

秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响

张明伟, 杨恒山, 邵继承, 范秀艳, 葛选良, 张雨珊, 徐晓

引用本文:

张明伟, 杨恒山, 邵继承, 范秀艳, 葛选良, 张雨珊, 徐晓. 秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 999–O13–1.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1281>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1774–1782 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 马章怀, 杨凯齐

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 137–143 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0567>

黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

王杨扬, 赵中秋, 原野, 陈路明, 郭安宁

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 966–973 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1481>

不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征

乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 李孝梅, 李永梅

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1519–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1446>

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

李增强, 李丹丹, 赵炳梓, 张佳宝

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1557–1565 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1658>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张明伟, 杨恒山, 邵继承, 等. 秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 999–1008.

ZHANG M W, YANG H S, TAI J C, et al. Effects of straw return and shallow drip irrigation on topsoil water-stable aggregates and carbon content in maize field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 999–1008.

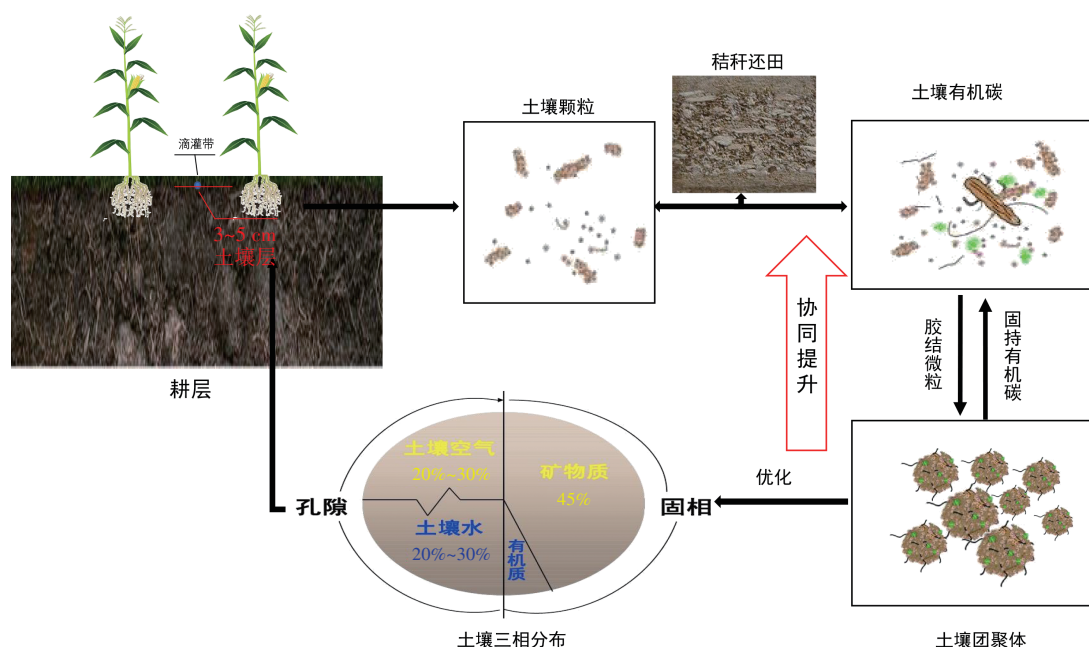


开放科学 OSID

秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响

张明伟, 杨恒山*, 邵继承, 范秀艳, 葛选良, 张雨珊, 徐晓

(内蒙古民族大学农学院/内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心, 内蒙古 通辽 028043)



摘要:为探明秸秆还田与灌溉方式对玉米田耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响,本研究于2019—2020年进行玉米秸秆还田定位试验,采用裂区设计,主处理设秸秆还田(S^+)和秸秆离田(S^-),副处理设传统畦灌(F)和浅埋滴灌(D),分析秸秆还田和不同灌溉方式下耕层土壤水稳性团聚体含量、稳定性及其有机碳固持变化特征。秸秆还田可显著提高耕层土壤0.25~5 mm粒径的水稳性团聚体含量,浅埋滴灌可显著提高0.25~1 mm粒径水稳性团聚体含量,秸秆还田与浅埋滴灌互作对>0.25 mm粒径的水稳性大团聚体含量的提高均有正效应;秸秆还田可显著提高>0.25 mm粒径的团聚体含量($R_{0.25}$),降低不稳定团粒指数(E_{LT}),浅埋滴灌可显著提高团聚体平均质量直径(MWD),秸秆还田与浅埋滴灌互作可显著增加水稳性团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),从而提高团聚体稳定性;秸秆还田与浅埋滴灌互作效应还可显著提高0.5~3 mm粒径的水稳性大团聚体中有机碳含量,提高1~3 mm粒径水稳性大团聚体有机碳富集系数,从而提高土壤有机碳含量;秸秆还田、浅埋滴灌均可优化土壤三相比,且

