

吴海梅,逢 蕾,路建龙,等. 秸秆带状覆盖对土壤团聚体及团聚体有机碳含量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):187-195.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.026

# 秸秆带状覆盖对土壤团聚体及团聚体有机碳含量的影响

吴海梅<sup>1,2,3</sup>, 逢 蕾<sup>1,3</sup>, 路建龙<sup>4</sup>, 张旭辉<sup>5</sup>, 郑浩飞<sup>1,3</sup>, 杨 楠<sup>3</sup>, 周彦莉<sup>3</sup>

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃兰州 730070; 2. 培黎职业学院,甘肃张掖 734100;

3. 甘肃农业大学农学院,甘肃兰州 730070; 4. 甘肃农业大学财经学院,甘肃兰州 730070;

5. 肃州区国家现代农业示范区管理委员会,甘肃酒泉 735000)

**摘要:**利用田间定位试验研究旱区秸秆带状覆盖下土壤团聚体含量及团聚体有机碳分布。设 4 种覆盖措施:白膜双垄沟覆盖(TW)、黑膜双垄沟覆盖(TB)、秸秆带状覆盖(TM),以平作无覆盖为对照(TN),采用干筛法和湿筛法共同测定团聚体分布特征及团聚体总有机碳、团聚体易氧化态有机碳含量。结果表明,≥0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量在 69.29% 以上,水稳性团聚体含量则集中在 <0.25 mm 粒径;0~5、5~10、10~20 cm 土层,TM 处理较 TN 处理显著提高 2~<5 mm 和 1~<2 mm 粒径机械稳定性团聚体含量,2~<5 mm 粒径分别提高 54.38%、21.18% 和 60.91%,1~<2 mm 粒径分别提高 45.09%、27.04% 和 73.13%。TM 处理促进了 5~20 cm 土层水稳性团聚体向 ≥0.25 mm 粒径转化,TW 处理促进了 5~30 cm 土层水稳性团聚体向 ≥0.25 mm 粒径转化。TM 处理较 TN 处理提高了 0~30 cm 土层 ≥5 mm 和 0.25~<0.5 mm 粒径团聚体有机碳含量和 0~5 cm 土层各粒径团聚体易氧化态有机碳含量;TW 处理较 TN 处理降低了 0~5 cm 和 20~30 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量和 5~10 cm 土层各粒径易氧化态有机碳含量;TB 处理较 TN 处理降低了 0~5 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量,增加了 10~30 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量和团聚体易氧化态有机碳含量。可见 TM 处理提高了 0~30 cm 土层 0.25~<5 mm 和 <0.074 mm 粒径机械稳定性团聚体含量,TB 和 TW 处理提高了 0~10 cm 土层 0.25~<5 mm 粒径机械稳定性团聚体含量,TM 处理对团聚体有机碳和浅层团聚体易氧化态有机碳含量有促进作用,TW 和 TB 处理对浅层土壤团聚体有机碳和团聚体易氧化态有机碳含量有消极作用。本研究结果可充实该地区有关土壤固碳和土壤可持续利用的研究。

**关键词:**土壤有机碳;土壤团聚体;易氧化态有机碳;秸秆带状覆盖

**中图分类号:**S156 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0187-08

全球用于旱地农业上的土地约占 41%,旱地农业为全球 38% 以上的人口提供粮食<sup>[1]</sup>。在我国,约 21.7% 的农业生产位于半干旱地区,其年降水量在 250~550 mm 之间但年蒸发量高达 900~1 980 mm,是降水量的几倍,这种显著的不平衡极大地导致了该地区的土壤水分不足<sup>[2]</sup>,因此在我国半干旱地区充分利用有限的降水采取有效的耕作措施抑制无效的土壤水分蒸发是缓解干旱胁迫、提高作物产量

的主要途径。覆盖技术是干旱、半干旱和干旱易发地区保护和管理土壤的有效手段,通过覆盖栽培技术可以改变农田土壤的“水、肥、气、热”条件,从而改变农田土壤质量,有效解决干旱和不合理耕作带来的一系列问题,最常见的有秸秆覆盖和地膜覆盖。在半干旱雨养区覆盖效果较好的是秸秆带状覆盖,秸秆带状覆盖栽培技术覆盖带不种植作物,播种带种植密度增加,总播种量不变,秸秆带状覆盖下小麦产量与地膜覆盖产量接近<sup>[3]</sup>,在马铃薯上,秸秆带状覆盖较目前甘肃省主推的黑膜双垄沟全膜覆盖技术增产 13.1%,田间病害也较黑膜覆盖和露地栽培明显减轻<sup>[4]</sup>。地膜覆盖在该地区常用的是白膜双垄沟覆盖和黑膜双垄沟覆盖。

土壤团聚体是调节土壤性质的基本核心,其数量与分布是影响土壤质量的重要因素<sup>[5]</sup>。稳定的团聚体通过保持水分渗透、水分含量、养分循环特别是碳贮量,为植物生长和土壤质量改善创造有利的条件<sup>[6]</sup>。土壤团聚体的稳定性是决定团聚体团

收稿日期:2022-07-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:32160525);甘肃省自然科学基金(编号:20JR5RA034);甘肃省高等学校创新基金(编号:2020B125);甘肃农业大学国家级大学生创新创业训练计划(编号:202210733010);甘肃农业大学省级大学生创新创业训练计划项目(编号:S202110733006);甘肃农业大学校级大学生创新创业训练计划项目(编号:202201037、202201038)。

