

秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应

孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 崔福柱, 郝建平, 郭秀卿, 杜天庆, 崔江辉, 张倍宁

(山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801)

摘要:冬小麦—夏高粱种植系统作为一种新型农业两熟制系统,是山西省杂粮可持续发展的一项有效措施。为阐明该种植系统农田土壤团聚体粒级分布及稳定性对秸秆还田量的短期响应,试验基于麦梁种植系统,分析了不还田(CK)、半量还田(HR)和全量还田(WR)对土壤团聚体粒级分布特征和稳定指数的影响。结果表明:秸秆还田后,能够显著降低0—30 cm土层>10 mm和<0.25 mm粒级机械稳定性团聚体含量,增加0.25~2 mm各亚粒级水稳性大团聚体含量,同时显著降低了土壤团聚体破坏率和不稳定团粒指数($p<0.05$);全量秸秆还田后较半量秸秆还田对农田土壤团聚体特征改善效果更为明显,但对10—20,20—30 cm土层改善效果逐渐减弱;全量还田相比半量还田,土壤机械稳定性团聚体平均重量直径、几何平均直径和大团聚体(>0.25 mm)含量分别显著降低了12.2%、23.0%和5.3%,并显著提升了水稳性团聚体几何平均直径和大团聚体(>0.25 mm)含量,降低了水稳性团聚体分形维数($p<0.05$)。此外,土壤团聚体稳定性与有机碳含量、孔隙度、含水量和作物产量呈显著正相关($p<0.05$)。综合表明,全量还田在短期年限内能够显著提高土壤团聚体稳定性,是改善晋中区麦梁两熟农田土壤团粒结构和增加作物产量的有效措施。

关键词: 秸秆还田量; 土壤团聚体; 麦梁两熟制; 稳定性; 分形维数

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0036-09

Short-Term Responses of Soil Aggregate Characteristics to Different Annual Straw Incorporation Rates in Winter Wheat-Summer Sorghum Cropping System

SUN Longxiang, CHEN Mengni, XUE Jianfu, CUI Fuzhu,

HAO Jianping, GUO Xiuqing, DU Tianqing, CUI Jianghui, ZHANG Beining

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: As a new type of agricultural double cropping system, winter wheat-summer sorghum planting system is an effective measure for the sustainable development of cereal grains in Shanxi Province. In order to elucidate the short-term response of grain-size distribution and stability of soil aggregates to straw application in this cropping system in farmland, based on the winter wheat-summer sorghum cropping system, the effects of treatments of no crop residue returning (CK), 50% (HR) and 100% (WR) on grain-size distribution characteristics and stability index of soil aggregates were analyzed in this study. The results showed that straw returned to field could significantly reduce the mechanical stability of aggregate (>10 mm and <0.25 mm) in 0—30 cm soil layer, significantly increase the contents of 0.25~2 mm water-stable aggregates. At the same time, the PAD and E_{LT} were significantly reduced ($p<0.05$). The effect of WR compared HR treatment on improving the characteristics of soil aggregates in farmland was more obvious, but the improvement effects in the soil layers of 10—20 cm and 20—30 cm gradually declined. The MWD, GMD and $R_{0.25}$ of mechanics-stable soil aggregate decreased significantly by 12.2%, 23.0% and 5.3%, respectively; the GMD and $R_{0.25}$ of water-stable aggregates increased significantly, and the values of water-stable aggregates D ($p<0.05$) reduced under WR treatment compared with those under CK. In addition, the aggregate stability was positively correlated with organic carbon, porosity, water content and crop yield ($p<0.05$). It showed that

收稿日期: 2018-01-07

修回日期: 2018-01-30

资助项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503121-07); 山西省自然科学基金(201701D121105)

第一作者: 孙隆祥(1990—), 男, 山西朔州人, 在读硕士, 研究方向为作物高产优质工程与产品质量安全。E-mail: slxqingyun@163.com

通信作者: 崔福柱(1972—), 男, 山西宁武人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事作物高产优质工程与产品质量安全研究。E-mail: Cuifuz@sina.com

the WR treatment is an effective measure to improve the soil aggregate characteristics and increase crop yield by significantly increasing the stability of soil aggregates in winter wheat-summer sorghum cropping system field in Jinzhong area within a short period of time.

Keywords: different amount of straw incorporation; soil aggregate; wheat-sorghum double cropping; stability; fractal dimension

近年来,土壤结构退化表现为土壤团聚体稳定性下降及粒径比例失调,由此引起的耕地侵蚀问题已受到全球公众的日益关注^[1-2]。土壤团聚体由土壤理化生综合作用形成,是农田土壤的养分库和微生物生境,其粒径分布和稳定性是评价土壤质量的重要指标^[3]。不同粒级团聚体在土壤水分、肥力及气体循环过程中表现不同,一般粒径 >0.25 mm 的团聚体是土壤最佳团粒结构体,其数量与土壤肥力状况紧密相关^[4]。同时,水稳性团聚体的数量和分布状况反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力^[5]。然而,大量的农业活动对农田土壤团聚体粒级分布和稳定性影响不同^[6],秸秆还田措施作为农业活动之一,可以有效增加土壤有机质含量,改善土壤稳定性^[7]。因此,深入探讨秸秆还田措施对农田土壤团聚体形成与稳定的影响成为农田土壤防治的重要研究内容。

