeastern Soil and Environment of Ministry of Agriculture, National Engineering Laboratory for
Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: A field experiment was conducted to explore the effects of strawdeep returning on soil structure and moisture in semiarid region of Northeast China. Results indicated a marked influence of straw deep returning on soil structure and moisture distribution. Soil bulk density of the control treatment of three-year returning was 1.34 g·cm⁻³. The average bulk density of each treatment was 1.34 g·cm⁻³. Soil bulk density decreased significantly, in particular >5 mm aggregate particles accounting for 18.69%~27.20%. Results revealed improved ability to resist external force damage, increased mean weight diameter and geometric and reduction of water – stable aggregates stability rate and soil structure breakage for the treatment of returning 800kg·hm⁻². In addition, soil water holding capacity was higher than the control treatment.

Keywords: straw deep returning; soil structure; soil aggregate particle; soil moisture

近些年,国内外关于不同秸秆利用方式改善土壤结构的研究较多,大量研究表明,向土壤中增施有机质和土壤改良剂能够显著改善土壤结构,进而改良土壤水分特性^[1]。农作物秸秆作为有机质增施到土壤中不但可以改善土壤结构、提高土壤肥力和作物产量,还可以使有限的天然降水就地拦截入渗,提高雨水资源利用率和旱地蓄水保墒性能,从而达到抗旱增产的目的^[2-3]。尽管如此,目前关于秸秆深还田对土壤结构改善和土壤水分特性的研究却少见报道。孔德刚等^[4]对坡耕地中秸秆深施蓄水效果进行了研究,发现秸秆深施还田后能够充分发挥“土壤水库”的蓄雨纳墒能力。杜璇^[5]通过对粉碎秸秆还田水分性状的研究发现长秸秆的保水效果要比粉末状秸秆还田效果好。因此,本研究以地处辽宁西部

收稿日期:2013-07-05
基金项目:农业部公益性行业专项(201303125,200903007);国家科技支撑计划项目(2012BAD05B01,2011BAD09B02);国家 973 项目(2011CB100502);辽宁省科技农业攻关重大项目(2011213001)
作者简介:邹洪涛(1975—),男,辽宁营口人,教授,博士,研究方向为土壤改良与农业节水、新型肥料研发与应用。E-mail: zouhongtao2001@163.com。
通信作者:张玉龙,男,辽宁朝阳人,教授,博士,从事土壤改良与农业节水研究。E-mail: ylzhangsau@163.com。

的阜新国家旱作农业示范区为研究对象,探讨秸秆还田后不同深度土壤结构和土壤水分特性的变化,旨在提高辽西北地区的雨水资源利用效率,从而为东北半干旱地区发展旱作农业提供理论依据,为更新和改善当地旱作技术体系提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地基本概况

试验于辽宁省阜新市阜蒙县农业技术推广中心的试验基地(北纬 42°10', 东经 122°00')进行,属于北温带大陆性半干旱季风气候,位于内蒙古高原和东北辽河平原的中间过渡带,属辽宁西部的低山丘陵

区。四季分明、光照充足且昼夜温差较大,但降水偏少。试验区年降水量 450 ~ 500 mm、全年蒸发量高达 1 599.6 mm,蒸发量约为降雨量的 3.5 倍,多年平均气温为 7.1℃ ~ 7.6℃,大于和等于 0℃ 积温为 3 764℃,无霜期 154 d,年日照时数 2 762.4 h^[6]。

1.2 试验材料

供试土壤:试验区土壤为褐土,质地为粉砂土。供试土壤基本性质见表 1。

供试秸秆:玉米秸秆,取自当地秋收后的玉米秸秆。

供试作物:玉米,品种为郑单 958。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Soil properties of the test soil

土壤类型 Soil type	粒级组成 Particle-sized fractions/%			质地 Soil texture	容重 /(g·cm ⁻³)	有机质 /(g·kg ⁻¹)
	砂粒 Sand (2 ~ 0.02 mm)	粉粒 Silt (0.02 ~ 0.002 mm)	黏粒 Clay (< 0.002 mm)			
褐土 Drab soil	59.55	20.36	20.09	砂粉壤土 Sandloam	1.45	8.60

1.3 试验方案

试验于 2009 年 10 月玉米收获后,采用自主研发的深开沟 - 覆土 - 合垄翻转犁开沟,深度为 40 cm,将秋收后的玉米整秸秆按不同秸秆量直接深还田,同时每小区配施化肥尿素 15.667 kg·667m⁻²,磷酸二铵 20 kg·667m⁻²,硫酸钾 15 kg·667m⁻²,后用翻转犁合垄。2009 年秋至 2012 年秋不再扰动土层,即秸秆为一次性施入多年利用,采用免耕方式播种。试验共 6 个处理(如表 2 所示),三次重复,小区面积 60 m²,随机排列,翌年春采用大垄双行的方式在垄台播种玉米。

表 2 试验处理

Table 2 Different treatments of the studied

处理 Treatments	处理方式 Agronomical practices
CK	传统耕作处理作为对照(旋耕 15cm)
DT	深开沟后未施秸秆的深耕(翻耕 40cm)
S1	整秸秆施入量 400 kg·667m ⁻² (翻耕 40cm)
S2	整秸秆施入量 800 kg·667m ⁻² (翻耕 40cm)
S3	整秸秆施入量 1 200 kg·667m ⁻² (翻耕 40cm)
S4	整秸秆施入量 1 600 kg·667m ⁻² (翻耕 40cm)

1.4 测定项目与方法

试验于 2010 年、2011 年、2012 年各自收获后,按 S 型 5 点取土法在 0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 三个土层采集土样,自然风干,过筛备用。