作者简介:吴海梅(1995—),女,甘肃武威人,硕士,讲师,主要从事土壤养分研究。E-mail:1518861554@qq.com。

通信作者:逢 蕾,博士,副教授,主要从事覆盖栽培对土壤生态影响的研究。E-mail:125530457@qq.com。

聚力以及土壤抗侵蚀能力和退化能力的基本属性<sup>[7]</sup>,是一个高度复杂的参数,影响着广泛的土壤指标,包括碳稳定、土壤孔隙度、抗水侵蚀性和抗地表径流等<sup>[8]</sup>,团聚体的稳定性降低和增加与土壤的有机碳组成和含量有关<sup>[7]</sup>。团聚体的破碎主要是由水分导致的,因此,目前的研究多将水稳性团聚体的稳定性作为评价团聚体质量的标准<sup>[9]</sup>。团聚体内有机碳和有机碳活性组分已被广泛用于诊断田间生态系统中由管理引起的有机碳含量变化<sup>[10]</sup>。研究人员普遍认为土壤团聚体是固定有机碳的重要因素之一,无论覆盖方式和作物类型如何,大团聚体是土壤中碳封存的主要场所<sup>[11-12]</sup>。陈文超等研究发现,秸秆覆盖还田提高了各土层土壤所有粒级中团聚体有机碳含量<sup>[13]</sup>;地膜覆盖对团聚体中有机碳浓度影响因研究时间、地点不同研究结果也区别较大<sup>[14-15]</sup>。关于秸秆带状覆盖的研究多集中于土壤水分、温度和产量。因此研究秸秆带状覆盖下土壤团聚体分布及团聚体有机碳含量对黄土高原半干旱雨养区农田土壤结构改良、土壤碳固存以及土壤可持续利用具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验于 2017—2020 年布设在甘肃省定西市通

渭县平襄镇的甘肃农业大学旱作试验基地(105°19'E,35°11'N),该地属中温带干旱性气候,海拔 1 590 m,年均气温 7.2 ℃,年日照时数 2 100 ~ 2 430 h,无霜期 120 ~ 170 d,多年平均降水量 339.7 mm。试验地土壤类型为黄绵土,0 ~ 200 cm 土体平均土壤容重为 1.25 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设 4 个处理,分别为白膜双垄沟覆盖(TW)、黑膜双垄沟覆盖(TB)、秸秆带状覆盖(TM)、露地平作无覆盖(TN,对照)。每个处理 3 次重复,共 12 个小区,完全随机区组排列,小区面积 200 m<sup>2</sup>(20 m × 10 m),各小区施肥量相同,施入纯氮 120 kg/hm<sup>2</sup>,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 120 kg/hm<sup>2</sup>。播种密度均为 5.25 万株/hm<sup>2</sup>。4 种处理如下:TN 平作不覆盖,常规种植;TW 和 TB 垄宽 60 cm,高 15 cm,垄沟宽 50 cm,大垄用 70 cm 宽的白色或黑色地膜覆盖垄面,垄沟不覆盖,按每垄播种 2 行;TM 如图 1 所示,播前 7 d 覆盖带(TC)和种植带(TG)比为 50 : 70,相间排列,覆盖带(TC)采用玉米整秆覆盖,覆盖量约 5.25 万株/hm<sup>2</sup>,种 2 行,穴株距约 33 cm,“品”字形穴播玉米,分别取 TC 和 TG 的土样单独储存并测定相关指标,计算 TC 和 TG 的加权平均值作为 TM 的值。2017—2020 年种植作物为小麦—小麦—马铃薯—玉米。

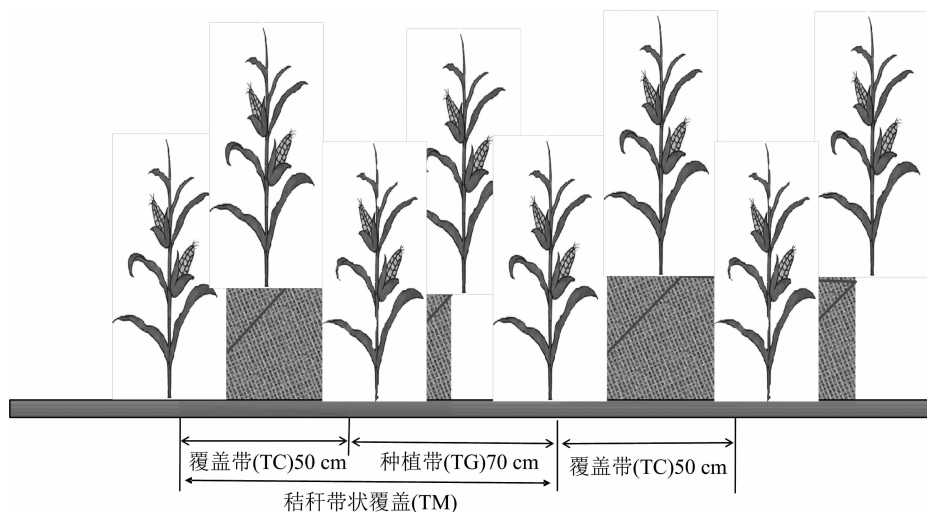


图1 秸秆带状覆盖示意图

### 1.3 样品采集与分析

2020 年 10 月 18 日在玉米成熟期按五点取样法用铁锹取 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层原状土,原状土用硬质塑料盒带回实验室,自然风干至达到土壤塑限后沿土壤结构的自然剖面掰成

1 cm 左右的小土块,拣去植物根系等杂物后在避光处风干备用。

土壤机械稳定性团聚体测定方法是将孔径分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.074 mm 的土筛按孔径从大到小叠放,用四分法称取 200 g 风干土样放置于

土筛上,筛分成不同粒径的团聚体,分别为 $\geq 5$  mm、 $2 \sim < 5$  mm、 $1 \sim < 2$  mm、 $0.5 \sim < 1$  mm、 $0.25 \sim < 0.5$  mm、 $0.074 \sim < 0.25$  mm、 $< 0.074$  mm,称质量并计算其质量比例,将筛分的各粒级土壤团聚体分装,用于土壤团聚体各粒级总有机碳和易氧化态有机碳含量测定。

