

深松和秸秆还田对灌耕灰钙土团聚体特征的影响

温美娟,杨思存,王成宝,霍琳,姜万礼
(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所,甘肃兰州 730070)

摘要:2015—2017 年设置传统旋耕秸秆不还田(RT)、深松 35 cm 秸秆不还田(ST)及深松 35 cm 秸秆还田(STS)3 个处理,应用干筛法和湿筛法对 0~40 cm 土层团聚体数量、组成和稳定性进行研究。结果表明,STS 能促进土壤大团聚体的形成并促进团聚体的稳定,深松和秸秆还田均可显著影响团聚体数量和大小($P<0.05$)、促进不同粒级团聚体更新转化。干筛法下,0~40 cm 土层,STS 处理最佳,>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量($DR_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)较 RT 分别增加 3.0%、9.5%和 15.5%,分形维数(D)降低 4.5%。湿筛法下,STS 处理的 $WR_{0.25}$ (>0.25 mm 水稳性团聚体含量)、 MWD 、 GMD 较 RT 分别增加 45.2%、12.0%和 9.1%, D 值降低 1.1%。干筛法和湿筛法下,不同土层均以 0~10 cm 土层 $R_{0.25}$ (直径>0.25 mm 团聚体含量)、 MWD 、 GMD 值 STS 较 RT 的增幅最大,干筛法下,分别增加 8.6%、18.0%、25.3%,湿筛法下,分别增加 67.7%、25.0%、12.5%,此外,STS 较 RT 和 ST 处理可显著降低 0~40 cm 土层团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数(E_{LT}), PAD 分别降低 8.6%、2.4%, E_{LT} 降低 7.0%、1.5%。综合分析认为,STS 更有利于土壤团聚体含量的增加及土壤结构的形成与稳定。

关键词:土壤团聚体;深松;秸秆还田;灌耕灰钙土

中图分类号:S152.3;S34 **文献标志码:**A

Effects of subsoiling and straw returning on soil aggregates of irrigated sierozem farmland

WEN Meijuan, YANG Sicun, WANG Chengbao, HUO Lin, JIANG Wanli

(Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agriculture Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Three treatments were set up in 2015–2017 including traditional rotary tillage without straw returning (RT), subsoiling 35 cm without straw returning (ST), and subsoiling 35 cm straw returning (STS). Samples were collected from 0~40 cm soil layer and dry screening and wet sieve methods used for studying the composition of soil aggregates, the number of aggregates > 0.25 mm ($R_{0.25}$), the average weight diameter (MWD), the geometric mean diameter (GMD), the aggregate destruction rate (PAD), the aggregate instability coefficient (E_{LT}), and the fractal dimension (D). The results showed that comparing with RT and ST, STS promoted the formation and stability of aggregates in 0~40 cm soil layer, and the number and size of aggregates were significantly affected by subsoiling and straw returning ($P<0.05$), which promoted the renewal and transformation of aggregates with different particle size. In 0~40 cm soil layer, with dry sieving method, $DR_{0.25}$ (>0.25 mm mechanical stability aggregate content), MWD , and GMD of STS increased by 3.0%, 9.5%, and 15.5% and the fractal dimension decreased by 4.5% compared with RT. With wet sieving method, $WR_{0.25}$ (>0.25 mm water stable aggregate content), MWD , and GMD of STS increased by 45.2%, 12.0%, and 9.1% comparing with RT, and the fractal dimension decreased by 1.1% compared to RT. Meanwhile, in stratification, the amplification of STS in 0~10 cm soil layer was the largest than that of RT, with $DR_{0.25}$, MWD , and GMD was 8.6%, 18.0%, and 25.3%, respectively, in dry sieving method. Wet sieving was the same as the dry sieve, and in 0~10 cm soil layer, the amplification of STS of $DR_{0.25}$, MWD ,

and GMD increased 67.7%, 25.0%, and 12.5% comparing to that of RT. In addition, STS significantly decreased PAD and E_{LT} compared ST and RT in 0~40 cm soil layer, PAD decreased by 8.6% and 2.4%, E_{LT} decreased by 7.0% and 15%, respectively. Overall, STS promoted the increase of content and stability of soil aggregate, and also promoted the formation and stability of soil structure.