秸秆还田措施能够有效增加土壤团粒胶结剂,其积累量与土壤 0.25~2 mm 粒级团聚体含量显著相关^[8]。对此,国内外学者针对秸秆还田对土壤团聚体粒径及稳定机理开展了大量研究,结果表明秸秆还田恢复有机质的同时能促使土壤耕层结构稳定^[9-10],但学者主要基于稻麦、麦玉等系统^[11-12],研究不同秸秆还田量对土壤生物群落^[13]、有机碳库^[14]、土壤质量^[15]、酶活性^[16]及作物产量^[17]等方面的影响,但针对麦梁两熟农田系统,不同秸秆还田量对土壤团聚体稳定性的影响尚鲜有报道。

高粱是山西省重要的杂粮作物,年均种植面积

约 6.67 万 hm^2 , 占全国高粱种植面积的 1/10^[18], 其种植优势转型,对山西省农业结构、区域经济发展、农民增收具有重要意义^[19]。山西省中部地区传统种植系统多为一年一熟或两年三熟制,随着“晋杂 30”的成功选育,使得麦梁一年两熟制成为了一种可能^[20]。以往研究多侧重于常规种植系统(稻麦和麦玉系统)下土壤理化生特性及其团聚体变化进行综合评价,鲜有文章针对麦梁种植系统农田土壤团聚体粒径分布及稳定性对秸秆还田量的响应开展研究。因此,本文以土壤团聚体分布和稳定性参数—— >0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤团聚体破坏率(PAD)、不稳定团粒指数($E_{L,T}$)及分形维数(D)等为考察指标^[21], 期为麦梁两熟农田土壤改良及结构稳定提供理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验点位于山西省晋中市太谷县北洸村山西农业大学科技创新园区($37^{\circ}42'N, 112^{\circ}55'E$), 隶属黄土高原地貌类型。平均海拔 811 m, 年平均温度 $9.4^{\circ}C$, 年降雨量 479.6 mm, 降水主要集中于 6—8 月份。全年太阳日照时数平均为 2 530.8 h, 辐射总量为 $4\ 976.8\sim 5\ 530.6$ MJ/m^2 , 年平均无霜期 151 d, 年平均潜在蒸发量为 1 718.4 mm。试验田土壤为褐土, 土层深厚, 其耕层土壤(0—30 cm)初始理化性状见表 1。

表 1 试验地耕层土壤基本理化性状

土层/cm	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH 值
0—10	16.33	219.52	24.10	15.87	1.232	1.324	7.91
10—20	13.19	122.09	19.72	15.38	1.097	1.370	7.90
20—30	8.88	89.07	13.97	15.38	0.693	1.478	7.88

1.2 试验设计

试验于 2015 年 10 月进行,采用单因素随机区组设计,设置秸秆不还田(CK)、半量还田(HR)和全量还田(WR)3 个处理,3 次重复,共 9 个小区,小区面积为 200 m^2 ($10.0 \text{ m} \times 20.0 \text{ m}$),垄宽 65 cm,具体秸秆处理方式见表 2。供试冬小麦品种为“长 6878”,于当年 10 月 25 日种植,基本苗为 $300\sim 350$ 万株/ hm^2 ,行距为 20

cm,2016 年 6 月 20 日收获,年产秸秆量为 $7\ 500 \text{ kg}/\text{hm}^2$;夏高粱品种为“晋杂 30”,于 2016 年 6 月 26 日机播种植,基本苗为 $13\sim 14$ 万株/ hm^2 ,行距为 40 cm,2016 年 10 月 20 日收获,年产秸秆量为 $8\ 500 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。为了更好地控制肥料因素对试验的影响,本试验各作物播种前均施用 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 奥磷丹复合肥 ($N \geq 17\%$; $P_2O_5 \geq 17\%$; $K_2O \geq 17\%$) 作为基肥,且作

物拔节期追施尿素(N \geq 46.4%),施肥量为 150 kg/hm²。所有试验田的田间管理与常规无异,均进行漫灌式浇水和人工控制病虫害。秸秆还田处理均为前茬作物秸秆,均进行切割粉碎为 5 cm 长度。其中,高粱收获后,试验田进行翻耕+旋耕处理;小麦收获后,试验田仅进行旋耕处理。

表 2 田间试验处理描述

处理	还田方法
不还田(CK)	作物收获后,为了保证试验准确性,进行人工齐根移除作物秸秆
半量还田(HR)	作物收获后,进行人工齐根隔行移除,将剩下秸秆机械粉碎后均匀分布于试验区
全量还田(WR)	作物收获后,将作物秸秆直接机械粉碎还田

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集与分析 土壤样品于 2016 年 10 月夏高粱收获时采集,用“五点取样法”分别采集 0—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm 共 3 个层次的原状土样,沿其自然裂缝将大块剥离为直径 1 cm 左右,在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,在实验室内风干后剔除有机残体及石块,按其原状土样比例取混合土样 200 g 用于土壤团聚体的测定。

土壤机械稳定性团聚体(干筛法)^[22]:取 200 g 混合土样置于套筛(孔径依次为 10,7,5,3,2,1,0.5 和 0.25 mm)顶部,进行震荡筛分,测定各孔径筛分后土样重量。

水稳性团聚体(湿筛法)^[22]:按照干筛后土壤各粒级重量比称取 50 g 混合土样,将其置于 1 L 量筒内,沿量筒边缘缓慢加入去离子水至饱和状,静置 10 min 后,再次加入去离子水至 1 L 刻度线处,上下震荡 10 次,将其转移至放置于水桶中的套筛(孔径依次为 5,3,2,1,0.5,0.25 mm)顶部,将套筛在水中慢慢提起后迅速放下,重复震荡 10 次,将各孔径筛分后土样分别置于铝盒中烘干(50℃)称重。将>0.25 mm 的团聚体称为大团聚体,<0.25 mm 的团聚体称为微团聚体。