收稿日期:2021-11-06 录用日期:2021-12-21

作者简介:张明伟(1994—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,从事作物高产栽培与资源高效利用研究。E-mail:1144158082@qq.com

*通信作者:杨恒山 E-mail:yanghengshan2003@aliyun.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32160509,32060435)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(32160509,32060435)

在吐丝期作用更为明显,秸秆还田与浅埋滴灌交互可显著提高土壤气相占比和广义土壤结构指数。秸秆还田与浅埋滴灌对提高耕层土壤水稳性大团聚体含量及其稳定性作用明显,可增加0.5~3 mm粒径水稳性大团聚体有机碳含量,提高其有机碳富集系数,优化土壤三相比。秸秆还田配合浅埋滴灌种植模式可作为改土培肥、提高耕地质量的种植方式。

关键词: 秸秆还田;灌溉方式;水稳性团聚体;土壤有机碳;土壤三相比;玉米

中图分类号: S513;S152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)05-0999-10 **doi:**10.11654/jaes.2021-1281

Effects of straw return and shallow drip irrigation on topsoil water-stable aggregates and carbon content in maize field

ZHANG Mingwei, YANG Hengshan*, TAI Jicheng, FAN Xiuyan, GE Xuanliang, ZHANG Yushan, XU Xiao

(College of Agronomy, Inner Mongolia Minzu University, Engineering Research Center of Forage Crops of Autonomous, Tongliao 028043, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of straw return and irrigation methods on water-stable aggregates and carbon content in topsoil. A split-plot design was carried out from 2019 to 2020, with straw return (S^+) and straw removal (S^-) as the main treatment and conventional border irrigation (F) and shallow drip irrigation (D) as the secondary treatments. The change in the characteristics of topsoil water-stable aggregate stability and organic carbon fixation capacity under straw return and different irrigation methods were analyzed. The results showed that straw return could significantly increase the content of water-stable aggregates with a particle size of 0.25~5 mm in topsoil and shallow-buried drip irrigation could significantly increase the content of water-stable aggregates with a particle size of 0.25~1 mm. The interaction between straw return and shallow-buried drip irrigation had a positive effect on the content of water-stable aggregates with particle sizes greater than 0.25 mm. Straw return could significantly increase the aggregate content ($R_{0.25}$) with particle size greater than 0.25 mm and reduce the unstable aggregate index (E_{IT}). Shallow-buried drip irrigation significantly increased the average mass diameter (MWD) of aggregates. The interaction between straw return and shallow-buried drip irrigation could significantly increase the average MWD and geometric average diameter of water-stable aggregates, thereby improving the stability of aggregates. The interaction of straw return and shallow drip irrigation could also significantly increase the organic carbon content in 0.5~3 mm water-stable macro-aggregates and increase the organic carbon enrichment coefficient in 1~3 mm water-stable macro-aggregates, thereby increasing soil organic carbon content. Both straw return and shallow drip irrigation can optimize the soil three-phase ratio, and the effect is more visible in the silking stage. The interaction of straw return and shallow drip irrigation can significantly improve the soil gas phase ratio and generalized soil structure index. Thus, straw return and shallow-buried drip irrigation have significant effects on improving the content and stability of water-stable macroaggregates in topsoil, which can increase the organic carbon content of water-stable macroaggregates with a particle size of 0.5~3 mm and improve the organic carbon enrichment coefficient so as to improve the soil organic carbon content. By optimizing the three soil comparisons, the shallow-buried drip irrigation planting mode under straw return can be used as a planting mode to improve soil fertility and improve the quality of cultivated land.