Keywords: soil aggregate; subsoiling; straw returning; irrigated sierozem soil

引黄灌区是甘肃省重要的商品农业生产基地,拥有黄河及众多支流水源,农田实灌面积达 $3.845 \times 10^5 \text{ hm}^2$,极大地改善了该区农业生产条件^[1]。但该区处于旱地农业向荒地牧地过渡区,土壤以灰钙土为主,土壤盐渍化现象严重,土壤风蚀蒸发量大,生态环境极其脆弱,土壤生产力低^[2]。土壤耕作是用现代机具对土壤进行机械操作,该区传统的翻耕、浅旋耕等由于耕作深度浅且对土壤耕层扰动较大,使得上土层粉化,下土层压实,土壤团粒结构破坏,加剧了土壤退化,同时由于作物秸秆被弃置或露天焚烧,使得有机资源浪费严重,增加了环境负担^[3-4]。因此,研究不同耕作措施与秸秆还田对土壤物理性状的影响,对于改善甘肃沿黄灌区耕地土壤结构,提高土壤生产力有重要意义。

土壤耕作直接作用于土壤,创造水肥气热协调的耕层结构。深松可减少耕层土壤扰动,打破犁底层,增加土壤通透性,降低土壤容重^[5],为作物生长提供良好的生长环境。利用深松来改善土壤结构,增加耕层深度,在农业生产中被广泛应用^[6-7]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,团聚体构成比例及稳定性是评价土壤质量的重要指标^[8],但频繁耕作在降低土壤紧实度,增加土壤通透性的同时可促进有机物质的分解与转化,减少了土壤胶结物质,不利于土壤大团聚体的形成^[9-10],降低了土壤结构的稳定性^[11]。作物秸秆还田会促进土壤团粒结构的形成,改善耕层构造,进而改善土壤耕性;土壤耕作可促进秸秆与土壤的充分接触,使作物残体在土壤中分布均匀,促进秸秆腐解,增加胶结物质,促进土壤大团聚体的形成,增加耕层大团聚体的数量与平均重量直径,促进土壤结构的稳定^[12-13]。此外,深松与秸秆还田作用于土壤改变了土壤颗粒分布形态^[14],进而影响了土壤团聚体分形维数(Fractal Dimension, D),分形维数(D)是表征土壤团聚体分布状态的重要指标^[15]。Carter^[16]和 Kasper 等^[17]运用分形维数比较不同耕作措施对团聚体的影响,结果表明保护性耕作措施有利于增加团聚体含量,改善表层土壤结构。前人研究多集中于无灌溉条件的旱作区不同耕作方式或土地利用方式对土壤蓄水保墒、作物生长的影响^[5,18-19],针对荒漠绿洲灌区土壤结构退化严重、土壤盐含量高导致土壤分散,团聚性

差,长期传统耕作习惯使土壤板结等问题的研究鲜有报道。本研究基于3 a的田间试验,在甘肃引黄灌区灰钙土上研究了旋耕、深松和深松+秸秆还田对各粒级团聚体含量、团聚体稳定率、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)和分形维数(D)等指标,以期为该区水浇地土壤管理和耕层构造提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2015—2017年在甘肃省农业科学院白银沿黄灌区农业试验站实施。该地区属于黄土高原沟壑区,海拔1 645 m,位于黄河上游($104^{\circ}13'N$, $37^{\circ}15'E$),土壤含盐量高;该区春秋风沙大,土壤风蚀严重,气候干旱,年平均气温 $6.6^{\circ}C$ 左右,大于 $0^{\circ}C$ 和 $10^{\circ}C$ 的积温分别为 $3\ 208^{\circ}C$ 和 $2\ 622^{\circ}C$,无霜期 $160 \sim 170 \text{ d}$;年日照时数 $2\ 919 \text{ h}$,年平均降水量 240 mm ,蒸发量 $2\ 369 \text{ mm}$ 。试验地土壤类型为灰钙土,质地为中壤。2015年试验实施前耕层土壤(0~20 cm)的基本性状为:pH 8.5,有机质 $12.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮 $48.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $12.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $172 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $1.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

试验田种植制度为单作春玉米。供试材料为先玉335。小区面积 312.8 m^2 (宽 9.9 m ,长 32.5 m),不同处理播种密度与施肥状况一致,播种时施入 $N\ 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $P_2O_5\ 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥和磷肥分别为尿素和磷二铵,大喇叭口期和抽穗期分别追施 $N\ 112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。秸秆还田量为玉米秸秆全量还田。种植规格:带幅 110 cm ,行距 40 cm ,株距 27.5 cm ,玉米播种量为 $7.5 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,每年冬季11月灌水 $1\ 500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

试验设深松秸秆还田、深松秸秆不还田处理,以传统旋耕秸秆不还田为对照,每个处理重复3次,共9个小区,采用随机区组试验设计。处理如下:ST,深松秸秆不还田处理;STS,深松秸秆还田处理;RT,传统旋耕秸秆不还田处理。具体耕作措施:(1)深松处理:2015年玉米机械收获后采用ISQ-340型全方位深松机深松,深度 35 cm ,间隔深松整地,宽度间隔 15 cm ,玉米秸秆全量翻耕(兰驼1LF翻转