1.4.1 土壤理化性质测定

1) 土壤容重:作物收获后采用环刀法,在不同处理土层按秸秆上土层(0 ~ 15 cm),施秸秆土层(15 ~ 30 cm),秸秆下土层(30 ~ 50 cm)均取 3 个土样,105℃烘干,3 次重复进行测定;

2) 土壤孔隙度:利用土壤容重数据计算土壤总孔隙度^[7];

3) 土壤大团聚体粒级分布和稳定性利用干筛法和湿筛法测定^[8]。其土壤微团聚体评价计算公式如下^[9-10]:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n X_i \tag{1}$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \tag{2}$$

$$WSAR = WSA/A \times 100\% \tag{3}$$

$$SDR = (DR_{0.25} - WSAR)/DR_{0.25} \times 100\% \tag{4}$$

$$GMD = \exp \left[\left(\sum_{i=1}^n X_i \log W_i \right) / \sum_{i=1}^n X_i \right] \tag{5}$$

式中, $DR_{0.25}$ 为 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数(%); X_i 为对应粒级团聚体质量分数(%); MWD 为团聚体平均重量直径; W_i 为团聚体的平均直径; $WSAR$ 为水稳性团聚体稳定率(%); WSA 为 > 0.25 mm 水稳性团聚体的质量(g); A 为 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体的质量(g); SDR 为构体破碎率(%); GMD 为团聚体几何平均重量直径。 $\sum_{i=1}^n X_i$ 是土壤样品的总重。

1.4.2 土壤水分特性测定

1) 土壤饱和导水率(土壤的稳定入渗速率):环刀法测定^[11];计算公式如下:

$$V = (Q_n \times 10)/(T_n \times S) \tag{6}$$

式中, V 为土壤在某一时刻的入渗速度 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); Q_n 为第 n 次测定时间内注水量 (mL); T_n 为第 n 次测定时间间隔的时间 (min); S 为渗透面面积 (cm^2)。

2) 土壤水分特征曲线:用水头法和压力膜法测定^[12];

采用 spss18.0、Excel2010 处理数据。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田剂量对土壤结构的影响

2.1.1 秸秆深还田对土壤容重及孔隙度变化的影响 连续 3 年秸秆深还田处理对土壤容重的影响如表 3 所示,秸秆还田 1 a 后,即 2010 年秋,0 ~ 15 cm 土层各处理均较 CK 处理有所降低,但差异未达到显著水平,15 ~ 30 cm 土层各处理之间差异较大,S1、S2、S3、S4 处理均低于 DT 处理和 CK 处理,其中 S2、S3 处理分别较 CK 处理显著减小 4.9%、4.09%; S1、S4、DT 处理分别较 CK 处理下降 3.5%、2.1%、1.4%;30 ~ 50 cm 土层各处理均小于 CK 处理但未

呈现显著性差异。秸秆深还田 2 a 后,0 ~ 15 cm 土层各处理均较 CK、DT 处理呈现显著性差异,S1、S2、S3、S4 处理分别较 CK 显著降低 6.94%、7.64%、5.56%、6.25%,分别较 DT 处理显著下降 6.29%、6.98%、4.9%、5.59%;15 ~ 30 cm 土层各处理均较 CK、DT 处理呈现显著性差异,DT 处理和 CK 处理差异不显著,S2 处理和 S1、S4 处理呈现显著差异,表现为 CK > DT > S1 > S4 > S3 > S2;30 ~ 50 cm 土层各秸秆深还田处理较 CK 处理均未呈现显著差异,但各处理均较 CK 处理有所降低,表现为 CK > DT、S4 > S2、S3 > S1。秸秆深还田 3 a 后,0 ~ 15 cm 土层各处理均较 CK、DT 处理呈现显著性差异,与秸秆还田 2 a 后规律相似,表现为 CK > DT > S3 > S4 > S2 > S1;15 ~ 30 cm 土层各处理均较 CK、DT 处理呈现显著性差异,S1、S2、S3、S4 处理分别较 CK 处理显著降低 4.87%、6.89%、5.45%、5.52%,分别较 DT 处理显著下降 4.15%、6.05%、4.65%、4.80%;30 ~ 50 cm 土层各秸秆深还田处理较 CK 处理虽未呈现显著差异,但 S1、S2、S3、S4 处理分别较 CK 处理降低 4.87%、6.89%、5.45%、5.52%,分别较 DT 处理下降 2.53%、2.41%、2.12%、1.81%。

表 3 2010—2012 年秸秆深还田处理下土壤容重及孔隙度
Table 3 Soil bulk density and capillary porosity under straw application treatment in 2010 and 2012

年份 Years	处理 Treatments	容重 Bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			总孔隙度 Total porosity/%		
		0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm
2012	CK	1.45a	1.44a	1.66a	45.28a	44.91a	37.22a
	DT	1.42b	1.43a	1.66a	46.42a	46.17a	37.28a
	S1	1.32c	1.37bc	1.62a	50.19b	48.32b	38.73a
	S2	1.33c	1.34c	1.62a	49.82b	49.16b	38.76a
	S3	1.36d	1.36bc	1.62a	48.60b	48.70b	38.84a
	S4	1.35d	1.36bc	1.63a	48.74b	48.85b	38.35a
2011	CK	1.44a	1.44a	1.66a	45.53a	45.66a	37.22a
	DT	1.43a	1.42ab	1.65a	46.21a	46.43ab	37.62a
	S1	1.32b	1.38b	1.63a	50.32b	47.84bc	38.42a
	S2	1.33b	1.34c	1.64a	49.81b	49.29c	38.05a
	S3	1.36c	1.36bc	1.64a	48.58b	48.74c	37.99a
	S4	1.35c	1.38b	1.65a	48.15b	48.05bc	37.98a
2010	CK	1.36a	1.43a	1.66a	48.68a	46.04a	37.40a
	DT	1.36a	1.41a	1.65a	48.68a	46.79ab	37.55a
	S1	1.34a	1.38ab	1.65a	49.43a	47.92a	37.61a
	S2	1.35a	1.36b	1.65a	49.06a	48.68b	37.82a
	S3	1.36a	1.37b	1.65a	48.72a	48.30b	37.60a
	S4	1.35a	1.40a	1.65a	49.09a	47.26a	37.73a

注:不同小写字母间差异显著($P < 0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level. The same bellow.