Keywords: straw return; irrigation method; water-stable aggregate; soil organic carbon; soil three-phase ratio; maize

西辽河平原是我国为数不多的井灌玉米产区,传统畦灌灌溉方式沿用至今,由于玉米种植区长期大水大肥、重用轻养,农田土壤有机碳活性和周转能力下降显著,土壤结构逐年恶化,耕地地力衰退明显。秸秆还田不仅为农田土壤提供有机物质,增加土壤养分含量,而且可显著改善土壤结构,提高土壤的团聚性、结构性和有机碳活性,改善土壤肥力状况。不同灌溉方式对土壤扰动性以及秸秆腐解速率的影响不同,进而影响土壤养分含量以及物理性状,因此,探明秸秆还田与浅埋滴灌对土壤团聚体质量分布及其有机碳固存特征的影响,对西辽河平原灌区耕地地力提升具有重要意义。土壤有机碳的固存是农田生态系统碳

循环、土壤肥力更新的重要过程之一,其主要来源于作物残体、土壤微生物残体及其衍生物^[1]。秸秆还田可为土壤微生物提供能源物质,增加微生物数量以及活性,提高秸秆中有机质的分解速率,增加土壤中养分含量^[2]。唐鹏飞等^[3]的研究表明,与秸秆不还田相比,秸秆还田5、10、15、20 a土壤有机碳含量提高了42.45%、47.88%、33.40%和63.38%。土壤团聚体是形成良好土壤结构的物质基础,其分散和聚集与土壤有机碳的累积和矿化同时进行^[4-5]。李艳等^[6]的研究表明,秸秆还田可提高黑土中 ≥ 0.25 mm粒径团聚体数量,1~2 mm粒级团聚体有机碳含量比其他粒级平均高出14.50%,在不施肥条件下,秸秆还田后土壤有

机碳含量可提高5.50%;还有研究表明,秸秆还田利于 $>0.25\text{ mm}$ 粒径土壤团聚体数量的增加,从而有效降低大团聚体中所包含的微团聚体碳降解^[7-8]。大团聚体秸秆来源碳含量显著高于微团聚体秸秆来源碳的含量^[9],可从大团聚体中向微团聚体中转移,有机碳在微团聚体中降解较慢,从而维持土壤中较高有机碳含量^[10]。不同灌溉方式对土壤水稳性团聚体以及有机碳含量的影响不同,赵英等^[11]的研究表明,微喷灌灌溉下土壤中粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性大团聚体含量显著高于地面灌溉;朱建彬等^[12]的研究表明,与沟灌相比,滴灌显著提高 $1.001\sim 2.000\text{ mm}$ 团聚体含量,显著降低 $0.251\sim 1.000$ 、 $<0.053\text{ mm}$ 团聚体含量;还有研究表明,滴灌在干湿交替的周期性变化过程中,若“湿”的时间相对较长,一方面土壤呼吸强度会大幅下降,从而降低有机碳的矿化速度,另一方面会削弱干湿交替下黏土矿物收缩和膨胀,降低土壤部分团聚体碎裂概率,有效避免团聚体中不易分解的有机碳因团聚体的碎裂而被微生物分解,从而保持较高的土壤有机碳含量^[13]。

秸秆还田条件下滴灌可促进秸秆腐解,增加土壤有机碳含量^[14],从而使土壤中水稳性团聚体数量、稳定性以及有机碳含量保持较高水平。浅埋滴灌是在膜下滴灌基础上研发的新型滴灌节水技术,以浅埋覆土替代地膜,有效解决了膜下滴灌的残膜对农田环境污染的问题,近年来在内蒙古^[15]、辽宁^[16]等地逐步应用于农业生产。浅埋滴灌由于地表以覆土代替覆膜,土壤水、热变化规律与膜下滴灌等模式有较大差异,秸秆还田与浅埋滴灌灌溉模式相结合必然会对土壤水稳性团聚体数量、稳定性、固碳能力及土壤三相相比产生不同的影响。本研究通过分析玉米田耕层 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层水稳性团聚体质量分布、稳定性及其有机碳固持变化特征,探明秸秆还田、浅埋滴灌及其互作对玉米田耕层土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响,