土壤水稳性团聚体的测定方法是将孔径为 2、1、0.5、0.25 mm 的土筛按孔径由大到小叠放,置于水桶中,称取 200 g 风干土样倒入土筛上,加蒸馏水使水面没过土筛,先静置 5 min 后将套筛在 2 min 内以 3 cm 的振幅上下振动 50 次,将各筛层团聚体分别洗入小铝盒中,60 ℃ 烘干至恒质量,称量各粒径的团聚体质量,粒径分别为 $\geq 2$  mm、 $1 \sim < 2$  mm、 $0.5 \sim < 1$  mm、 $0.25 \sim < 0.5$  mm、 $< 0.25$  mm。

利用水稳性团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)表征团聚体稳定性,计算方法参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>。

土壤总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾外加热法<sup>[16]</sup>测定;易氧化态有机碳(EOC)含量采用高锰酸钾氧化法<sup>[17]</sup>测定。

#### 1.4 数据处理

用 Excel 2019 进行数据处理和绘图,SPSS 22.0 对数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆带状覆盖对机械稳定性团聚体含量的影响

由表 1 可知,经干筛后,各处理机械稳定性团聚体以 $\geq 0.25$  mm 粒径为主,均在 69.29% 以上,最高达 83.30%。整体看在各土层,TM 处理较 TN 处理均提高了 $2 \sim < 5$ 、 $1 \sim < 2$ 、 $0.5 \sim < 1$ 、 $0.25 \sim < 0.5$ 、 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量;在 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层,TW 和 TB 处理较 TN 处理均提高了 $2 \sim < 5$ 、 $1 \sim < 2$ 、 $0.5 \sim < 1$ 、 $0.25 \sim < 0.5$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量。在 0 ~ 5 cm 土层,TW、TB 和 TM 处理较 TN 处理均显著提高了 $2 \sim < 5$  mm 和 $1 \sim < 2$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量, $2 \sim < 5$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量较 TN 处理分别提高 38.92%、33.50% 和 54.38%, $1 \sim < 2$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量较 TN 处理分别显著提高 27.70%、28.38% 和 45.09% ( $P < 0.05$ );TM 处理较 TN 处理显著提高 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,较 TN 处理提高 28.50%

( $P < 0.05$ )。在 5 ~ 10 cm 土层,TB 处理较 TN 处理显著提高 $2 \sim < 5$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,较 TN 处理提高 26.65%,TM 处理较 TN 处理显著提高 $2 \sim < 5$ 、 $1 \sim < 2$ 、 $0.5 \sim < 1$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,较 TN 处理分别提高 21.18%、27.04% 和 28.13% ( $P < 0.05$ )。在 10 ~ 20 cm 土层,TM 较 TN 处理显著提高 $2 \sim < 5$ 、 $1 \sim < 2$ 、 $0.5 \sim < 1$ 、 $0.25 \sim < 0.5$ 、 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,较 TN 分别提高 60.91%、73.13%、50.00%、48.71% 和 40.05% ( $P < 0.05$ )。在 20 ~ 30 cm 土层,TM 处理较 TN 处理显著提高 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,较 TN 提高 79.77% ( $P < 0.05$ )。

在 0 ~ 10 cm 土层,TG 较 TC 显著提高 $0.5 \sim < 1$  mm 和 $0.25 \sim < 0.5$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,0 ~ 5 cm 土层 TG 较 TC 分别显著提高 67.73% 和 78.11%,5 ~ 10 cm 土层,TG 较 TC 分别显著提高 35.85% 和 40.15% ( $P < 0.05$ )。在 0 ~ 5、5 ~ 10、20 ~ 30 cm 土层, $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体 TC 较 TG 分别显著提高了 88.24%、75.76% 和 24.13% ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 秸秆带状覆盖对水稳性团聚体含量的影响

如表 2 所示,湿筛后各处理各土层土壤水稳性团聚体 $\geq 0.25$  mm 粒径大幅度减少,以 $< 0.25$  mm 粒径为主。同土层同处理土壤水稳性团聚体, $\geq 2$ 、 $1 \sim < 2$ 、 $0.5 \sim < 1$ 、 $0.25 \sim < 0.5$  mm 粒径变化趋势均表现为先降低后增加, $1 \sim < 2$  mm 粒径占比最小。在 0 ~ 5 cm 土层,TW、TB 和 TM 处理较 TN 处理均显著降低了 $\geq 2$  mm 粒径水稳性团聚体含量,显著增加了 $< 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量,较 TN 处理显著增加了 30.81%、26.47% 和 20.44%;TB 和 TM 处理较 TN 处理显著增加 $0.25 \sim < 0.5$  mm 粒径水稳性团聚体含量,较 TN 处理显著增加了 31.40% 和 33.87% ( $P < 0.05$ )。在 5 ~ 10 cm 土层,TW 和 TB 处理较 TN 处理均显著增加了 $\geq 2$  mm 粒径水稳性团聚体含量,显著降低了 $< 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量( $P < 0.05$ )。在 10 ~ 20 cm 土层,TW 和 TM 处理均显著增加了 $\geq 2$  mm 粒径水稳性团聚体含量,TW 和 TM 处理较 TN 处理均显著降低了 $< 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量;TB 处理较 TN 处理显著降低了 $\geq 2$  mm 粒径水稳性团聚体含量,TB 处理较 TN 处理显著增加了 $< 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体含量( $P < 0.05$ )。在 20 ~ 30 cm 土层,