秸秆深还田对土壤孔隙度的影响与对容重的影响一致,土壤容重降低时,土壤孔隙度升高。秸秆深还田 1 a 后,0 ~ 15 cm 和 30 ~ 50 cm 土层各处理均较 CK、DT 处理差异不显著,但土壤孔隙度均有所提高,15 ~ 30 cm 土层,S2、S3 处理均较 CK 处理呈现显著差异,表现为 S2 > S3 > S1 > S4 > DT > CK。秸秆深还田 2 a 后,0 ~ 15 cm 土层 S1、S2、S3、S4 处理均高于 DT 处理和 CK 处理且呈显著性差异,其分别较 CK 处理提高 8.57%、9.41%、6.69%、7.51%,较 DT 处理提高 4.95%、7.95%、6.75%、5.23%,15 ~ 30 cm 土层 S1、S2、S3、S4 处理较 CK 处理显著提高4.95%、7.95%、6.75%、5.23%,S2、S3 处理较 DT 处理显著提高 6.16%、4.98%,表现为 S2 > S3 > S4 > S1 > DT

> CK,15 ~ 30 cm 土层各处理没有显著性差异;秸秆深还田 3 a 后,0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30cm 土层各处理均较 CK、DT 处理有显著性差异,30 ~ 50 cm 土层各处理之间差异不显著。总的来说,秸秆深还田能够使土壤平均容重总体上降低,平均孔隙度总体上升高。

2.1.2 不同秸秆深还田施入量对土壤机械稳定性团聚体的影响 土壤团聚体稳定性是评价其质量高低的重要指标,其中土壤团聚体的机械稳定性可用干筛法所测得的各粒级团聚体的含量来反映^[13]。秸秆深还田第三年不同秸秆深还田施入量作用下,不同粒径土壤机械稳定性团聚体分布变化如表 4 所示。

表 4 不同处理对 0 ~ 50 cm 土层不同粒径土壤机械稳定性团聚体分布影响
Table 4 Soil dry sieving aggregate size distribution at 0 ~ 50 cm depth under different treatments

土层 Soil layers /cm	处理 Treatments	机械稳定性团聚体粒径分布 Dry sieving aggregate size distribution/%					
		> 5mm	5 ~ 2mm	2 ~ 1mm	1 ~ 0.5mm	0.5 ~ 0.25mm	> 0.25mm
0 ~ 15	CK	19.04a	13.86a	12.81ab	14.80a	6.52a	67.03a
	DT	19.45a	15.69a	11.44a	13.63a	6.62a	66.83a
	S1	23.75b	14.42a	12.63ab	13.20a	6.83a	70.83ab
	S2	23.15b	15.01a	11.97a	13.41a	6.37a	69.90ab
	S3	23.57b	14.60a	11.83a	13.94a	6.89a	70.82ab
	S4	23.69b	14.98a	13.09b	14.27a	6.63a	72.66b
15 ~ 30	CK	22.04ab	16.16a	12.49ab	13.45a	6.44a	70.58a
	DT	20.85a	16.67a	12.04a	13.01a	8.69b	71.26ab
	S1	23.95ab	15.81a	12.76ab	14.43a	5.91a	72.86b
	S2	23.39ab	15.92a	12.85b	13.61a	5.60a	71.37ab
	S3	23.97ab	15.18a	12.58ab	14.98a	5.41a	72.12b
	S4	24.03b	15.95a	12.93b	14.61a	5.29a	72.81b
30 ~ 50	CK	25.80ab	15.66ab	13.02a	14.22a	6.95a	75.64ab
	DT	22.24b	15.66ab	12.65ab	14.20a	7.14a	71.88a
	S1	27.20a	17.20b	12.88ab	13.06a	6.88a	77.22b
	S2	26.63ab	17.11b	12.73ab	13.31a	6.42a	76.20b
	S3	26.36ab	15.86ab	12.74ab	15.03a	5.93a	75.93ab
	S4	26.38ab	14.92a	11.96b	14.55a	7.96a	75.76ab

0 ~ 15 cm 土层,经过 3 a 秸秆深还田处理,粒径 > 0.25 mm 团聚体平均含量为 69.67%,S4 处理显著高于 CK、DT 处理,其他各处理间差异不显著,其中粒径 > 5 mm 土壤机械稳定性团聚体的含量最高,S1、S2、S3、S4 处理均高于 CK、DT 处理且呈现显著性差异;2 ~ 1 mm 土壤机械稳定性团聚体含量,S4 处理与 DT、S2、S3 呈现显著性差异,其他处理间无明显差异;5 ~ 2 mm、1 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量各处理间均未表现出显著差异;> 0.25 mm 各粒级间土壤机械稳定性团聚体的