犁)入土,冬季 11 月份灌水。次年 4 月种植玉米,2016 年机械收获玉米,玉米秸秆全量翻耕(兰驼 11LF 翻转犁)入土,冬季 11 月份灌水,次年 4 月种植玉米,2017 年 10 月收获玉米。(2)传统旋耕处理:2015 年 10 月玉米机械收获后将秸秆全部移出,采用东方红 1GQN-125 型旋耕机旋耕,耕作深度 15 cm,冬季 11 月份灌水,次年 4 月种植玉米,2016 年 10 月收获玉米,同时将玉米秸秆全部移出,采用东方红 1GQN-125 型旋耕机旋耕,冬季 11 月份灌水,次年 4 月种植玉米,2017 年 10 月收获玉米。

1.3 采样与测定方法

1.3.1 采样方法 2017 年 10 月玉米收获后,按 S 型 5 点取样法在 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 土层采集原状土样约 2 kg,自然风干后除去粗根及小石块,将大土块按自然裂痕剥离为 1 cm³左右。将风干土样过孔径为 5、2 mm 的筛子,分为>5、2~5、<2 mm 3 个级别。然后按 3 个级别土样在原状土中所占比例取混合土样 200 g。

1.3.2 测定方法 机械稳定性团聚体:采用干筛法^[20]。称取风干土样 200 g,放入最大孔径 5 mm 的土筛上面,套筛下边的土筛孔径分别为 5、2、1、0.5 mm 和 0.25 mm,底层安放底盒,以收取<0.25 mm 的土壤团聚体,套筛顶部有筛盖。装好土样后,用振荡式机械筛分仪在最大功率下振荡 2 min,从上部依次取筛,将各级筛网上的土样分别收集称重,即得到>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 的机械稳定性团聚体质量。

水稳性团聚体:采用湿筛法^[20]。先用烘干法测定土壤含水量,再称取风干土样 40 g,平铺于套筛上(从上到下的顺序为 5、2、1、0.5、0.25 mm)。调整桶内水面的高度,使筛子移动到最高位置时最上一层筛子中的团聚体刚好淹没在水面以下。先在水面下浸泡 10 min,然后以 30 次·min⁻¹的速度上下振荡 5 min,将每个筛子上的水稳性团聚体分别冲洗入已称重的三角瓶,105℃烘干、称重;之后再往每个瓶中加入 10 mol·L⁻¹六偏磷酸钠 10 ml,用玻璃棒搅拌分散,置于相应孔径的筛子上振荡 45 min,收集各级筛子上的残留物,105℃烘干,再次称重,通过换算即得到>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 的水稳性团聚体质量。

1.4 计算方法

利用各粒级团聚体数据,计算各粒级团聚体的含量 WSA_i、>0.25 mm 团聚体 R_{0.25}、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、土壤团聚体破坏率(Percentage of Aggregate Destruction,PAD)和不稳定

团粒指数(Unstable Index of Aggregate,E_{LT}),计算公式如下^[21-22]:

WSA_i = W_i/W_T × 100% (1)

R_{0.25} = W_{r>0.25}/W_T × 100% (2)

PAD = (DR_{0.25} - WR_{0.25})/DR_{0.25} × 100% (3)

E_{LT} = (W_T - W_{0.25})/W_T × 100% (4)

MWD = ∑_{i=1}ⁿ X_iW_i (5)

GMD = exp [(∑_{i=1}ⁿ W_ilnX_i) / (∑_{i=1}ⁿ W_i)] (6)

式中,WSA_i为各粒级机械稳定性或水稳性团聚体的含量(%),W_i为各粒级机械稳定或水稳性团聚体质量(g),W_T为供试土壤样品总质量(g);R_{0.25}为直径>0.25 mm 团聚体的含量(%),W_{r>0.25}为粒径>0.25 mm 团聚体的质量(g);PAD 为团聚体破坏率(%),DR_{0.25}为>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%),WR_{0.25}为>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%);E_{LT}为不稳定团粒指数(%),W_{0.25}为水稳性团聚体质量(g);MWD 为团聚体平均质量直径(mm),GWD 为团聚体几何平均直径(mm),X_i为某一级别范围内团聚体的平均直径(mm),W_i为对应于 X_i的团聚体百分含量(%)。

分形维数(D)的计算采用杨培岭等^[23]推导的公式,在忽略各粒级间土粒比重差异的前提下,土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系可用下式表示:

M_(r<X_i) / M_T = [X_i / X_{max}]^{3-D} (7)

取对数后分别以 lg(X_i/X_{max})和 lg(M_i/M_T)为横、纵坐标,用回归分析可以计算出 D 值。式中,X_i和 M_T同上,M_(r<X_i)为粒径小于 X_i的团聚体质量,X_{max}为团聚体的最大粒径。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS 8.0 统计分析软件进行试验数据分析和绘图,多重比较用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 深松与秸秆还田对团聚体数量的影响

如表 1 所示,通过干筛法得到 0~40 cm 土层>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(DR_{0.25})在 75.1%~92.8%之间,平均为 85.4%。各处理 DR_{0.25}含量随着土层深度的增加呈增大趋势;在秸秆不还田条件