表 1 不同覆盖措施下土壤各粒级机械稳定性团聚体所占比例

土壤剖面深度 (cm)	处理	不同粒级团聚体所占比例 (%)						
		≥5 mm	2 ~ <5 mm	1 ~ <2 mm	0.5 ~ <1 mm	0.25 ~ <0.5 mm	0.074 ~ <0.25 mm	<0.074 mm
0 ~ 5	TN	27.43a	11.64d	10.29b	11.94bc	7.99b	13.65a	8.42c
	TW	26.22a	16.17bc	13.14a	14.37b	8.73ab	12.42a	6.30d
	TB	22.61b	15.54c	13.21a	13.44b	8.98ab	12.27a	7.70c
	TG	19.34c	17.66ab	14.76a	17.36a	10.58a	14.43a	7.91c
	TC	20.74bc	18.39a	15.17a	10.35c	5.94c	12.90a	14.89a
	TM	19.93c	17.97ab	14.93a	14.44b	8.65ab	13.79a	10.82b
5 ~ 10	TN	33.21a	15.91c	12.72b	13.40c	8.05b	11.87b	5.82ab
	TW	24.35b	18.75abc	14.38ab	15.08bc	8.67ab	10.36b	7.58a
	TB	23.31b	20.15ab	14.66ab	14.24bc	8.57ab	12.05b	7.58a
	TG	14.66c	17.56bc	16.66a	19.29a	10.89a	11.07b	4.62b
	TC	16.47c	21.68a	15.48a	14.20bc	7.77b	14.44a	8.12a
	TM	15.41c	19.28ab	16.16a	17.17ab	9.59ab	12.48b	6.08ab
10 ~ 20	TN	34.67a	13.38b	9.90c	10.48b	6.20c	12.00a	7.39b
	TW	28.82b	22.51a	11.16bc	10.76b	5.84c	10.95a	9.29a
	TB	24.01c	24.12a	13.11b	12.93b	7.14c	10.54a	7.12b
	TG	14.95d	21.47a	17.23a	15.07a	7.85bc	11.18a	10.93a
	TC	12.51d	21.62a	17.00a	16.64a	11.13a	12.98a	9.53a
	TM	13.94d	21.53a	17.14a	15.72a	9.22b	11.93a	10.35a
20 ~ 30	TN	34.02a	22.63ab	10.89b	8.72c	4.81b	11.18b	7.71c
	TW	30.03b	20.43b	12.63ab	11.12b	4.88b	11.82b	8.48c
	TB	17.29d	24.89a	15.08a	13.42a	8.50a	15.13a	7.96c
	TG	15.39d	25.36a	12.55ab	10.46bc	6.46b	10.37b	12.60b
	TC	24.23c	24.01a	13.19ab	10.88bc	5.49b	10.52b	15.64a
	TM	19.07d	24.80a	12.81ab	10.63bc	6.05b	10.43b	13.86ab

注:同列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

TW 和 TB 处理较 TN 处理均显著增加了≥2 mm 粒径水稳性团聚体含量,较 TN 处理分别显著增加 280.67%和 151.79%,TW 和 TB 处理均显著降低了<0.25 mm 粒径水稳定性团聚体含量。

2.3 秸秆带状覆盖对土壤团聚体稳定性的影响

如表 3 所示,不同土层不同覆盖措施对土壤团聚体稳定性的影响不同。TW 处理较 TN 处理显著提高了 5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤团聚体的稳定性,MWD 值分别提高了 86.79%、116.67%和 117.65%,GMD 值分别提高了 57.14%、128.00%和 52.94% ( $P<0.05$ )。与 TN 处理相比,TB 处理显著提高了 5 ~ 10 cm 和 20 ~ 30 cm 土层土壤团聚体的稳定性,MWD 值分别提高 169.81%和 58.82%,GMD 值分别提高 142.86%和 23.53% ( $P<0.05$ )。TM 处理较 TN 处理显著提高了 10 ~ 20 cm 土层土壤团聚体的稳定性,MWD 值和 GMD 值分别提高了 37.50%和 32.00% ( $P<0.05$ )。

2.4 秸秆带状覆盖对各粒级团聚体总有机碳 (TOC) 的影响

如表 4 所示,整体看 0 ~ 30 cm 土层各处理 0.5 ~ 0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量较高。在 0 ~ 5 cm 土层,TC 处理较 TN 处理增加了≥5、2 ~ <5、0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 TOC 含量,≥5 mm 粒径团聚体 TOC 含量显著增加了 7.73%;TM 处理较 TN 处理增加了≥5 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 粒径团聚体 TOC 含量,但差异不显著;TW 处理较 TN 处理显著降低了≥5 mm 和 0.5 ~ <1 mm 粒径团聚体 TOC 含量,分别显著降低 8.05%和 5.46%;TB 较 TN 处理显著降低了≥5、2 ~ <5、1 ~ <2、0.5 ~ <1 mm 粒径团聚体 TOC 含量,分别显著降低 5.54%、9.95%、10.05%和 11.27% ( $P<0.05$ )。在 5 ~ 10 cm 土层,TM 处理较 TN 处理增加了≥5 mm 和 0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 TOC 含量,差异不显著;TW 和 TB 处理较 TN 处理降低了