平均含量依次为 > 5 mm (22. 11%)、5 ~ 2 mm (14.76%)、1 ~ 0. 5 mm (13. 88%)、2 ~ 1 mm (12.30%)、0.5 ~ 0.25 mm(6.64%)。15 ~ 30 cm 土层,粒径 > 0.25 mm 团聚体含量变化规律与 0 ~ 15 cm 土层相似,仍以粒径 > 5 mm 土壤机械稳定性团聚体的含量最高,S4 处理显著高于 DT 处理,其他处理间差异不显著;2 ~ 1 mm 土壤机械稳定性团聚体含量,S2、S4 处理与 DT 处理呈现显著性差异,其他处理间无明显差异;5 ~ 2 mm、1 ~ 0.5 mm 土壤机械稳定性团聚体含量各处理间无明显差异;0.5 ~ 0.25

mm 土壤机械稳定性团聚体含量,DT 处理显著高于其他处理; $>0.25\text{ mm}$ 各粒级间土壤机械稳定性团聚体的平均含量依次为 $>5\text{ mm}$ (23.04%)、 $5\sim 2\text{ mm}$ (15.94%)、 $1\sim 0.5\text{ mm}$ (14.01%)、 $2\sim 1\text{ mm}$ (12.61%)、 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ (6.22%)。30~50 cm 土层,粒径 $>5\text{ mm}$ 土壤机械稳定性团聚体的含量,S1 处理显著高于 DT 处理,其他处理间差异不显著; $5\sim 2\text{ mm}$ 土壤机械稳定性团聚体含量,S1、S2 处理均显著高于 S4 处理,其他处理间差异不显著; $2\sim 1\text{ mm}$ 土壤机械稳定性团聚体含量,CK 处理与 S4 处理呈现显著性差异,其他处理间无明显差异; $1\sim 0.5\text{ mm}$ 和 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 土壤机械稳定性团聚体含量各处理间均未表现出显著差异; $>0.25\text{ mm}$ 各粒级间土

壤机械稳定性团聚体的平均含量依次为 $>5\text{ mm}$ (25.77%)、 $5\sim 2\text{ mm}$ (16.05%)、 $1\sim 0.5\text{ mm}$ (14.06%)、 $2\sim 1\text{ mm}$ (12.66%)、 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ (6.88%)。

2.1.3 不同秸秆深还田土壤水稳性团聚体剖面分布 良好的水稳性团聚体结构不仅能够满足植物对水分、养分、湿度的需求,更是评价土壤肥力的一个重要指标^[14]。由秸秆深还田土壤水稳性团聚体的剖面分布变化(图 1)可以看出,土壤中水稳性团聚体含量因土层深度、处理方式的不同呈现出不同的变化趋势,但整体均表现为, $1\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级团聚体含量最高, $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体含量次之,其他粒级含量均较低。

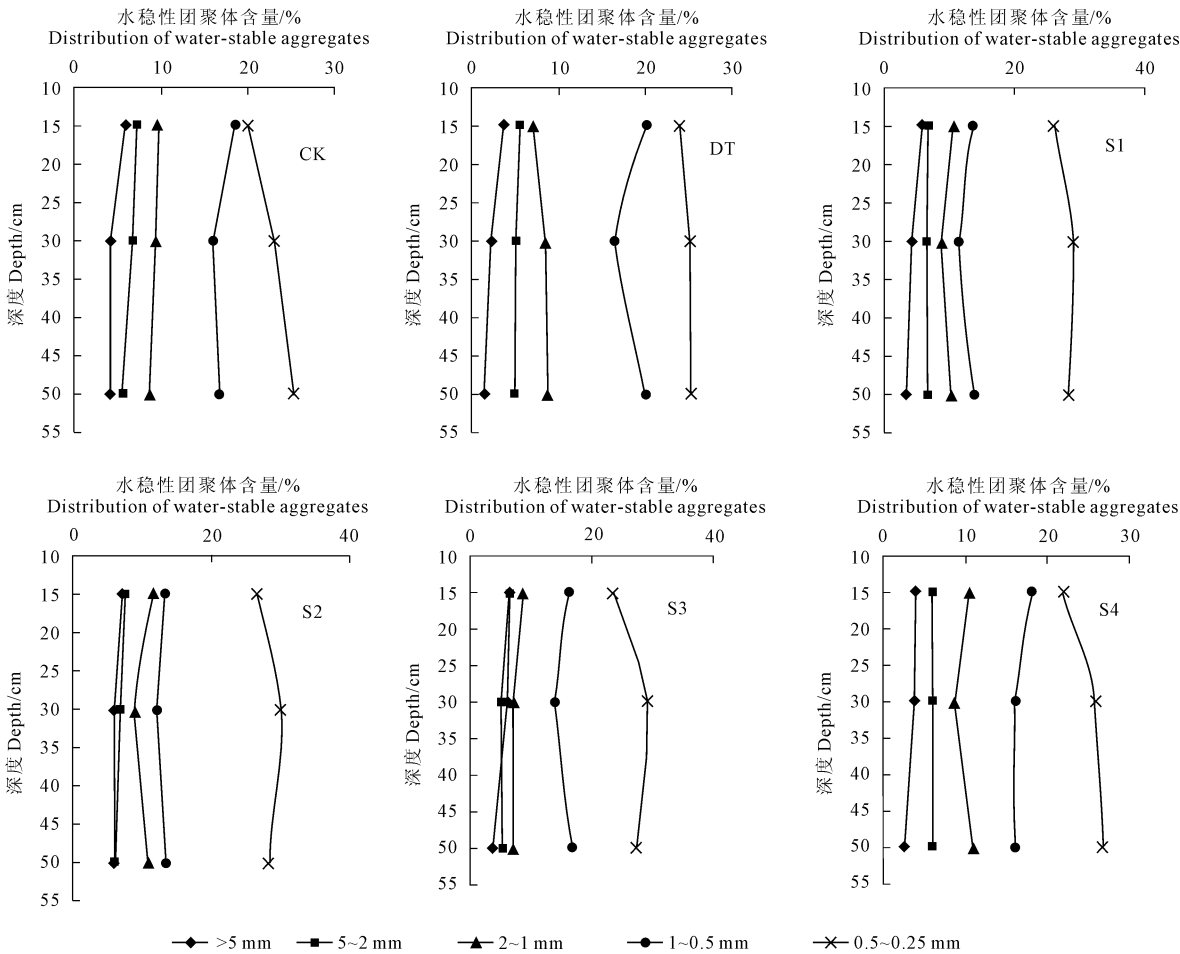


图 1 不同处理土层深度水稳性团聚体的剖面分布
Fig.1 Distribution of sieving aggregates at different soil depth