1.3.2 计算方法 利用干湿筛后各粒级团聚体数据,计算大团聚体含量比例($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、平均几何直径(GWD)、土壤团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数(E_{LT})表征团聚体稳定性^[23],计算公式如下:

$$R_{0.25} = \frac{M_{R>0.25}}{M_T} = \frac{M_{R<0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (3)$$

式中: M_T 为团聚体总重量(g); $M_{R>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 团聚体的重量(g); \bar{X}_i 为各粒径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(%)。

$$PAD = \frac{(DR_{0.25} - WR_{0.25})}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $DR_{0.25}$ 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(%)。

$$E_{LT} = \frac{(W_T - W_{0.25})}{W_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_T 为供试土壤总重量(g); $W_{0.25}$ 为水稳性团聚体重量(g)。

分形维数(D)的计算采用杨培岭等^[24]推导的公式:

$$\frac{M(R < \bar{X}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{X}_i}{X_{max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: $M(R < \bar{X}_i)$ 为粒径小于 \bar{X}_i 的团聚体重量(g); X_{max} 为团聚体最大粒径值(mm)。

1.3.3 数据统计 采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理,SPSS 20.0 统计分析软件进行数据处理,Sigmaplot 12.0 软件进行绘图。不同处理间土壤团聚体各指标采用最小显著差法(LSD)进行多重比较($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤机械稳定性和水稳性团聚体组成

不同秸秆还田量处理下 0—30 cm 土层<0.25 mm 粒级机械稳定性团聚体含量随着秸秆还田量的增加而显著增加($p < 0.05$)(表 3)。相比 CK 处理,WR 处理 0—10 cm 土层<0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2 mm 粒级机械稳定性团聚体含量分别显著增加了 911.2%,969.1%,298.2%和 15.1%($p < 0.05$)。10—20 cm 土层,各处理 7~10,5~7,3~5,2~3,1~2,0.5~1 mm 粒级机械稳定性团聚体含量差异不显著。CK 处理 20—30 cm 土层 1~2 mm 粒级机械稳定性团聚体含量较 HR 和 WR 处理分别显著降低了 12.3%和 22.6%($p < 0.05$)。WR 处理相比 CK 和 HR 有效地降低了 0—30 cm 土层>10 mm 粒级机械稳定性团聚体含量。

不同秸秆还田量处理下 0—30 cm 土层<0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量随着秸秆还田量的增加而显著降低($p < 0.05$)(表 4)。在 0—10 cm 土层,WR 处理 0.25~0.5,0.5~1,1~2 mm 粒级水稳性团聚体含量相比 CK 处理分别显著增加了 104.9%,51.5%和 67.2%;

>5 mm 粒级团聚体显著降低了 34.1% ($p < 0.05$)。在 10—20 cm 土层, HR 处理 >5, 3~5, 0.5~1 mm 粒级水稳性团聚体含量显著高于 WR 处理, 和 CK 处理不存在显著性差异 ($p < 0.05$)。在 20—30 cm 土层, WR

处理 0.25~0.5, 0.5~1 mm 粒级水稳性团聚体含量相比 CK 处理分别显著增加了 20.4% 和 34.5%, 且 >5, 3~5 mm 粒级水稳性团聚体含量相比 CK 处理分别显著降低了 100% 和 94.1% ($p < 0.05$)。

表 3 不同秸秆还田量处理下土壤机械稳定性团聚体组成

土层/cm	处理	团聚体粒级/mm								
		>10	7~10	5~7	3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
0—10	CK	19.09a	21.40a	14.27a	14.28a	13.83a	11.84b	3.27c	0.97b	1.07b
	HR	17.84a	19.64a	11.85a	12.38ab	12.17b	14.64a	7.98b	2.09b	1.41b
	WR	11.98b	13.52b	8.17b	9.68b	8.80c	13.63a	13.02a	10.37a	10.82a
10—20	CK	18.88a	12.26a	10.35a	10.74a	9.56a	14.50a	11.86a	7.40b	4.43c
	HR	11.16c	12.84a	8.14a	9.57a	9.97a	15.05a	13.33a	10.38a	9.55b
	WR	13.73b	15.79a	8.02a	10.30a	9.78a	13.76a	10.22a	7.14b	11.26a
20—30	CK	21.47a	13.89a	8.58a	8.95a	8.82a	12.51c	9.34b	6.91a	9.53ab
	HR	16.60b	13.10a	9.05a	10.12a	9.75a	14.26b	12.35a	9.19a	8.57b
	WR	7.04c	13.06a	8.23a	10.32a	10.34a	16.17a	13.30a	9.29a	12.26a

注: 同一土层同列不同字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平上的统计差异, 下表同。

表 4 不同秸秆还田量处理下土壤水稳性团聚体组成

土层/cm	处理	团聚体粒级/mm						
		>5	3~5	2~3	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
0—10	CK	0.82a	0.23b	0.54a	0.67b	1.67c	3.91c	92.17a
	HR	0.65ab	0.44a	0.76a	1.18a	2.11b	5.29b	89.57b
	WR	0.54b	0.29b	0.50a	1.12a	2.53a	8.01a	87.01c
10—20	CK	0.41a	0.35a	0.57a	0.87a	1.93a	5.56b	90.31a
	HR	0.42a	0.31a	0.41a	0.84a	2.00a	7.15a	88.87c
	WR	0.13b	0.09b	0.47a	0.89a	1.62b	7.09a	89.72b
20—30	CK	0.16b	0.17a	0.42a	0.52b	1.45b	6.18b	91.10b
	HR	0.35a	0.11ab	0.32a	0.67a	1.52b	4.17c	92.86a
	WR	0.00c	0.01b	0.31a	0.67a	1.95a	7.44a	89.61c