表 2 不同覆盖措施下土壤各粒级水稳定性团聚体组成

土壤剖面深度 (cm)	处理	不同粒级团聚体所占比例(%)				
		≥2 mm	1 ~ 1 mm	0.5 ~ <1 mm	0.25 ~ <0.5 mm	<0.25 mm
0 ~ 5	TN	27.10a	2.41a	5.17a	9.30b	56.02d
	TW	12.44c	1.72a	3.43a	9.13b	73.28ab
	TB	8.81d	1.86a	6.25a	12.22a	70.85bc
	TG	4.17e	1.94a	4.60a	12.96a	76.34a
	TC	24.42b	2.45a	6.34a	11.73a	55.06d
	TM	12.60c	2.15a	5.32a	12.45a	67.47c
5 ~ 10	TN	9.84cd	2.84a	3.63a	5.66b	78.03a
	TW	23.86b	1.80a	3.27a	5.57b	65.49b
	TB	37.09a	1.44a	3.14a	6.63b	51.69c
	TG	7.49d	2.49a	4.24a	6.98b	78.80a
	TC	13.04c	2.85a	5.62a	9.46a	69.03b
	TM	9.80cd	2.64a	4.82a	8.01ab	74.73a
10 ~ 20	TN	15.24d	2.79a	3.72a	5.87b	72.38b
	TW	40.70a	1.82a	2.53a	6.62b	48.33e
	TB	8.17e	2.05a	3.50a	4.94b	81.33a
	TG	33.27b	2.03a	3.04a	5.23b	56.43d
	TC	12.59d	2.36a	3.86a	9.21a	71.98b
	TM	23.47c	2.17a	3.38a	6.89b	64.09c
20 ~ 30	TN	4.19c	2.15ab	3.52c	6.90b	83.25bc
	TW	15.95a	2.55a	2.89c	8.77a	69.85e
	TB	10.55b	1.67abc	3.30c	6.77b	77.72d
	TG	2.31d	1.91ab	5.40a	8.82a	81.56c
	TC	1.19d	0.91c	3.15c	5.38c	89.37a
	TM	1.84d	1.49bc	4.47b	7.38b	84.81b

表 3 不同覆盖措施对土壤团聚体稳定性的影响

团聚体 稳定性参数	处理	不同土壤剖面深度的团聚体稳定性			
		0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm
MWD(mm)	TN	1.13a	0.53d	0.72d	0.34c
	TW	0.61b	0.99b	1.56a	0.74a
	TB	0.52c	1.43a	0.46e	0.54b
	TG	0.35d	0.46d	1.31b	0.28d
	TC	1.05a	0.66c	0.63d	0.21e
	TM	0.64b	0.54d	0.99c	0.25de
GMD(mm)	TN	0.40a	0.21d	0.25d	0.17c
	TW	0.23b	0.33b	0.57a	0.26a
	TB	0.22b	0.51a	0.19e	0.21b
	TG	0.19c	0.20d	0.45b	0.17c
	TC	0.38a	0.25c	0.24de	0.15d
	TM	0.25b	0.22cd	0.33c	0.16c

≥5 mm 粒径团聚体 TOC 含量,差异不显著。在 10 ~ 20 cm 土层,整体表现为 TW、TB、TG 和 TM 处理较 TN 处理对各粒径团聚体 TOC 含量有促进作用,TC 处理团聚体 TOC 含量较 TN 处理降低;TW 处理较 TN 处理显著增加了 1 ~ <2 mm 粒径团聚体 TOC,显著增加 12.23%;TB 处理较 TN 处理显著增

加≥5、1 ~ <2、0.5 ~ <1、0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 TOC 含量,分别显著增加 22.87%、13.63%、16.31% 和 23.28%;TG 处理较 TN 处理显著增加了 ≥5、1 ~ <2、0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 TOC 含量,分别显著增加 18.87%、13.76% 和 13.85% ( $P<0.05$ )。在 20 ~ 30 cm 土层,TW 处理较 TN 处理降低了各粒级团聚体 TOC 含量,而整体上 TB 和 TM 处理对各粒级团聚体 TOC 含量有促进作用,TG 对各粒级团聚体 TOC 含量也有促进作用,说明 TM 处理对各粒级团聚体 TOC 含量的积极作用主要来源于 TG 处理的贡献。

2.5 秸秆带状覆盖对各粒级团聚体易氧化态有机碳(EOC)的影响

如表 5 所示,TN、TW、TB 和 TM 处理下各粒级 EOC 含量在 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层较高,20 ~ 30 cm 土层含量降低。在 0 ~ 5 cm 土层,TM 处理较 TN 处理各粒级团聚体 EOC 含量均有所提高,2 ~ <5、1 ~ <2、0.5 ~ <1 mm 粒径较 TN 处理分别显著提高 22.32%、15.06% 和 10.04% ( $P<0.05$ )。在 5 ~ 10 cm 土层,TM 处理较 TN 处理提高了≥5、

表 4 不同覆盖措施各粒级土壤团聚体总有机碳( TOC) 含量

土壤剖面深度 (cm)	处理	不同粒级团聚体总有机碳含量( g/kg)				
		≥5 mm	2 ~ <5 mm	1 ~ <2 mm	0.5 ~ <1 mm	0.25 ~ <0.5 mm
0 ~ 5	TN	9.57b	10.55a	10.94a	11.36a	11.50ab
	TW	8.80d	10.14ab	10.09ab	10.74b	11.35ab
	TB	9.04cd	9.50b	9.84b	10.08c	11.00b
	TG	9.45bc	10.18ab	9.61b	10.77b	11.24b
	TC	10.31a	10.69a	10.63ab	11.22ab	12.19a
	TM	9.81b	10.39a	10.03ab	10.96ab	11.64ab
5 ~ 10	TN	9.29a	9.77ab	9.96a	10.61a	10.73a
	TW	9.24a	10.24a	7.60a	7.37a	7.82a
	TB	9.10a	9.37ab	9.51a	9.92a	11.01a
	TG	9.43a	9.81ab	10.09a	10.18a	11.54a
	TC	9.51a	9.03b	9.52a	10.06a	11.03a
	TM	9.46a	9.49ab	9.85a	10.13a	11.33a
10 ~ 20	TN	7.26cd	7.75a	7.85bc	8.34b	8.59cd
	TW	7.36cd	8.34a	8.81a	8.45b	8.92c
	TB	8.92a	8.48a	8.92a	9.70a	10.59a
	TG	8.63ab	8.44a	8.93a	8.33b	9.78b
	TC	6.17d	7.33a	7.13c	7.52c	8.17d
	TM	7.60bc	7.98a	8.18ab	7.99bc	9.11c
20 ~ 30	TN	5.21ab	5.18ab	5.49a	5.77a	5.81a
	TW	3.97b	4.04b	4.53a	4.76a	4.68a
	TB	6.35a	6.57a	6.17a	6.24a	6.92a
	TG	5.89ab	5.24ab	5.38a	6.38a	5.93a
	TC	5.05ab	4.97ab	5.18a	5.73a	5.70a
	TM	5.54ab	5.13ab	5.30a	6.11a	5.83a