为西辽河平原灌区耕地地力提升提供理论基础和技术支撑,为土壤养分循环及调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在通辽国家农业科技园区($44^{\circ}13'\text{N}$, $123^{\circ}28'\text{E}$)进行,平均海拔 167 m ,温带大陆性季风气候,年平均气温 $7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 342 mm ,无霜期 149 d ,全年日照 $2\,891.7\text{ h}$ 。

1.2 试验材料

试验地土壤为灰色草甸半水成土,供试地块试验开展前 $0\sim 20\text{ cm}$ 耕层养分含量本底值如下:有机质含量 $15.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $51.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $113.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $27.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;相关研究指标本底值见表1。试验所用基肥为磷酸二铵和硫酸钾(N 、 P_2O_5 、 K_2O 的比例为 $18:46:50$),追肥为尿素($\text{N}=46\%$),还田秸秆为玉米秸秆,灌溉水为抽取的地下水,供试玉米品种为农华101。

1.3 试验设计

试验为 2 a 定位试验,采用裂区设计,以秸秆还田为主处理,设置秸秆还田(S^{+})和秸秆离田(S^{-});副处理为灌溉方式,设置传统畦灌(F)和浅埋滴灌(D),即共有 $\text{S}^{+}+\text{F}$ 、 $\text{S}^{+}+\text{D}$ 、 $\text{S}^{-}+\text{F}$ 、 $\text{S}^{-}+\text{D}$ 4个处理,各处理3次重复,共12个小区,小区面积 720 m^2 ($100\text{ m}\times 7.2\text{ m}$)。秸秆还田方式为秋季玉米收获后秸秆二次粉碎全量深翻还田,秸秆粉碎长度 $<10\text{ cm}$,深翻深度 $25\sim 35\text{ cm}$ 。各处理采用播种-施肥-铺带一体机播种,深度为 $3\sim 5\text{ cm}$,大小垄(小垄行距 40 cm ,大垄行距 80 cm)种植,种植密度为 $7.5\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。浅埋滴灌采用内镶片式滴灌管,滴头相距 20 cm ,滴头流量为 $2.7\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴灌管浅埋于小垄中间距地表 $3\sim 5\text{ cm}$ 处;传统畦灌各处理播种前将铺管装置抬起,只进行常规施肥、播种。各处理均随播种基施磷酸二铵 $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、硫酸钾

表1 试验开展前试验地 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤相关研究指标本底值

Table 1 Background values of soil-related research indicators in $0\sim 20\text{ cm}$ soil layer before experiment

水稳性团聚体粒径 Particle size of water-stable aggregates/mm	各粒径质量分数 Mass fraction of each particle size/%	各粒径有机碳含量 Organic carbon content of each particle size/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤总有机碳含量 Soil total organic carbon content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤三相比 Soil three-phase ratio/%		
				固相 Solid phase	液相 Liquid phase	气相 Gaseous phase
5~3	2.84	7.15	9.15	59.64	21.15	19.21
3~2	4.56	7.92				
2~1	9.35	8.34				
1~0.5	13.85	7.74				
0.5~0.25	7.56	7.62				

90 kg·hm⁻²,深度与播种深度一致,调整出肥口使基肥与种子保持10 cm距离以防烧苗。浅埋滴灌处理分别在拔节期、大喇叭口期、吐丝期按3:6:1比例结合灌溉追施尿素450 kg·hm⁻²,单独配18 L压差式施肥罐和水表,每次施肥前先滴清水约60 min,然后打开施肥阀,施肥完毕后继续滴清水至相应灌水量;传统畦灌处理于拔节期一次性追施尿素450 kg·hm⁻²,人工在距玉米5~10 cm处开沟撒施,于畦头出水口安装水表以控制畦灌灌水量。2019年5月1日播种,10月1日收获,2020年5月2日播种,10月4日收获,灌溉量及灌溉频次、施肥量根据当地玉米常规生产实际确定,灌溉方案见表2。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤水稳性团聚体测定

于试验年份玉米完熟期在每个试验小区按照S形五点取样法取0~20 cm土层农化混合土样,将土壤样品中砾石、侵入体及粗有机体拣除,并在风干后沿自然断裂面掰成10 mm大小的土块,用土壤团粒结构分析仪(TPF-100)湿筛法进行不同粒径团聚体分离,湿筛时称取100 g风干土,置于5 mm土筛上,蒸馏水浸泡10 min,然后将土样依次通过5、3、2、1、0.5、0.25 mm的套筛。通过上下移动筛子3 cm来分离团聚体,重复50次(2 min内),将留在每个筛子上的土壤冲洗到铝盒中,在105℃温度下烘干称质量后留存测定有机碳含量。