下,深松较旋耕 $DR_{0.25}$ 含量提高 3.5%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田提高 3.0%,但差异不显著;0~40 cm 土层> 5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 机械稳定性团聚体含量随着土层加深而增大。

不同土层来看,0~10 cm 土层,>0.25 mm 团聚体含量($DR_{0.25}$)STS 显著高于 RT,较 RT 提高 8.6%;> 5、2~5、1~2 mm 团聚体含量 STS 显著高于 RT,较 RT 分别提高 30.7%、3.8% 和 22.5%;10~20 cm 土

层,STS 处理的 $DR_{0.25}$ 显著高于 RT,较 RT 增加 4.9%,>5 mm 干团聚体含量 STS 显著高于 RT,较 RT 增加27.3%;20~30 cm 土层,STS 显著高于 RT,较 RT 提高 7.7%,>5、1~2、0.25~0.5 mm 干团聚体含量 STS 较 RT 提高 4.4%、2.8%和 5.1%;30~40 cm 土层,STS 显著高于 RT,较 RT 提高 6.9%,与 ST 差异不显著,>5 mm 和 0.5~1 mm 干团聚体含量 STS 显著高于 RT,较 RT 提高 7.9%和 11.6%。

表 1 深松和秸秆还田下机械稳定性团聚体的组成/%

Table 1 Composition of mechanically stable aggregates in the soil under subsoiling and straw returning

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	团聚体粒径 Aggregate size/mm					$DR_{0.25}$
		>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	
0~10	RT	16.13c	14.09b	11.85b	17.23a	15.80a	75.11b
	ST	19.88b	14.59a	13.47a	17.39a	14.45b	79.77b
	STS	21.08a	14.63a	14.52a	17.92a	14.05b	81.59a
10~20	RT	17.19b	15.26a	13.85a	18.14a	17.52a	81.95b
	ST	21.14a	15.80a	14.49a	18.22a	15.36b	85.02a
	STS	21.89a	15.53a	14.76a	18.77a	15.02b	85.97a
20~30	RT	23.76b	17.58a	13.67b	16.46a	14.81b	86.27b
	ST	23.85ab	18.01a	15.24ab	17.37a	15.33a	89.83a
	STS	24.78a	18.15a	16.65a	17.60a	15.57a	92.76a
30~40	RT	23.26b	17.99a	15.22a	15.84b	15.21a	87.52b
	ST	24.16ab	17.56a	15.65a	17.87a	15.49a	90.72a
	STS	25.10a	17.41a	16.21a	17.64a	15.31a	91.67a

注:表中不同小写字母表示同一粒级相同土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。RT:旋耕不还田;ST:深松秸秆不还田;STS:深松秸秆还田。下同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference among different treatments at the same soil layer and size class ($P<0.05$). RT: Rotary tillage without maize straw return; ST: Subsoiling without maize straw return; STS: Subsoiling with maize straw return. The same below.

由表 2 可看出,湿筛法得到 0~40 cm 土层> 0.25 mm 水稳性团聚体含量($WR_{0.25}$)在 7.9%~29.8%之间,平均为 15.0%。 $WR_{0.25}$ 含量随着土层深度的增加而降低,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 $WR_{0.25}$ 含量提高 39.2%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田提高 4.3%;0~40 cm 土层>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量随着土层加深而降低,各粒级干团聚体含量在 0~40 cm 土层平均为 0.1%、0.3%、1.0%、6.4%和 7.3%,>1 mm 水稳性团聚体含量较少。

不同土层来看,0~10 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 $WR_{0.25}$ 含量提高 59.0%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田 $WR_{0.25}$ 含量提高 5.5%,STS 的 $WR_{0.25}$ 较 RT 提高 67.7%。10~20 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 $WR_{0.25}$ 含量提高 44.8%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田提高 2.9%,STS 的 $WR_{0.25}$ 为 17.1%,显著高于 RT,较 RT 提高 49.1%,与 ST 差异不显著;>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 团聚体含量 STS 显著高于 RT;20~30 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕

$WR_{0.25}$ 含量提高 35.3%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田提高 5.3%,STS 显著高于 RT,较 RT 提高 42.9%,>2 mm 水稳性团聚体各处理间差异不显著,1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量 STS 显著高于 RT;30~40 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 $WR_{0.25}$ 含量提高 44.8%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田提高3.2%,STS 显著高于 RT,较 RT 提高 17.4%,>5、2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 水稳性团聚体含量 STS 较 RT 差异显著。由此可见,旋耕破坏了土壤水稳性团聚体,而深松配合秸秆还田对土壤水稳性团聚体的形成有很好的促进作用。

2.2 深松与秸秆还田对土壤团聚体大小的影响

MWD 和 GMD 是评价团聚体稳定性的重要指标,其值越大,稳定性越强,土壤抗侵蚀能力越强^[24]。如表 3 所示,干筛法下, MWD 和 GMD 值随着土层加深而增加,土层之间数值差异较小,0~40 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 MWD 、 GMD 值分别增加 7.2%、11.2%,在相同深松深度下,秸秆还田较不还田 MWD 、 GMD 值分别增加 2.1%、