2 ~ <5、1 ~ <2、0.5 ~ <1 mm 粒径团聚体 EOC 含量,≥5 mm 和 2 ~ <5 mm 粒径分别显著提高 18.29% 和 34.65% ;TG 处理较 TN 处理增加了各粒径团聚体 EOC 含量,≥5 mm 和 2 ~ <5 mm 粒径分别显著提高 39.30% 和 52.63% ;TM 处理在 5 ~ 10 cm 土层团聚体 EOC 含量增加,TG 处理的贡献较大,TW 和 TB 处理整体看降低了各粒级团聚体 EOC 含量。在 10 ~ 20 cm 土层,TW 和 TM 处理下团聚体 EOC 含量变化相似,≥5 mm 和 2 ~ <5 mm 粒径下团聚体 EOC 降低,较 TN 处理≥5 mm 粒径团聚体 EOC 含量分别显著降低 18.41% 和 18.83% ;1 ~ <2 mm 和 0.5 ~ <1 mm 粒径下 TW 和 TM 处理团聚体 EOC 含量显著增加,较 TN 处理 1 ~ <2 mm 粒径团聚体 EOC 含量分别显著增加 25.42% 和 11.86% ,较 TN 处理 0.5 ~ <1 mm 粒径团聚体 EOC 含量分别显著增加 33.33% 和 30.25% ;TB 处理较 TN 处理提高了各粒级团聚体 EOC 含量,1 ~ <2 mm 和 0.5 ~ <1 mm 粒径下团聚体 EOC 含量显著增加 26.55% 和 39.51% ( *P* < 0.05 )。在 20 ~ 30 cm 土层,TW 处理较 TN 处理整体上降低了各粒级团聚体

EOC 含量,TB 处理增加了各粒级团聚体 EOC 含量,较 TN 处理≥5、2 ~ <5、1 ~ <2、0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 EOC 含量分别显著增加 28.37%、12.08%、27.34% 和 14.62% ;TM 较 TN 处理,≥5 mm 粒径团聚体 EOC 含量显著降低 10.64% ,TM 处理增加了 1 ~ <2、0.5 ~ <1、0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体 EOC 含量,但较 TN 差异不显著 ( *P* < 0.05 )。整体看 TM 处理对 0 ~ 10 cm 土层团聚体易氧化态有机碳有促进作用。

3 讨论与结论

3.1 秸秆带状覆盖对土壤团聚体分布的影响  
土壤团聚体是整个土壤的一个关键组成部分,团聚体含量和分布影响土壤保持碳和养分的能力。本研究中各粒径团聚体含量并没有随粒径减小而递减,与何淑勤等的研究结果<sup>[18]</sup>不同,而与张少宏等的研究结果<sup>[19]</sup>一致,可能是因为研究区域不同,筛分粒级存在差异或试验年限不同。秸秆带状覆盖、白膜双垄沟覆盖和黑膜双垄沟覆盖都对机械稳定性团聚体的形成有积极作用,可能是由于秸秆覆

表 5 不同覆盖措施各粒级土壤团聚体易氧化态有机碳(EOC)含量

土壤剖面深度 (cm)	处理	不同粒级团聚体易氧化态有机碳含量(g/kg)				
		≥5 mm	2 ~ <5 mm	1 ~ <2 mm	0.5 ~ <1 mm	0.25 ~ <0.5 mm
0 ~ 5	TN	2.35bc	2.24c	2.39c	2.79b	3.03ab
	TW	2.21c	2.68a	2.84ab	2.02d	2.51b
	TB	2.56ab	2.56b	3.00a	2.54c	3.59a
	TG	2.68a	2.76a	2.68b	3.12a	2.81b
	TC	2.48ab	2.73a	2.85ab	2.99a	3.57a
	TM	2.60ab	2.74a	2.75b	3.07a	3.13ab
5 ~ 10	TN	2.57c	2.28b	2.71a	2.63a	3.11a
	TW	2.28d	2.23b	2.17a	2.06b	2.99ab
	TB	2.46c	2.39b	2.37a	2.61a	2.85bc
	TG	3.58a	3.48a	2.89a	2.67a	3.10a
	TC	2.29d	2.49b	2.60a	2.67a	2.83c
	TM	3.04b	3.07a	2.77a	2.67a	2.99ab
10 ~ 20	TN	2.39a	2.1ab	1.77c	1.62c	2.24ab
	TW	1.95b	1.83ab	2.22a	2.16ab	2.49ab
	TB	2.51a	2.19ab	2.24a	2.26a	2.72a
	TG	2.48a	2.33a	2.24a	2.17ab	1.99b
	TC	1.18c	1.52b	1.61c	2.03b	2.16b
	TM	1.94b	1.99ab	1.98b	2.11ab	2.06b
20 ~ 30	TN	1.41bc	1.49b	1.39bc	1.66a	1.71c
	TW	1.50b	1.28c	1.27c	1.43b	1.47d
	TB	1.81a	1.67a	1.77a	1.76a	1.96ab
	TG	1.34cd	1.40bc	1.56b	1.72a	1.67c
	TC	1.16e	1.34c	1.45bc	1.72a	2.06a
	TM	1.26de	1.37bc	1.51b	1.72a	1.83bc