CK 处理,粒径 $>5\text{ mm}$ 、 $5\sim 2\text{ mm}$ 、 $2\sim 1\text{ mm}$ 的土壤水稳性团聚体含量随土层的深度增加而减少,粒径 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 的剖面变化趋势为先降低后有所增加,粒径 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 则表现出随深度增加而增加的趋势。DT 处理下,粒径 $>5\text{ mm}$ 、 $5\sim 2\text{ mm}$ 的土壤水稳性团聚体含量随土层的深度增加而减少,粒径 2

$\sim 1\text{ mm}$ 和 $1\sim 0.5\text{ mm}$ 剖面变化趋势为随深度先增加后降低,粒径 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 的剖面变化趋势为先大幅度降低后有所增加。S1、S2、S3、S4 处理和 DT 处理表现出相似的趋势。这说明秸秆还田过程中,深开沟过程中所引的起深松效应起了很大作用,但 S1、S2、S3、S4 处理和 DT 处理也有表现趋势不同之

处,S1、S2、S3、S4 处理中,粒径 2 ~ 1 mm、0.5 ~ 0.25 mm 的剖面变化趋势均为先降低后增加,但下降幅度均不及 DT 处理,而粒径 1 ~ 0.5 mm 的剖面变化趋势却表现出随深度加深先大幅度增加后降低。这些和 CK、DT 处理均不同的变化差异,有可能是秸秆深还田后作为有机物料腐解后引起土层中有机质变化的结果。

2.1.4 土壤水稳性团聚体分布与团聚体稳定性评价 土壤团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)常作为反映土壤团聚体粒级分布状况和稳定的的常用指标,平均重量直径为各级团聚体

的综合指标。由表 5 可以看出,秸秆深还田 3 a 后,在 0 ~ 50 cm 土层中 S1、S2、S3、S4 四组秸秆还田处理 DMWD 值均高于 CK 和 DT 处理,且 0 ~ 15 cm 土层和 15 ~ 25 cm 土层均呈现显著性差异。S1、S2、S3、S4 处理 DMWD 值较 CK 处理依次提高 14.72%、13.50%、14.11%、15.95%;15 ~ 25 cm 土层各处理呈现相似规律;30 ~ 50 cm 土层各秸秆深还田处理均高于 CK 处理,但只有 S1 处理差异显著($P < 0.05$)。0 ~ 50 cm 土层的 DGMD 值和 DMWD 值整体规律相似,均较 CK 和 DT 处理有所提高,但 15 ~ 25 cm 土层各处理没有显著性差异。

表 5 不同处理对土壤团聚体稳定性参数的影响
Table 5 Effect of different treatments on stability parameter of aggregates

土层 Soil layers /cm	处理 Treatments	平均重量直径 (干筛) (DMWD)/mm	平均重量直径 (湿筛) (WMWD)/mm	几何平均直径 (干筛) (DGMD)/mm	几何平均直径 (湿筛) (WGMD)/mm	水稳性团聚体 稳定率 (WSAR)/%	结构体破 碎率 (SDR)/%
0 ~ 15	CK	1.63a	0.81a	0.83a	0.64ab	91.83a	8.17a
	DT	1.68a	0.65b	0.84a	0.61a	90.57a	9.43ab
	S1	1.87b	0.82a	0.90b	0.66ab	89.50a	10.50b
	S2	1.85b	0.91c	0.89b	0.68b	94.68b	5.32c
	S3	1.86b	0.81a	0.89b	0.64ab	86.71c	13.29d
	S4	1.89b	0.69b	0.91b	0.62a	83.74d	16.26e
15 ~ 25	CK	1.83a	0.71a	0.89a	0.63ab	84.72ab	15.28a
	DT	1.80a	0.58b	0.88a	0.60a	80.78b	19.22b
	S1	1.92b	0.73a	0.92a	0.64ab	83.02ab	16.98a
	S2	1.89b	0.82c	0.91a	0.66b	89.30c	10.70c
	S3	1.90b	0.76a	0.91a	0.64ab	85.19ac	14.81a
	S4	1.93b	0.67ab	0.93a	0.62a	83.26ab	16.74a
35 ~ 50	CK	2.01a	0.69a	0.95ab	0.62a	80.26a	19.74a
	DT	1.83b	0.54b	0.90a	0.60a	84.20b	15.80b
	S1	2.12c	0.70a	0.99b	0.64ab	81.10ab	18.90a
	S2	2.08ac	0.80c	0.97ab	0.66b	84.54b	15.46b
	S3	2.04a	0.65a	0.96ab	0.61a	79.44a	20.56a
	S4	2.01a	0.64a	0.95ab	0.62a	82.43ab	17.57ab