3.9%,处理间表现为 STS 显著高于 RT,较 RT 增加 9.5%、15.5%。分土层来看,0~10 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 *MWD*、*GMD* 值分别增加 13.2%、18.7%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田 *MWD*、*GMD* 值增加 4.2%、5.6%,处理间 STS 显著高于 RT,较 RT 增加 18.0%、25.3%;10~20 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 *MWD*、*GMD* 值分别增加12.9%、16.4%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田 *MWD* 值增加 0.04%,*GMD* 值增加 1.7%,处理间 STS 显著高于 RT,较 RT 增加 13.4% 和 18.27%;20~40 cm 土层,STS 的 *MWD* 值和 *GMD* 值显著高于 RT,较 RT 增幅 4.1~15.8%。

湿筛法下,*MWD* 和 *GMD* 值随着土层加深而降低,0~40 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 *MWD* 值增加 21.4%,*GMD* 值增加 12.5%,在相同深松深度下,秸秆还田较不还田 *MWD* 值增加2.9%,*GMD* 值无差异,处理间表现为 STS 显著高于 RT,较 RT 的 *MWD* 值增加 25.0%,*GMD* 值增加 12.5%。分

土层来看,0~10 cm 土层,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 *MWD* 值和 *GMD* 值增加 21.4%、12.5%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田 *MWD* 值增加 2.9%;10~20cm 土层,深松较旋耕 *MWD* 值增加 12.5%,*GMD* 值增加 4.5%,秸秆还田较不还田 *MWD* 值增加3.7%,*GMD* 值差异不显著;20~30 cm 土层,深松较旋耕 *MWD* 值增加 4.3%,*GMD* 值增加 4.8%,秸秆还田较不还田 *MWD* 值增加 4.3%,*MWD* 值增加4.2%;30~40 cm 土层,STS、ST 与 RT 的 *MWD* 值差异显著,深松较旋耕 *MWD* 值增加 4.4%,*GMD* 值无显著差异。

2.3 深松与秸秆还田对土壤团聚体稳定性的影响

土壤不稳定指数和团聚体破坏率是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。由图 1 可看出,*PAD* 和 *E_{LT}*值随着土层加深而增大,在秸秆不还田条件下,深松较旋耕 *PAD* 降低 6.3%,*E_{LT}*降低 5.7%,相同深松深度下,秸秆还田较不还田 *PAD* 降低 2.4%,*E_{LT}*降低1.5%。分析各土层,随着土层深度的加深,*PAD* 和 *E_{LT}*降低的幅度越来越小,0~10 cm 土层,STS 处

表 2 深松和秸秆还田下水稳性团聚体的组成/%

Table 2 Composition of water-stable aggregates in the soil under subsoil and straw returning							
土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	团聚体粒径 Aggregate size/mm					<i>WR</i> _{0.25}
		>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	
0~10	RT	0.01b	0.28b	1.45a	7.48b	8.56b	17.78c
	ST	0.13a	0.42ab	1.78a	14.20a	11.75a	28.27b
	STS	0.18a	0.53a	2.10a	14.97a	12.03a	29.82a
10~20	RT	0.00b	0.16b	0.60b	4.43b	6.30b	11.49b
	ST	0.05a	0.30a	0.96a	6.72a	8.62a	16.64a
	STS	0.09a	0.31a	1.04a	6.64a	9.15a	17.13a
20~30	RT	0.01a	0.17a	0.56b	3.44b	4.38b	8.56b
	ST	0.10a	0.20a	0.77a	4.75a	5.81a	11.62a
	STS	0.08a	0.19a	0.81a	4.96a	6.19a	12.23a
30~40	RT	0.00b	0.02b	0.33b	2.88b	4.61b	7.95b
	ST	0.04a	0.22a	0.69a	3.37a	5.01a	9.33a
	STS	0.03a	0.24a	0.68a	3.42a	5.27a	9.64a