2.2 土壤机械稳定性和水稳性团聚体稳定性

不同秸秆还田量处理下土壤机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 随着土层深度的增加均呈逐渐降低的趋势(表 5)。WR 处理 0—10 cm 土层机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 均显著低于 HR 和 CK 处理 ($p < 0.05$)。秸秆还田处理下 10—20 cm 土层机械稳定性团聚体 GMD 和 $R_{0.25}$ 值均显著低于 CK 处理, 且 HR 处理下 MWD 相比 CK 处理显著降低了 18.6%, WR 相比 CK 处理不存在显著性差异 ($p < 0.05$)。相比 CK 处理, WR 处理 20—30 cm 土层机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 分别显著降低了 28.3%, 31.6% 和 3.0% ($p < 0.05$)。

不同秸秆还田量处理下土壤水稳性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 随着土层深度的增加表现为逐渐降低的态势(表 6)。0—10 cm 土层, WR 处理水稳性团聚体 GMD 和 $R_{0.25}$ 较 CK 处理分别显著提高了 2.9% 和 65.9% ($p < 0.05$)。秸秆还田处理 10—20 cm 土层水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 含量显著高于 CK 处理, 且 HR 处理 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 值均显著高于 WR

处理 ($p < 0.05$)。20—30 cm 土层, 各处理水稳性团聚体 GMD 无显著性差异, 但 WR 处理 $R_{0.25}$ 含量较 CK 和 HR 处理分别显著提高了 16.7% 和 45.5% ($p < 0.05$)。土壤机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 均明显高于水稳性团聚体, 是水分浸泡下大量的机械稳定性团聚体分解的结果。

表 5 不同秸秆还田量处理对土壤机械稳定性团聚体稳定指数的影响

土层/cm	处理	指标		
		MWD [#] /mm	GMD [#] /mm	$R_{0.25}$ [#] /%
0—10	CK	5.71±0.14a	4.45±0.13a	98.93±0.27a
	HR	5.25±0.13b	3.75±0.09b	98.59±0.23a
	WR	3.81±0.21c	2.01±0.19c	89.18±1.57b
10—20	CK	4.57±0.27a	2.75±0.27a	95.57±0.17a
	HR	3.72±0.10b	1.99±0.33b	90.45±1.11b
	WR	4.19±0.16a	2.30±0.14b	88.74±1.46c
20—30	CK	4.73±0.32a	2.66±0.32a	90.47±1.16a
	HR	4.03±0.16b	2.22±0.11ab	91.43±0.97a
	WR	3.39±0.28b	1.82±0.21b	87.75±1.71b

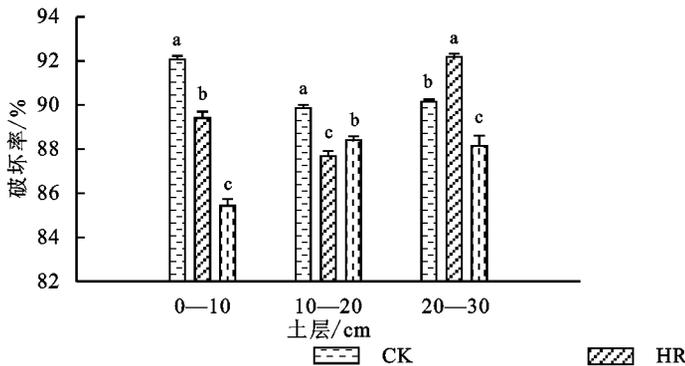
注: MWD[#] 指土壤团聚体平均重量直径; GMD[#] 指土壤团聚体平均几何直径; $R_{0.25}$ [#] 指土壤中 >0.25 mm 的团聚体数量, 下表同。

表 6 不同秸秆还田量处理对土壤水稳性团聚体稳定指数的影响

土层/cm	处理	指标		
		MWD [#] /mm	GMD [#] /mm	R _{0.25} [#] /%
0—10	CK	0.331±0.005a	0.273±0.001b	7.83±0.25c
	HR	0.347±0.009a	0.280±0.002a	10.43±0.46b
	WR	0.334±0.005a	0.281±0.001a	12.99±0.27a
10—20	CK	0.323±0.002a	0.275±0.001a	9.69±0.25c
	HR	0.320±0.006a	0.275±0.001a	11.13±0.31a
	WR	0.298±0.003b	0.271±0.001b	10.28±0.36b
20—30	CK	0.295±0.001a	0.268±0.001a	8.90±0.26b
	HR	0.299±0.005a	0.267±0.001a	7.14±0.30c
	WR	0.285±0.002b	0.268±0.010a	10.39±0.56a

2.3 土壤团聚体破坏率

不同秸秆还田量处理下土壤团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 (E_{LT}) 结果相似 (图 1)。WR 处理 0—10 cm 土层团聚体 PAD 和 E_{LT} 较 CK 处理分别显著降低了 7.2% 和 4.4% ($p < 0.05$)。10—20 cm 土层, 各处理土壤团聚体 PAD, E_{LT} 值均表现为 HR < WR < CK, 且处理间存在显著性差异 ($p <$