盖和地膜覆盖可以减小雨滴对土壤的直接冲击力,因而可以减少团聚体的破碎<sup>[20]</sup>,谢军红等研究也发现,覆盖可增加降水入参与保蓄,促进团聚体形成与稳定<sup>[21]</sup>。0 ~ 30 cm 土层秸秆带状覆盖促进土壤机械稳定性大团聚体的形成,可能是因为秸秆覆盖后有机碳的输入可以改善土壤大团聚体的聚集,同时也增加土壤有机碳储量和团聚体的不稳定性<sup>[22-23]</sup>。本研究中经过湿筛后 ≥0.25 mm 粒径的团聚体崩解为 <0.25 mm 粒径的团聚体,这与付鑫等的研究结果<sup>[22]</sup>一致。在本研究中白膜双垄沟覆盖对团聚体稳定性的改善效果较好,这可能是因为白膜双垄沟覆盖的增温保墒作用,促进了玉米根系生长。

### 3.2 秸秆带状覆盖下团聚体有机碳和团聚体易氧化态有机碳的变化

土壤退化和可持续农业的担忧往往与土壤有机碳的流失有关,有机碳含量的变化经常被用作评价栽培实践可持续性<sup>[24]</sup>。本研究中,随土壤剖面深度增加土壤总有机碳含量降低,这与之前研究者的

研究结果<sup>[1]</sup>一致,在 0 ~ 10 cm 土层秸秆带状覆盖处理团聚体有机碳和团聚体易氧化态有机碳含量较高,这是因为覆盖秸秆增加了碳输入,以及植物残根大部分也在土壤表层,所以在表层土壤所积累的有机碳和易氧化有机碳含量较高<sup>[25-26]</sup>。白膜双垄沟覆盖和黑膜双垄沟覆盖处理降低了表层各粒径土壤团聚体有机碳和易氧化态有机碳含量,是因为覆膜后阻断了残枝落叶凋零后还田,较无覆盖减小了有机碳输入,覆膜后有增温效果,促进了土壤微生物活性,促进了总有机碳和易氧化态有机碳矿化。各覆盖处理均增加了 10 ~ 20 cm 土层团聚体有机碳含量,可能是因为该区属于半干旱雨养区,水分是限制作物生长的主要因子,覆盖后提高了水分利用率,促进了玉米根系生长,有机碳输入增加。本研究中 0.25 ~ <0.5 mm 粒径团聚体有机碳含量高于大团聚体中有机碳含量,这是因为粒径小的团聚体有更大的比表面积对碳有更强的吸附力,有利于长期固定有机碳<sup>[27]</sup>,相较于大团聚体具有更长的周转时间和更高的稳定性<sup>[28]</sup>。整体看 ≥5 mm 粒径

机械稳定性团聚体含量较高,但团聚体有机碳和团聚体易氧化态有机碳含量较少,原因可能是大团聚体有良好的透气性,碳循环周转速度较快,不利于有机碳的积累。

综上所述,各处理机械稳定性团聚体主要分布在 $\geq 0.25$  mm 粒径,水稳性团聚体主要分布在 $< 0.25$  mm 粒径;秸秆带状覆盖提高了 0~30 cm 土层 0.25~ $< 5$  mm 和 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量,白膜双垄沟覆盖和黑膜双垄沟覆盖提高了 0~10 cm 土层 0.25~ $< 5$  mm 粒径机械稳定性团聚体含量。种植带促进 $\geq 0.25$  mm 粒径机械稳定性团聚体,覆盖带有利于 $< 0.074$  mm 粒径机械稳定性团聚体。秸秆带状覆盖促进了 5~20 cm 土层 $\geq 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体的形成,白膜双垄沟覆盖促进了 5~30 cm 土层 $\geq 0.25$  mm 粒径水稳性团聚体的形成,黑膜双垄沟覆盖下水稳性团聚体变化差异较大;白膜双垄沟覆盖提高了 5~30 cm 土层团聚体稳定性。秸秆带状覆盖提高了 0~30 cm 土层 $\geq 5$  mm 和 0.25~ $< 0.5$  mm 粒径团聚体有机碳含量和 0~5 cm 土层各粒径团聚体易氧化态有机碳含量;白膜双垄沟覆盖降低了 5~10 cm 和 20~30 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量和 5~10 cm 土层各粒径易氧化态有机碳含量;黑膜双垄沟覆盖降低了 0~5 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量,增加了 20~30 cm 土层团聚体有机碳含量和 10~30 cm 土层团聚体易氧化态有机碳含量。