表 3 深松和秸秆还田下土壤团聚体平均质量直径 (*MWD*) 和几何平均直径 (*GMD*)/mm

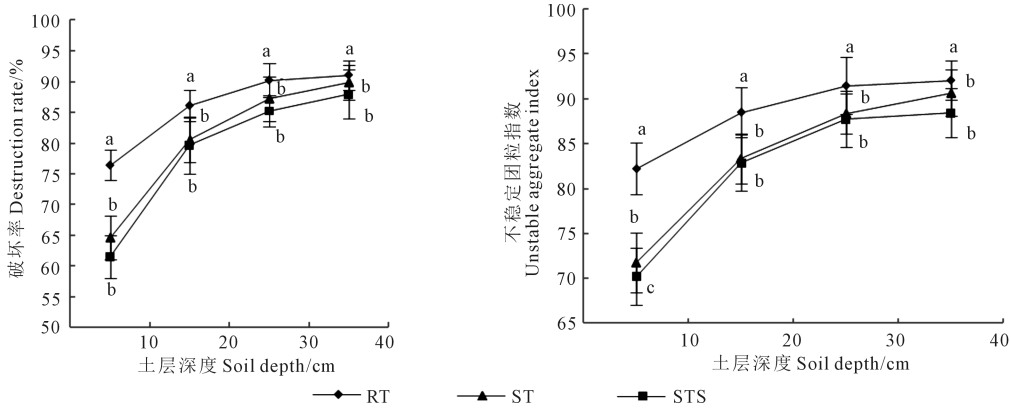
Table 3 <i>MWD</i> and <i>GMD</i> of subsoil and straw returning with dry and wet sieving analyses							
方法 Method	指标 Index	处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm				平均 Average
			0~10	10~20	20~30	30~40	
干筛法 Dry sieving	<i>MWD</i>	RT	1.89c	2.02b	2.47b	2.47c	2.21b
		ST	2.14b	2.28a	2.52a	2.53b	2.37b
		STS	2.23a	2.29a	2.60a	2.57a	2.42a
	<i>GMD</i>	RT	0.91c	1.04b	1.33c	1.36c	1.16b
		ST	1.08b	1.21a	1.42b	1.44b	1.29b
		STS	1.14a	1.19a	1.54a	1.47a	1.34a
湿筛法 Wet sieving	<i>MWD</i>	RT	0.28c	0.24b	0.23b	0.23ab	0.25b
		ST	0.34b	0.27a	0.25a	0.24a	0.28ab
		STS	0.35a	0.28a	0.25a	0.24a	0.28a
	<i>GMD</i>	RT	0.24b	0.22a	0.21ab	0.21a	0.22b
		ST	0.27a	0.23a	0.22a	0.21a	0.23b
		STS	0.27a	0.23a	0.22a	0.21a	0.24a

理 PAD 和 E_{LT} 显著低于 RT, 较 RT 降低 19.5% 和 14.6%, 显著高于其他土层, PAD 在不还田条件下, 深松较旋耕降低 15.4%, 在相同深松深度下, 秸秆还田较不还田降低 4.8%。在 10~20、20~30、30~40 cm 土层, STS 处理 PAD 较 RT 分别降低 7.5%、5.3%、3.4%, E_{LT} 降低 6.4%、4.0%、3.9%。

2.4 深松与秸秆还田对土壤团聚体分形维数的影响

分形维数可以定量描述不同粒径团聚体的稳定性特征, 利用公式 (7) 对团聚体干筛与湿筛数据进行拟合, 得到干筛法拟合系数 $R^2>0.911$, 湿筛法

拟合系数 $R^2>0.856$ 。从图 2 可以看出, 干筛法机械稳定性团聚体的分形维数随土层加深而降低, 各处理 0~40 cm 土层平均值的大小顺序为: RT>ST>STS, STS 较 RT 和 ST 分别降低 4.5% 和 1.8%, 20~40 cm 土层之间无明显差异, 但低于 0~20 cm 土层。分析各土层, 0~20 cm 土层, RTS 较 RT 降低 3.1%, 20~40 cm 土层各处理之间的差异进一步增大, STS 较 RT 增加 6.0%。水稳性团聚体的分形维数, 10~20 cm 土层 STS 较 RT 降低 1.61%, 30~40 cm 土层 STS 较 RT 降低 0.67%。



注: 图中不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters mean significant difference among treatments at the same soil layer ($P<0.05$).

图 1 不同处理下土壤团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (E_{LT})

Fig.1 Destruction rate of aggregate (PAD) and unstable index of aggregate (E_{LT}) under different treatments

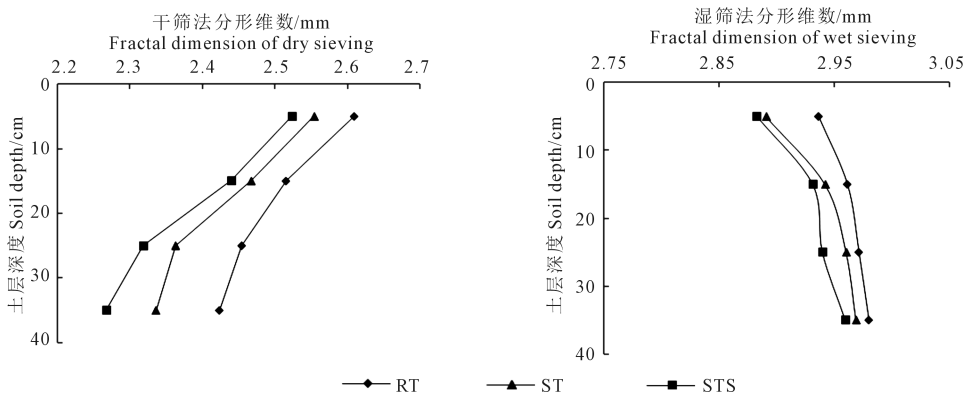


图 2 不同处理下干筛法和湿筛法的分形维数 (D)