注: 同一土层不同字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平上的统计差异, 下图同。

图 1 不同秸秆还田量处理下土壤团聚体破坏率及不稳定团粒指数

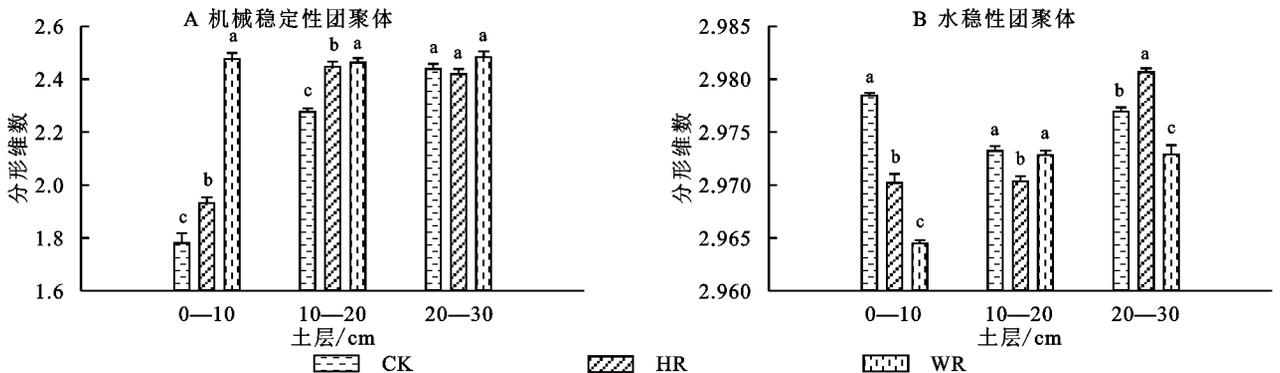


图 2 不同秸秆还田量处理方式下土壤团聚体分形维数

2.5 土壤团聚体与理化特征间相关分析

土壤理化特征与团聚体稳定性参数间相关关系表明 (表 7), 土壤团聚体 PAD 和 E_{LT} 两者主要与土壤容重、全钾含量存在显著正相关, 且与土壤孔隙度、充气孔隙度、毛管孔隙度、毛管含水量、全氮含量、有机碳呈显著负相关 ($p < 0.05$)。土壤质量含水量、体积

0.05)。WR 处理 20—30 cm 土层团聚体 PAD 和 E_{LT} 较 CK 处理分别显著降低了 2.2% 和 1.6%, 且 HR 处理显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$)。

2.4 土壤团聚体分形特征

不同秸秆还田量处理下土壤团聚体分形维数 (D) 随着土层深度的增加均呈逐渐增大的趋势 (图 2)。WR 处理 0—30 cm 土层机械稳定性团聚体 D 均高于 CK 和 HR 处理, 且 WR 处理 0—10, 10—20 cm 土层机械稳定性团聚体 D 较 CK 处理分别显著提高了 39.3% 和 7.9% ($p < 0.05$)。20—30 cm 土层, 处理间机械稳定性团聚体 D 无显著性差异 ($p < 0.05$) (图 2A)。

WR 处理 0—10 cm 土层水稳性团聚体 D 较 CK 和 HR 处理分别显著降低了 0.5% 和 0.2% ($p < 0.05$), 且在 20—30 cm 土层, WR 处理下水稳性团聚体 D 较 CK 和 HR 处理分别显著降低了 0.1% 和 0.3% ($p < 0.05$)。各处理 10—20 cm 土层水稳性团聚体 D 表现为 HR < WR = CK (图 2B)。

含水量、速效磷、速效钾、全钾分别与机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 呈极显著正相关, 与参数 D 呈极显著负相关 ($p < 0.01$)。土壤全氮及有机碳含量与水稳性团聚体稳定参数呈极显著相关关系 ($p < 0.01$), 其余土壤理化特征与 MWD, GMD 相关, 与 $R_{0.25}$, D 则不相关, 两者呈相反的相关关系。

表 7 土壤团聚体与理化特征间相关分析

土层	PAD	E_{LT}	干筛				湿筛			
			MWD	GMD	$R_{0.25}$	D	MWD	GMD	$R_{0.25}$	D
容重	0.450*	0.490**	-0.006	-0.078	-0.004	0.139	-0.337	-0.478*	-0.490**	0.544**
质量含水量	0.239	0.059	0.720**	0.792**	0.851**	-0.860**	0.857**	0.638**	-0.059	-0.087
体积含水量	0.402*	0.232	0.732**	0.784**	0.871**	-0.836**	0.761**	0.485*	-0.232	0.101
总孔隙度	-0.450*	-0.490**	0.006	0.079	0.005	-0.140	0.337	0.478*	0.490**	-0.544**
充气孔隙度	-0.568**	-0.469*	-0.531**	-0.525**	-0.634**	0.526**	-0.350	-0.062	0.469*	-0.407*
毛管孔隙度	-0.653**	-0.598**	-0.426*	-0.383*	-0.483*	0.344	-0.071	0.207	0.598**	-0.570**
毛管含水量	-0.593**	-0.590**	-0.201	-0.146	-0.238	0.097	0.177	0.397*	0.590**	-0.609**
碱解氮	-0.128	-0.265	0.419*	0.426*	0.525**	-0.452*	0.720**	0.679**	0.265	-0.371
速效磷	0.045	-0.068	0.678**	0.709**	0.533**	-0.679**	0.517**	0.405*	0.068	-0.130
速效钾	-0.004	-0.167	0.574**	0.676**	0.699**	-0.771**	0.861**	0.731**	0.167	-0.293
全氮	-0.447*	-0.561**	0.142	0.178	0.254	-0.256	0.662**	0.764**	0.561**	-0.646**
全磷	-0.056	-0.114	0.297	0.288	0.245	-0.284	0.546**	0.474*	0.114	-0.193
全钾	0.581**	0.524**	0.540**	0.539**	0.502**	-0.507**	0.213	-0.071	-0.524**	0.476*
有机碳	-0.327	-0.425*	0.113	0.173	0.263	-0.267	0.660**	0.697**	0.425*	-0.506**