湿筛团聚体 WMWD 值变化较大,0 ~ 15 cm 土层只有 S2 处理较 CK 和 DT 处理显著提高,其他处理或差异不明显,或显著低于 CK 处理,其中 S4 处理和 DT 处理差异不显著,这种规律在 15 ~ 25 cm 土层和 25 ~ 50 cm 土层表现一致,说明秸秆深还田 3 a 后深耕作用仍有影响;WGMD 值与 WMWD 值整体规律一致,各处理间差异更小。说明秸秆深还田后能明显增大土壤团聚体平均重量直径,增强土壤团聚体稳定性。团聚体含量在大粒级上的分布增多,孔隙度提高。

水稳性团聚体稳定率和结构体破坏率是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,一般而言,数值越高,

团聚体越稳定,越有益于土壤结构的稳定和作物的生长,结构体破碎率则相反^[15]。由表 5 可知,各处理 0 ~ 50 cm 土层水稳性团聚体稳定率(WSAR)呈现不同趋势,在 0 ~ 15 cm 土层,各 CK 和 DT 处理的 WSAR 值相对较大,显著($P < 0.01$)高于 S3、S4 处理,显著低于 S2 处理,但和 S1 处理没有显著差异,15 ~ 30 cm 土层除 S2 处理 WSAR 值显著高于 DT 处理外,其他各处理间差异不显著。30 ~ 50 cm 土层 S2 处理较 DT 处理处理没有显著差异,较 CK 处理显著提高。各处理间的水稳性团聚体稳定率没有显著差异。秸秆深还田 3 a 后,各处理 0 ~ 15 cm 土层土壤结构体破碎率(SDR)值除 S2 处理外,均显著高于

CK 处理,S2 处理显著低于 CK 处理;15 ~ 30 cm 土层 SDR 值较 DT 处理降低,S2 处理降低最为明显,较 DT 显著降低 22.9%;30 ~ 50 cm 土层 S2 处理显著低于 CK 处理。说明秸秆深还田可以降低土壤结构体破碎率,有利于提高土壤结构体的稳定性。

2.2 不同处理对土壤水分特征的影响

2.2.1 土壤入渗特性及导水特征 土壤入渗特性决定着降水转换为土壤水的速度和分布,直接影响着降水的利用效率。大量研究表明,土壤达到稳定入渗时入渗率近似于饱和导水率,可以通过对饱和导水率的测定来研究土壤的入渗特性^[16-17]。

由表 6 可知,0 ~ 15 cm 土层初始入渗时,各秸秆

深还田处理入渗率均高于 CK 处理,且差异显著($P < 0.01$),表现为 $S1 > S2 > S4 > DT > S3 > CK$ 。随着入渗的进行,水分入渗率逐渐减小,S1 处理下降最快,所需达到稳定入渗的时间最长,CK 处理下降最缓,达到稳定入渗的时间也最短,稳定入渗速率表现为 $S2 > S1 > S4 > S3 > DT > CK$,且各处理和 CK 处理均呈现显著或极显著差异。表明秸秆还田能够提升土壤的入渗速率,但达到稳定入渗的时间变长,且并不是秸秆还田施入量越大,入渗速率越大,而是秸秆施入量较小的,表现较好,施入量较大的稍高于 DT 处理但差异不显著,形成这种状况的原因可能与孔隙度的分布和黏粒含量的多少有关。

表 6 不处理对土壤入渗特性的影响

Table 6 Effects of different treatments on soil water infiltration features

土层 Soil layers /cm	处理 Treatments	初始入渗率 Initial infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	开始 5min 入渗率 5min infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	开始 10min 入渗率 10min infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	开始 30min 入渗率 30min infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	稳定入渗率 Stable infiltration rate /(mm·min ⁻¹)	稳定入渗 所需时间 Stable infiltration time/min
0 ~ 15	CK	0.91Aa	0.86Aa	0.71Aa	0.61Aa	0.60Aa	40
	DT	1.13Bb	1.02Bb	0.94Bb	0.79Ab	0.75Ab	51
	S1	1.59Cc	1.43Cc	1.31Cc	1.13Bc	1.12Bc	55
	S2	1.48Dd	1.43Cc	1.32Cc	1.14Bc	1.13Bc	50
	S3	1.12Bb	1.02Bb	0.97Bb	0.82Ab	0.81Ab	46
	S4	1.14Bb	1.01Bb	0.98Bb	0.92ABb	0.87Ab	51
15 ~ 25	CK	0.75Aa	0.65Aa	0.57Aa	0.55Aa	0.53Aa	46
	DT	1.02Bb	0.94Bb	0.87Bb	0.79Bb	0.76Bb	45
	S1	1.17Bc	1.12Cc	1.07Cc	0.89Cc	0.85Bb	43
	S2	1.32Cd	1.27Dd	1.16Dd	0.98Cd	0.92Bc	56
	S3	1.18Bc	1.16Cc	1.01Cc	0.97Cd	0.92Bc	53
	S4	1.21Bc	1.17Cc	1.02Cc	0.99Cd	0.95Bc	47
35 ~ 50	CK	0.21Aa	0.17Aa	0.15Aa	0.15Aa	0.15Aa	30
	DT	0.26Ab	0.20Aab	0.18Aa	0.16Aa	0.17Aa	40
	S1	0.28Ab	0.22Aab	0.21Aa	0.18Aa	0.18Aa	46
	S2	0.28Ab	0.24Ab	0.22Aa	0.21Aa	0.21Aa	48
	S3	0.29Ab	0.24Ab	0.22Aa	0.21Aa	0.21Aa	43
	S4	0.26Ab	0.22Aa	0.21Aa	0.20Aa	0.20Aa	45

注:各列不同大写字母间差异极显著($P < 0.01$),不同小写字母间差异显著($P < 0.05$)。
注:Different capital and lowercase letter indicate significant difference at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively.