Fig.2 Fractal dimension of soil aggregates under different treatments

3 讨论

农业生产中将粒径 >0.25 mm 的土壤团聚体称为土壤团粒结构, 其数量与土壤持水能力及土壤肥力状况正相关, 保护性耕作措施是能减少耕层土壤扰动, 增加地表覆盖, 创造水肥气热协调的耕层环境的耕作方式^[25]。田慎重等^[8]的研究结果表明, 深松配合秸秆还田较旋耕无秸秆还田使 0~50 cm 土

层大团聚体的数量增加 6.1%。本研究结果表明, STS 较 RT 使 0~40 cm 土层 >0.25 mm 机械稳定性团聚体数量增加 8.3%, 且 0~10 cm 土层 >0.25 mm 团聚体数量增加幅度高于 10~40 cm 土层, 说明深松配合秸秆还田可显著提高表层土壤大团聚体数量, 这与李景等^[26]的研究结果一致。本研究结果还表明, 深松较旋耕使 0~40 cm 土层 $DR_{0.25}$ 提高 3.5%, 秸秆还田较不还田提高 3.0%, 通过方差分析可得,

深松可极显著 ($P < 0.01$) 影响 $DR_{0.25}$ 的含量, 说明耕作是影响机械稳定性大团聚体含量的主要因素。对不同粒级分析可看出, 各粒级分布较为均匀, 不同粒级机械稳定性团聚体含量随着土层深度的增加而增加, 主要原因是表层土壤频繁扰动多, 有机质分解矿化强烈, 降低了机械稳定性团聚体的胶结作用^[9]。此外, >1 mm 团聚体含量在 0~40 cm 土层 STS 显著高于 RT, 但 0~20 cm 土层 STS 较 RT 能显著降低 0.25~0.5 mm 团聚体数量, 增加 >0.5 mm 团聚体数量, 说明相对于主要作用力在 0~15 cm 的旋耕措施, 深松配合秸秆还田一方面可降低耕层土壤的扰动, 降低深层土壤紧实度, 打破土壤犁底层, 促进作物生长^[27], 另一方面作物秸秆还田可能促进团聚体中颗粒有机质 (POM) 的形成, POM 被黏土矿物质和微生物分泌的黏液包裹, 形成新微团聚体的核心, 进而促进土壤大团聚体数量的增加^[28]。

土壤水稳性团聚体含量是反应土壤结构稳定性的重要指标, 可用来衡量土壤抗侵蚀能力^[24]。本研究结果显示, 水稳性团聚体含量明显低于机械稳定性团聚体, 主要原因是在浸水条件下, 团聚体抗破坏能力降低, 使得非水稳性团聚体转化为粒径更小的水稳性团聚体^[29]。分土层来看, STS 较 RT 显著增加了 0~40 cm 土层 $WR_{0.25}$ 含量, 其中 0~10 cm 土层 STS 较 RT 和 ST 分别提高 67.7% 和 5.5%。方差分析结果表明, 深松可极显著提高 $WR_{0.25}$ 含量 ($P < 0.01$), 秸秆还田达到显著水平 ($P < 0.05$), 且 0~20 cm 土层水稳性大团聚含量高于 20~40 cm, 这与农田 0~20 cm 土层土壤中的有机碳、胶结物质和微生物、根系分泌物等的数量及种类较 20~40 cm 土层多有关^[30]。不同粒级分析可看出, 水稳性团聚体含量随着粒级直径的减小而增加, 水稳性团聚体 0.25~1 mm 团聚体数量最多, 且在各粒级 STS 较 RT 差异显著, 这与程科等^[9] 研究结果一致。

本研究结果显示, 深松和秸秆还田增加了 $R_{0.25}$ 团粒结构的数量, 提高了耕层团聚体的稳定性。STS 较 RT 显著降低 0~40 cm 土层团聚体 PAD 和 E_{LT} , 0~10 cm 土层降低幅度 PAD 为 19.5%, E_{LT} 为 14.6%, 显著高于 10~40 cm 土层。说明深松配合秸秆还田能增加表层团聚体的稳定性, 主要原因一方面土壤犁底层大致在 20~30 cm 左右, 而旋耕深度 15 cm, 对表层土壤扰动较大, 使 10~40 cm 土层免受机械破坏, 团聚体稳定性相应增加, 另一方面深松对表层土壤扰动较小, 秸秆还田可增加耕作因素