注: ** 和 * 分别表示各指标在 0.01, 0.05 水平上存在 Person 相关性, 下表同。

2.6 土壤团聚体与作物产量间相关分析

土壤团聚体稳定性参数与作物产量相关分析表明(表 8), 0—10 cm 土层机械稳定性团聚体稳定性参数与产量显著相关, 且与 D 显著负相关($p < 0.05$)。0—20 cm 土层水稳性团聚体 GMD 和 MWD 与作物

产量呈极显著正相关($p < 0.01$)。在 20—30 cm 土层, 土壤团聚体 PAD, E_{LT} 、机械稳定性团聚体 $R_{0.25}$, 水稳性团聚体 MWD 和 D 均极显著正相关于作物产量($p < 0.01$), 且机械稳定性团聚体 D 、水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 与作物产量呈显著负相关($p < 0.05$)。

表 8 土壤团聚体与作物产量间相关分析

土层	PAD	E_{LT}	干筛				湿筛			
			MWD	GMD	$R_{0.25}$	D	MWD	GMD	$R_{0.25}$	D
0—10	0.617	0.517	0.748*	0.719*	0.863**	-0.754*	0.565	-0.115	-0.517	0.430
产量	10—20	-0.264	-0.473	-0.337	0.258	-0.093	0.816**	0.888**	0.486	-0.653
	20—30	0.956**	0.944**	0.487	0.474	0.859**	-0.731*	0.908**	-0.540	-0.944**

3 讨论

已有研究表明, 在秸秆还田试验中, 秸秆还田可以提高土壤有机质和养分含量, 增加微生物多样性和酶活性, 提高土壤孔隙度, 降低土壤容重和紧实度, 防止土壤因水分和压力形成大土块^[25]。秸秆还田后, 0—30 cm 土层 > 10 mm 粒级机械稳定性团聚体含量显著低于 CK 处理。在 0—10 cm 土层, 相比 HR 和 CK 处理, WR 处理显著降低了 > 2 mm 粒级机械稳定性团聚体含量, 显著增加 < 2 mm 粒级含量($p < 0.05$)。可能因为表层土壤水分较低, 土壤压力较弱, 秸秆的加入亦对土壤产生疏松作用, 保护小粒径土壤免于形成大土块结构。良好的土壤结构状况不仅要求较多的机械稳定性大团聚体含量, 还应具有一定的稳定性, 尤其是水稳性, 才能防止耕作、施肥、灌溉、降雨冲击等影响下土壤结构迅速破裂恶化^[26]。秸秆还田后, 0—30 cm 土层水稳性大团聚体含量显著增加

($p < 0.05$), 与土壤大团聚体周转及有机质变化的胚胎发育模型相符合^[27]。当外源有机残体进入时, 可促进土壤颗粒有机质(POM)的形成, 在矿物质、微生物分泌物和 POM 相互作用下形成微团聚体核心, 继续在土壤有机质胶结作用下, 微团聚体、矿物质和 POM 结合形成大团聚体, 促进土壤大团聚体数量增加^[28-29]。此外, WR 处理较 HR 和 CK 处理显著增加 0—10 cm 土层 0.5~1, 0.25~0.5 mm 粒级水稳性团聚体含量。主要因为夏高粱生长初期温高水足, 促进秸秆腐解, 增加土壤有机质含量。一方面, 有机质的输入刺激土壤微生物繁殖及活性, 促使分泌物、矿物质和 POM 形成大团聚体^[5]。另一方面, 土壤养分的增加促进作物生长和根系代谢产物增加, 进一步促使大团聚体的形成^[30]。秸秆还田量越多, 有机质输入越多, 水稳性大团聚体含量越多^[31]。但小粒级团聚体相比大粒级团聚体, POM 相对更加封闭, 团聚体结构更加稳定^[32]。秸秆还田后, 有机质富集于表

层^[33], 0—10 cm 土层有机质、微生物数量及种类较 10—30 cm 土层多, 因此, 秸秆还田后 0—10 cm 土层大团聚体含量增加, 微团聚体减少的现象要比 10—30 cm 土层显著 ($p < 0.05$)。但众学者针对稻麦系统^[34]、棉花连作系统^[35]及双季稻系统^[36]研究发现作物秸秆还田对土壤水稳性团聚体各粒级分布及含量影响不同, 应该是作物秸秆的特殊性、种植系统的不同与土壤类型综合作用的结果^[37]。