#### 参考文献:

- [1] Reynolds J F, Stafford Smith D M, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development [J]. Science, 2007, 316(5826): 847–851.
- [2] Wu Y, Huang F Y, Jia Z K, et al. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea mays* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of northwest China [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 113–121.
- [3] 高甜甜, 柴守玺, 李亚伟, 等. 秸秆带状覆盖对西北旱地小麦籽粒灌浆速率和产量的影响 [J]. 核农学报, 2022, 36(1): 183–189.
- [4] 李辉, 柴守玺, 常磊, 等. 秸秆带状覆盖下培土对马铃薯产量与水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 107–115.
- [5] Wang L, Li X G, Lv J T, et al. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 46–53.
- [6] Kumar A, Naresh R K, Singh S, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions and indices in conventional and conservation agriculture under vertisol soils of sub-tropical ecosystems: a review [J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2019, 8(10): 2236–2253.
- [7] Melero S, López-Garrido R, Murillo J M, et al. Conservation tillage: short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 292–298.
- [8] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [9] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 581–589.
- [10] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 412–418.
- [11] Zhou L M, Jin S L, Liu C G, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem [J]. Field Crops Research, 2012, 126: 181–188.
- [12] Sainju U M, Schomberg H H, Singh B P, et al. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 205–218.
- [13] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响 [J]. 土壤, 2014, 46(1): 35–40.
- [14] 巩文峰, 李玲玲, 张晓萍, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地表层土壤理化性质变化的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 280–285.
- [15] 罗兴录, 黄秋凤, 郑华娟. 不同地膜覆盖方式对土壤理化性状和木薯产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 372–375.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703–707.
- [18] 何淑勤, 郑子成. 不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 7–10.
- [19] 张少宏, 付鑫, IHSAN Muhammad, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 236–241, 248.
- [20] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1362–1368.
- [21] 谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 一膜两年覆盖条件下耕作方法对旱作玉米产量及土壤物理性状的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 184–189, 195.
- [22] 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.



石温慧,温晓兰,李生辉,等.绿肥还田对土壤团聚性、可蚀性及有机质的影响[J].江苏农业科学,2023,51(12):195-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.027

# 绿肥还田对土壤团聚性、可蚀性及有机质的影响

石温慧,温晓兰,李生辉,程福厚,赵曙良,王清涛,刘小粉

(河北工程大学园林与生态工程学院,河北邯郸 056038)

**摘要:**通过对比分析苕子、二月兰还田和空白对照 3 个处理水平下大田土壤的团聚体和有机质分布特征,探讨绿肥还田对土壤结构,特别是团聚体稳定性的影响。以华北地区玉米田为例,于 2021 年 5 月和 9 月分别采集苕子、二月兰还田和对照的大田土壤,测定各粒级土壤团聚体质量及有机质含量,计算其相应的土壤平均重量直径(MWD)、土壤几何平均直径(GMD)、分形维数( $D$ )和可蚀性因子( $K$ )。结果表明,苕子还田处理显著增加了 0.25~2.00 mm 粒级的大团聚体含量( $P<0.05$ ),而二月兰还田处理则显著增加了  $>2.00$  mm 的大团聚体含量。从指标的角度而言,5 月时二月兰处理的土壤稳定性与抗蚀性均显著高于对照(二月兰处理的  $D$  和  $K$  显著低于对照),而 9 月苕子处理的土壤反超前者,具有更好的稳定性和抗蚀性。进一步分析发现,土壤团聚体分布及其有机质含量具有相关性,且最强的相关性表现在  $>2.00$  mm 粒级的团聚体中。随着时间的推移,经绿肥还田处理后的土壤大团聚体和微团聚体间发生转化,且还田处理 0.25~2.00 mm 团聚体含量增加主要由 0.05~ $<0.25$  mm 团聚体含量减少引起。因此,绿肥还田能提高土壤团聚体稳定性和抗蚀性,对土壤结构的改善具有良好效果。

**关键词:**土壤团聚体;团聚体有机质;绿肥;苕子;二月兰

**中图分类号:**S142;S152.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0195-07

土壤团聚体是组成土壤结构的基础单元<sup>[1-2]</sup>,其粒级大小、质量分布和排列方式对土壤孔隙、密度等物理性质起着决定作用,进而影响土壤保水保肥能力及抗侵蚀性<sup>[3-5]</sup>。土壤团聚体分布情况与其分组方法密切相关,最常用的为湿筛法,以 0.25 mm

为界将水稳性团聚体分为大团聚体和微团聚体<sup>[6]</sup>。土壤团聚体形成与稳定性与有机质胶结作用密切相关,随着粒径减小,团聚体所含有机质活性下降,因而大团聚体中有机质是决定土壤肥力的重要因素<sup>[7-11]</sup>。因此,研究土壤团聚体与有机质分布特征及其影响因素,对于了解土壤结构和稳定性及土壤肥力具有重要意义。

化肥具有提高农作物产量的能力,但在农耕实践中,长期大量施用化肥会导致土壤酸化和板结,导致土壤肥力下降;化肥中所含的重金属等有害物质会对土壤造成污染<sup>[12]</sup>。绿肥作为清洁肥源,翻压还田后不仅能部分替代化肥的功效,保证产量,还能稳定土壤结构,提高土壤总有机碳含量,促进微

收稿日期:2022-10-10

基金项目:河北省重点研发计划(编号:22327501D);河北省青年拔尖人才支持计划(第三批);河北省梨产业创新团队土壤耕作与肥水调控岗(编号:HBCT2021210203)。

作者简介:石温慧(1997—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事农艺与种业方面的研究。E-mail:461721955@qq.com。

通信作者:刘小粉,博士,教授,主要从事绿肥资源利用方面的研究工作。E-mail:liuxiaofen@hebeu.edu.cn。

[23] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation [J]. Global Change Biology, 2014, 20 (2): 653-665.

[24] Veres Z, Kotroczó Z, Fekete I, et al. Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 92: 18-23.

[25] 吴海梅,周彦莉,郑浩飞,等.秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(1): 61-69.

[26] 李蓉蓉,王 俊,毛海兰,等.秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机

碳及其组分的影响[J].水土保持学报,2017,31(3): 187-192.

[27] Wei H Y, Li H L, Cheng J Q, et al. Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(5): 730-740.

[28] Qiao Y F, Miao S J, Li N, et al. Crop species affect soil organic carbon turnover in soil profile and among aggregate sizes in a Mollisol as estimated from natural  $^{13}\text{C}$  abundance [J]. Plant and Soil, 2015, 392(1): 163-174.