对土壤过度干扰的阻力, 增加团聚体稳定性, 降低了表层团聚体的破坏率, 这与李增强等^[31] 的研究结果一致。已有研究表明^[32-33], 土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 可以较好地反映各耕作处理下团聚体粒级分布特征, 机械稳性团聚体平均重量直径与 >5 mm 机械稳性团聚体含量密切相关, 水稳性团聚体平均重量直径与 $WR_{0.25}$ 相关, 本研究也得出相同结论, 旋耕和深松相比 MWD 和 GMD 明显降低, 主要原因是深松增加表层大团聚体数量, 深松配合秸秆还田增加了有机质含量, >0.25 mm 团聚体数量明显增加 (表 1, 表 2), 可见旋耕或单一深松可能使该区土壤团聚体稳定性下降, 不利于该区土壤肥力的稳定。分形维数反映土壤结构的变化, 团粒结构越好、结构越稳定、通透性越好的土壤分形维数越小^[34]。周虎等^[32] 认为对土壤的机械扰动越大, D 值越大, 且 D 值较其他参数更能反映土壤团聚体变化特征, 本研究也得出相似结论。干筛法和湿筛法下分形维数 (D) 在 0~40 cm 土层呈相反的变化趋势, 干筛法 STS 处理较 RT 降低 4.5%, 湿筛法 STS 处理较 RT 降低 1.1%, 主要原因是深松配合秸秆还田对土壤扰动较小, 土壤团粒结构数量多, 土壤结构也越稳定。不同土层来看, 干筛法下, 30~40 cm 土层 STS 较 RT 降低幅度最大, 为 6.5%, 湿筛法下, 0~20 cm 土层 D 值变幅最大, STS 较 RT 降低 1.6%。

4 结 论

1) 深松和秸秆还田对 0~40 cm 土层不同粒级土壤团聚体数量产生显著影响, 且对机械稳性团聚体的影响要大于水稳性团聚体, 深松配合秸秆还田 (STS) 能显著提高 0~40 cm 土层 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 团聚体数量。STS 处理较 RT 更能促进小团聚体向大团聚体的转化。

2) 各处理用干筛法得到团聚体平均重量直径和几何平均直径远远高于湿筛法, 干筛法得到的 MWD 、 GMD 随土层加深而增加, 湿筛法随土层的加深而降低, 在 0~40 cm 土层, 两种方法得到的 MWD 和 GMD 均是 $STS > ST > RT$ 。

3) 各处理团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (E_{LT}) 在 0~40 cm 土层内都随着土层的加深而增加, STS 较 RT 在 0~10 cm 土层降低幅度最大, PAD 为 19.5%, E_{LT} 为 14.6%。

4) 干筛法和湿筛法的分形维数 (D) 在 0~40 cm 土层呈相反的趋势, 干筛法 D 值随土层加深而降低, STS 处理较 RT 降低 4.5%; 湿筛法 D 值随土层加深而增加, STS 处理较 RT 降低 1.1%。

参 考 文 献:

[1] 甘肃农村年鉴编委会. 甘肃农村 2011 年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

[2] 杨思存, 逢焕成, 王成宝, 等. 基于典范对应分析的甘肃引黄灌区土壤盐渍化特征研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(1): 100-110.

[3] 李小刚, 翟志军, 王琳英. 甘肃景电灌区次生盐渍化土壤的性质及其发生机理[J]. 土壤通报, 2001, 32(1): 4-8.

[4] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21.

[5] 侯贤清, 李荣, 贾志宽, 等. 不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1215-1223.

[6] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不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.

[7] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 133-140.

[8] 张华, 张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤, 2001, (6): 326-330.

[9] 程科, 李军, 毛红玲, 等. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3800-3808.

[10] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.

[11] 时秀焕, 张晓平, 梁爱珍, 等. 利用最小限制水分范围评价短期免耕对黑土有机碳矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4207-4213.

[12] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025-1030.

[13] 曹晶晶, 魏飞, 马芳霞, 等. 秸秆还田与长期连作棉田土壤水稳性团聚体特征[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1), 25-32.

[14] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 1009-1017.

[15] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520.

[16] Carter M R. Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate[J]. Soil and Tillage Research, 1992, 23(4): 361-372.

[17] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 192-199.

[18] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J]. Geoderma, 2013, 209-210: 75-85.

[19] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2), 387-399.

[20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 78-85.

[21] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3767-3775.

[22] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1365-1373.

[23] 杨培岭, 罗远培. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.

[24] Demelash N, Bayu W, Tesfaye S, et al. Current and residual effects of compost and inorganic fertilizer on wheat and soil chemical properties[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100(3): 357-367.

[25] 严波, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3), 59-63.

[26] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养肥料学报, 2015, 21(2): 378-386.

[27] 温美娟, 王成宝, 霍琳, 等. 深松和秸秆还田对甘肃引黄灌区土壤物理性状和玉米生产的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 224-232.

[28] 王志强, 刘英, 杨文亨, 等. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1143-1155.

[29] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 671-678.

[30] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1833-1840.

[31] 李增强, 李丹丹, 赵炳梓, 等. 秸秆施用和作物种植对土壤团聚体和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1557-1565.

[32] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.

[33] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124.

[34] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团聚体结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.