平均重量直径 (MWD) 和平均几何直径 (GMD) 可以灵敏地反映土壤团聚体的粒径分布状况, 大团聚体百分含量越高, MWD 值越大, 说明团聚体的平均粒径团聚程度越高; 团聚体越稳定, GMD 值越大^[38]。本研究发现, 秸秆还田显著促进土壤水稳性团聚体 $R_{0.25}$ 含量及 0—10 cm 土层水稳性团聚体 GMD 值的提升, 说明秸秆还田使水稳性团聚体含量及稳定性提高。秸秆还田后, 土壤机械稳定性团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 含量显著低于 CK 处理, 这主要是 CK 处理机械稳定性大团聚体含量占据百分比居高的缘故。结合上述各粒径分布研究结果, 由于 WR 处理显著提升土壤水稳性大团聚体含量和小粒径机械稳定性团聚体含量, 所以 WR 处理下土壤水稳性团聚体 GMD 和 $R_{0.25}$ 含量最高, 机械稳定性团聚体稳定参数最低。此外, 经干筛和湿筛处理, 土壤团聚体 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 变化趋势不同, 因为干筛法反映原状土中非水稳性和水稳性团聚体的总体情况, 而湿筛法仅反映水稳性团聚体特征, 故两者稳定参数结果不同, 湿筛法更能准确反映秸秆还田量对土壤稳定性的影响^[39]。其中, 土壤团聚体 GMD 是以土壤团聚体分布服从对数正态分布为前提, 然而众学者认为团聚体分布并非对数正态分布^[40], 致使结果中 GMD 与 MWD 表现不同。相关性结果表明, 土壤机械稳定性团聚体 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 与土壤含水量、速效养分和全钾呈显著正相关, 与土壤孔隙度呈显著负相关 ($p < 0.05$), 说明秸秆进入土壤后, 土壤水分及速效养分会刺激土壤微生物繁殖及多样性, 提升秸秆中有机质返还农田的效率, 同时全钾含有金属阳离子, 亦为大团聚体形成条件, 能够有效增加土壤大团聚体含量。土壤水稳性团聚体稳定参数与土壤有机碳呈正相关, 主要是因为土壤水稳性团聚体稳定性与大团聚体含量显著正相关, 而有机碳中 POM 则是大团聚体形成的主要因子, 这一研究结论在杨如萍^[41]、高飞^[42]、Osborne^[29]等的研究中也得到了证实。

土壤团聚体破坏率 (PAD)、不稳定团粒指数 (E_{LT}) 和分形维数 (D) 能够敏锐地反映出土壤稳定性及黏粒含量, 其值越高, 土壤黏粒含量越高, 结构越不

稳定, 也表明退化程度增加^[43]。秸秆还田后, 0—30 cm 土层团聚体 PAD 和 E_{LT} 显著降低, 且两者变化趋势相似, 说明秸秆还田能够有效提高土壤稳定性, 防治土壤退化。WR 处理在 0—10 cm 土层团聚体 PAD 和 E_{LT} 显著低于 CK 和 HR 处理, 主要原因是表层土壤水分、温度、空气充足, 秸秆残留量高于深层土壤, 分解过程对水稳性大团聚体形成所需的 POM、微生物含量、酶活性、金属阳离子含量等胶结物质均有提高。在 10—20, 20—30 cm 土层, HR 与 WR 处理表现不同, 因为秸秆还田量随着耕作方式进入深层土壤秸秆量不同, 且深层土壤空气含量不足, 秸秆过量将抑制腐解^[44]。可能 WR 处理在 10—20 cm 土层秸秆还田量超出该土层所容纳的最大秸秆量, 在 20—30 cm 土层秸秆还田量则在土壤所容纳范围之内, 因而仅提升 20—30 cm 土壤稳定性。基于干筛法, 在 0—30 cm 土层内, 各处理的土壤团聚体 D 随着深度的增加而增大, 湿筛法则呈“V”字形趋势, 这与李娟^[43]、李涵^[45]等研究结果不同, 可能是因为农田利用方式、作物及土壤质地不同的缘故。相比 0—10 cm 土层干筛和湿筛各处理结果, 团聚体 D 变化趋势相反, 说明秸秆还田的确能够提升土壤稳定性。李娟等^[43]研究发现土壤团聚体 D 与 $R_{0.25}$ 存在负线性关系, 及 $R_{0.25}$ 含量越高, D 越低。以上研究结果显示秸秆还田可以有效增加 < 0.25 mm 粒级机械稳定性团聚体含量, 同时秸秆分解过程中产生的胶结剂可以增加土壤水稳性大团聚体含量, 也说明了 WR 处理下土壤水稳性团聚体 D 最低的原因。土壤容重和全钾含量均显著正相关于土壤团聚体 PAD, E_{LT} 及水稳性团聚体 D , 说明改善土壤容重、增加金属阳离子含量有助于提高土壤稳定性。土壤孔隙度、毛管含水量则与土壤团聚体 PAD, E_{LT} 及水稳性团聚体 D 呈显著负相关, 与机械稳定性团聚体 D 呈显著正相关, 主要因为该地区农田土壤主要以机械稳定性大团聚体为主, 但其在农业生产中保水保肥性能差, 灌溉后土壤易沉淀板结, 影响土壤通透性; 另外, 黄土高原区春季多发土壤风蚀现象亦是因为农户在播种前进行镇压、耙耱等破坏机械大团聚体的缘故^[46]。此外, 产量与 0—10 cm 机械稳定性团聚体、10—30 cm 土层水稳性团聚体、20—30 cm 团聚体 PAD, E_{LT} 呈显著相关性, 主要是因为 0—10 cm 土壤机械大团聚体能够有效缓解土壤板结和雨水对幼苗根系的冲刷, 10—20 cm 土层水稳性大团聚体含量越高, 说明土壤养分、微生物、菌丝含量越高, 且团聚体稳定性越高, 土壤疏松程度越高, 有利于作物生长。

本文基于秸秆还田量对麦梁两熟制农田土壤团聚体稳定性短期试验,与秸秆未还田相比,秸秆还田有利于增加土壤有机质含量^[47],改善土壤结构,提高土壤大团聚体含量及团聚体稳定性,且秸秆100%还田处理效果优于50%还田处理。