15 ~ 30 cm 土层与 0 ~ 15 cm 土层规律相似,初始入渗时,各秸秆深还田处理入渗率均高于 CK 处理,且差异显著($P < 0.01$),表现为 $S2 > S4 > S3 > S1 > DT > CK$ 。随着入渗的进行,水分入渗率逐渐减小,S2 处理下降最快,所需达到稳定入渗的时间最长,CK 处理下降最缓,达稳定入渗速率时表现为各处理较 CK 处理差异显著($P < 0.01$),且 S2、S3、S3 处理显著($P < 0.05$)高于 DT 和 S1 处理。30 ~ 50 cm

土层初始入渗时,各秸秆深还田处理入渗率均高于 CK 处理,且差异显著($P < 0.05$),达到稳定入渗时,稳定入渗率差异不显著。

2.2.2 不同处理对土壤持水性及水分特征曲线的影响 由图 2 可知,秸秆深还田第 3 年,0 ~ 15 cm 土层,随着土壤水吸力的增加,1 ~ 10 kPa 内 S3、S4 变化一致,S1、S2 变化一致。10 ~ 1 500 kPa 内 S2、S3 变化一致,土壤含水量相近,S1、S4 均大幅下降,在

高吸力段 S4 处理的土壤含水量要低于 DT; 在 1 500 kPa 时发现, 各处理含水量均高于 CK, 由大到小次序依次是: S2 > S1 > S3 > DT > S4 > CK。15 ~ 30 cm 土层, 随着土壤水吸力的增加, 低吸力段 1 ~ 100 kPa 内各处理下降趋势一致, 100 kPa 时, 表现为: S2 > S3

> S1 > S4 > DT > CK。在 100 ~ 1 500 kPa 内 S1 处理下降幅度稍大, 在 1 500 kPa 时, 各处理含水量均高于 CK 处理, 表现为: S3 > S2 > S4 > S1 > DT > CK。30 ~ 50 cm 土层, 在 1 500 kPa 时, 各处理含水量均高于 CK 处理, 表现为: S2 > S4 > S3 > S1 > CK > DT。