4 结论

(1) 基于麦梁两熟制农田系统,在短期内,秸秆还田措施能够显著降低0—30 cm土层 >10 和 <0.25 mm粒级机械稳定性团聚体含量,增加0.25~2 mm各亚粒级水稳性大团聚体含量,从而提高土壤团聚体 $R_{0.25}$ 含量。其中,WR处理下土壤机械及水稳性稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 含量较HR处理分别显著降低约1.9%~9.5%和16.7%~65.9%($p<0.05$)。

(2) 秸秆还田措施能够降低土壤团聚体PAD, E_{LT} 及 D 值,且WR处理较HR处理作用效果更为显著($p<0.05$)。其中,WR处理下0—30 cm土壤团聚体PAD及 E_{LT} 值较CK处理分别显著降低约1.6%~7.2%和0.7%~4.4%,并随着土层的加深逐渐减弱。进一步分析土壤团聚体稳定性与理化性状相关性发现,土壤团聚体稳定参数与土壤容重及全钾含量呈显著正相关,且与土壤孔隙度、含水量、全氮和有机碳含量呈显著负相关($p<0.05$)。

综合说明麦梁秸秆全还田在短期年限内可以增加土壤有机碳含量,改善土壤孔隙结构及持水保水能力,提高土壤团聚体稳定性,促使杂粮和经济作物产量的同步增长。

参考文献:

[1] Ananyeva K, Wang W, Smucker A J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013,57(23):868-875.

[2] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011,43(3):657-666.

[3] 唐晓红,魏朝富,吕家格,等. 保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):49-54.

[4] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000,64(3):1042-1049.

[5] 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.

- [6] 黄传琴,周琴,谭文峰. 不同农业利用条件对黄土胶结物质组成与团聚特征的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2017,36(4):43-49.
- [7] Qiu Q, Wu L, Ouyang Z, et al. Priming effect of maize residue and urea N on soil organic matter changes with time[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016,100:65-74.
- [8] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013,164(1):14-22.
- [9] Dalal R C, Chan K Y, Dalal R C, et al. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. *Soil Research*, 2001,39(3):435-464.
- [10] Hou P, Li G, Wang S, et al. Methane emissions from rice fields under continuous straw return in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013,25(9):1874-1881.
- [11] Mu X, Zhao Y, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016,78(8):32-43.
- [12] 韩新忠,朱利群,杨敏芳,等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012,31(11):2192-2199.
- [13] 华萃,吴鹏飞,何先进,等. 紫色土区不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响[J]. *生物多样性*, 2014, 22(3):392-400.
- [14] Zhu L, Hu N, Zhang Z, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015,135(12):283-289.
- [15] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016,216(7):82-88.
- [16] 蔡丽君,张敬涛,盖志佳,等. 免耕条件下秸秆还田量对土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2015,46(5):1127-1132.
- [17] Zhang P, Wei T, Jia Z, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2014,230/231(7):41-49.
- [18] 景小兰,柳青山,平俊爱,等. 山西省高粱产业发展趋势与对策[J]. *山西农业科学*, 2014,42(6):621-624.

- [19] 新华社. 中共中央国务院关于落实发展新理念加快农业现代化实现全面小康目标的若干意见[N]. (2016-01-27) [2016-03-25]. <http://www.xinhuanet.com/fortune/cjz-thgjj/158.htm>, 2016.
- [20] 郭秀卿, 李新基, 崔福柱, 等. 夏播高粱新品种晋杂 30 号的选育及栽培技术[J]. 山西农业科学, 2016, 44(6): 754-756.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 132(3-4): 243-251.
- [24] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [25] 朱敏, 石云翔, 孙志友, 等. 秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1025-1033.
- [26] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1360-1365.
- [27] Yilmaz E, Sönmez M. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168(5): 118-124.
- [28] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
- [29] Osborne S L, Johnson J M F, Jin V L, et al. The impact of corn residue removal on soil aggregates and particulate organic matter[J]. *BioEnergy Research*, 2014, 7(2): 559-567.
- [30] 孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376.
- [31] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 141-145.
- [32] Tong Z, Jichang H, Yang Z, et al. The effects of different ratios of feldspathic sandstone and sand compound soil on water-stable aggregates in 4 years crop planting [J]. *Asian Agricultural Research*, 2017, 9(3): 96-101, 109.
- [33] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373-378.
- [34] 张翰林, 郑宪清, 何七勇, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 216-220.
- [35] 王双磊, 刘艳慧, 宋宪亮, 等. 棉花秸秆还田对土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3944-3952.
- [36] 安婉丽, 谢海云, 王维奇, 等. 秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体养分及其生态化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 150-156.
- [37] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同类型土壤团聚体中氮库分布的研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 304-313.
- [38] Yin Yan, Wang Li, Liang Chenghua, et al. Soil aggregate stability and iron and aluminium oxide contents under different fertiliser treatments in a long-term solar greenhouse experiment[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 760-767.
- [39] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 秸秆和地膜覆盖对旱作玉米田土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 405-413.
- [40] Guber A K, Pachepsky Y A, Levkovsky E V. Fractal mass-size scaling of wetting soil aggregates[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3/4): 317-322.
- [41] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256.
- [42] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 100-106.
- [43] 李娟, 韩霖昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 248-253.
- [44] 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.
- [45] 李涵, 张鹏, 贾志宽, 等. 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.
- [46] 苏永中, 王芳, 张智慧, 等. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 741-748.
- [47] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.