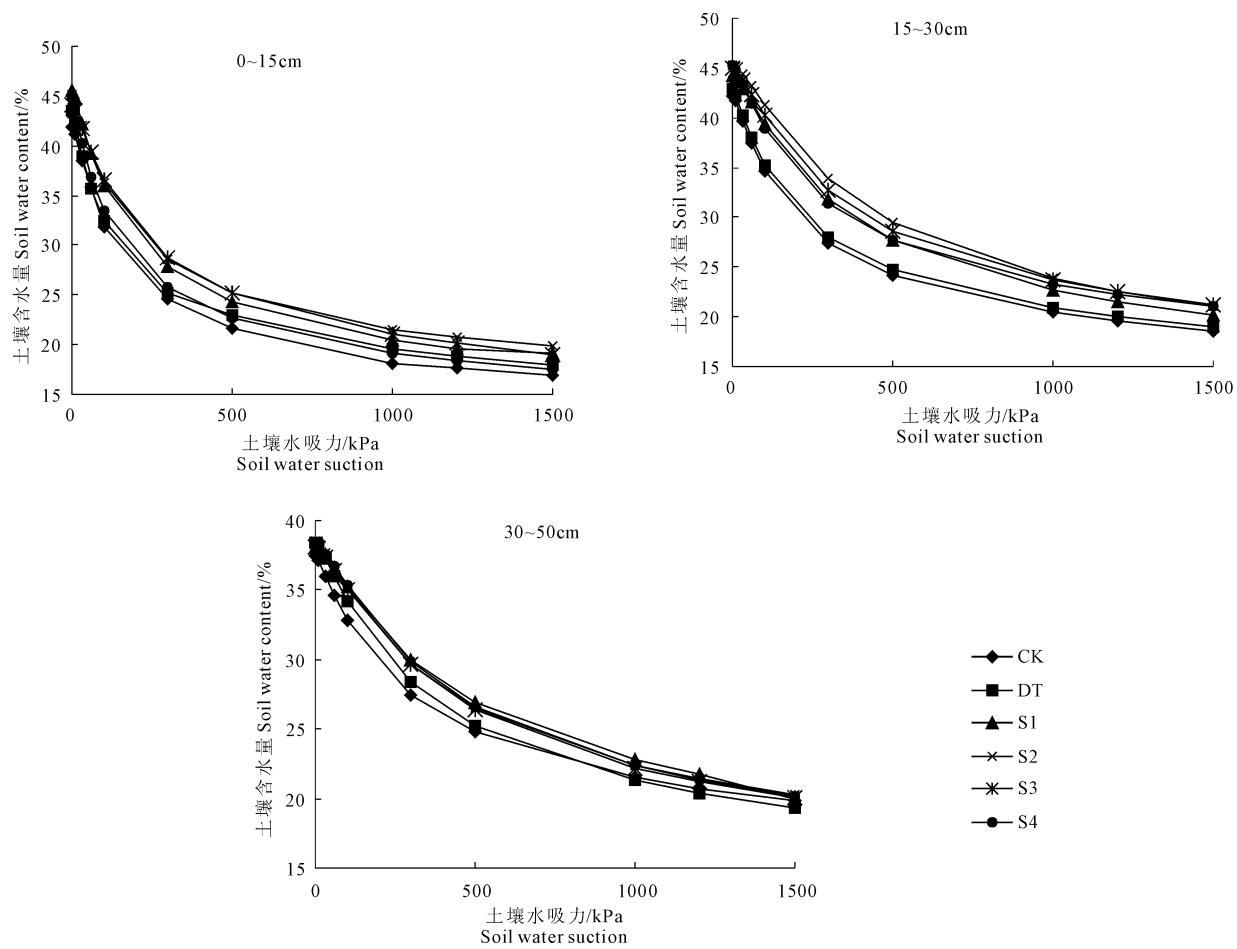


图 2 不同土层土壤水分特征曲线

Fig.2 Characteristic curves of soil moisture at different depth

3 结论与讨论

1) 秸秆深还田后对土壤容重和孔隙度的影响较大, 明显降低了土壤容重, 增加了土壤孔隙度; 随着各处理年限的增长, 不同秸秆施入量处理间影响程度逐渐趋于一致, 且表现出时间越长秸秆施入量越大对土壤容重和孔隙度的影响越强, 秸秆深还田第 3 年时, 0 ~ 50 cm 土层 400 kg · 667m⁻² 处理、800 kg · 667m⁻² 处理、1 200 kg · 667m⁻² 处理、1 600 kg · 667m⁻² 处理分别平均较对照降低 5.48%、5.92%、4.82%、4.81%, 较深耕处理下降 4.22%、4.67%、3.56%、3.54%, 可明显改善土壤耕层通气环境和透水性。这种状况可能与秸秆腐解后土壤中有有机质含量增加^[18] 以及不同耕作方式对土壤结构

的影响^[19] 有关, 这与王增丽^[20] 等人关于长秸秆还田后的土壤容重变化的结论一致。

2) 机械稳定性团聚体的各处理均以大团聚体 (>0.25 mm) 为主, 团聚性较好; 不同秸秆深还田施入量均以粒径 > 5 mm 团聚体增加为主, 400 kg · 667m⁻² 处理、800 kg · 667m⁻² 处理、1 200 kg · 667m⁻² 处理、1 600 kg · 667m⁻² 处理分别平均较对照增加 11.31%、9.42%、10.51%、11.55%, 较深耕处理增加 18.98%、16.97%、18.15%、19.26%, 增强了抵抗外力破坏而保持原有形态的能力。秸秆深还田各处理的 MWD 及 GMD 整体规律一致; WSAR 和 SDR 呈现不同趋势, 以施入量 800 kg · 667m⁻² 处理降低最为明显。这可能与一次性施入秸秆还田多年利用及采用免耕方式播种不扰动土壤有关^[21], 使得土壤中的有

机质增加的同时,保证较低的矿化率,增强了稳定性胶结剂的产生,有利于大团聚体的形成稳定,说明秸秆深还田具有团聚形成效应。

3) 土壤持水性和入渗性受到土壤结构的影响^[22-23],各处理之间表层的稳定入渗率差异较大;随着土层的加深,稳定入渗率差异变小,在深土层差异不显著。不同处理之间表现出秸秆深还田处理的持水量要高于对照处理,土层越深,这种对土壤持水量的影响越小;在 1 500 kPa 萎蔫含水量,虽各处理均有较大降低,但秸秆深还田处理的持水量较对照处理要大。

参 考 文 献:

[1] 潘英华,雷廷武,张晴雯,等.土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J].农业工程学报,2003,19(4):37-39.

[2] Mobaty M, Saoayopadhyay K K, Painuli D K, et al. Water transmission characteristics of a vealisol and water use etfleiency of rainfed soybean (L.)Merr.) under subsoiling and manuring[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93:420-428.

[3] 蔡太义,黄会娟,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[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):108-114.

[4] 孔德刚,张 帅,常晓慧,等.坡耕地中秸秆深施蓄水效果的试验研究[J].东北农业大学学报,2011,42(2):48-53.

[5] 杜 璇.粉碎秸秆还田用量对土壤主要物理化学性状和作物生长的影响[D].杨凌:西北农林科技大学.2011.

[6] 张玉龙,邹洪涛,杨 宇,等.辽西半干旱地区春播前土壤墒情变化的研究[J].水土保持学报,2004,18(6):179-182.

[7] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1983:62-126.

[8] Limon - Ortega A, Govaerts B, Deckers J, et al. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat - maize planting system after 12 years[J]. Field Crops Research, 2006,97:302-309.

[9] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and

stability:tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois[J]. Soil and Tillage Research, 1998,49:173-183.

[10] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等.同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(5):85-94.

[11] 蔡进军,李生宝,蒋 齐.宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J].水土保持通报,2010,30(1):22-26.

[12] 诸葛玉平,张玉龙,李爱峰,等.保护地番茄栽培渗灌灌水指标的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):53-56.

[13] 祁迎春,王益权,刘 军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.

[14] 籍增顺,张乃生,刘 杰.旱地玉米免耕整秸秆半覆盖技术体系及其评价[J].干旱地区农业研究,1995,13(2):14-19.

[15] 李爱宗,张仁陟,王 晶.耕作方式对黄绵土水稳定性团聚体形成的影响[J].土壤通报,2008,39(3):481-484.

[16] 王玉霞.不同供水条件下紫色土入渗影响因素研究[D].重庆:重庆大学,2011.

[17] 郭晓霞,刘景辉,田 露,等.轮作条件下免耕对黄土高原旱作土壤水分入渗特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(10):112-117.

[18] 徐 萌,张玉龙,黄 毅,等.秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):153-156.

[19] 高建华,张承中.不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):192-196.

[20] 王增丽,王 珍,冯 浩.秸秆粉碎氮化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J].农业工程学报,2011,27(11):211-215.

[21] 李 涵,张 鹏,贾志宽.渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):27-33.

[22] 张保华,刘子亭,何毓蓉,等.应用分形维数研究土壤团聚体与低吸力段持水性的关系[J].土壤通报,2006,37(5):857-860.

[23] 罗珠珠,黄高宝,张国盛.保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):7-11.