1.4.2 有机碳含量测定

采用重铬酸钾法测定土样和不同粒径水稳性团聚体有机碳含量。

1.4.3 土壤三相相比的测定

于试验年份玉米吐丝期和完熟期采用S形五点取样法,用环刀取0~20 cm土层原状土,用DIK-1601土壤三相测量仪分析土壤三相相比。

1.5 相关参数计算

$$\text{团粒平均质量直径 } MWD = \sum_{i=1}^N (X_i \times W_i) \quad (1)$$

$$\text{团粒几何平均直径 } GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^N W_i \times \ln X_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \right) \quad (2)$$

$$\text{不稳定团粒指数 } E_{LT} = (M_i - M_{R0.25}) / M_i \quad (3)$$

式中: X_i 为*i*粒径团聚体的平均直径,mm; W_i 为*X_i*相对应的粒径团聚体占总质量的百分含量,%; $M_{R0.25}$ 为大于0.25 mm粒级团聚体质量,g; M_i 为团聚体总质量,g。

$$\text{团聚体有机碳富集系数} = \frac{\text{粒径团聚体有机碳含量}}{\text{土壤有机碳含量}} \quad (4)$$

$$STPSD = [(X_g - 50)^2 + (X_g - 50)(X_g - 25) + (X_y - 25)^2]^{0.5} \quad (5)$$

$$GSSI = [(X_g - 25)X_y X_q]^{0.4769} \quad (6)$$

式中: $STPSD$ 为土壤三相结构距离; $GSSI$ 为广义土壤结构指数; X_g 为固相体积百分比,%; X_y 为液相体积百分比,%; X_q 为气相体积百分比,%。

1.6 数据统计方法

采用Microsoft Excel 2016进行数据处理并制表,使用SPSS 19.0(ANOVA)进行数据统计分析和多重比较(Duncan法)。

2 结果分析

2.1 秸秆还田与灌溉方式对耕层土壤水稳性团聚体质量分数的影响

由表3可知,在S⁺处理下,2019年土壤0.5~0.25 mm粒径D处理显著高于F处理,2020年5~3、1~0.5 mm粒径D处理显著高于F处理;S⁻处理下,2019年土壤5~3、3~2、1~0.5 mm粒径D处理显著高于F处理,2020年除5~3、3~2 mm粒径,其他粒径D处理均显著高于F处理;F灌溉方式下,2019和2020年各粒径质量分数均表现为S⁺处理显著高于S⁻处理;D灌溉方式下,2019年除5~3、3~2 mm粒径外,其他粒径均表现为S⁺处理显著高于S⁻处理,2020年各粒径均表现为S⁺处理显著高于S⁻处理;同一处理不同年度间,除S⁺+F

表2 不同生育期灌溉频次及灌溉量

Table 2 Irrigation frequency and irrigation quantity at different growth stages

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/(m ³ ·hm ⁻²)/灌溉频次 Irrigation frequency					灌溉频次 Irrigation frequency	灌溉定额 Irrigation quota/(m ³ ·hm ⁻²)
	播种-出苗 Sowing-emergence stage	拔节期 Shooting stage	抽雄-吐丝 Male drawing-silk spinning stage	吐丝-灌浆 Silk spinning-filling stage	灌浆-成熟 Filling-mature stage		
浅埋滴灌(D)	550/1	850/2	350/1	550/2	100/1	7	2 400
传统畦灌(F)	1 000/1	800/1	800/1	800/1	600/1	5	4 000

处理、S⁻+D处理5~3 mm粒径和S⁺+F处理0.5~0.25 mm粒径质量分数2020年低于2019年外,各处理各粒级2020年均高于2019年。秸秆还田对2019年2~0.25 mm粒径团聚体质量分数的影响达极显著水平,对2020年各粒径质量分数的影响均达极显著水平;灌溉方式对2019年除2~1 mm粒径外各粒径的影响均达显著水平,对2020年1~0.5 mm粒径影响达极显著水平,5~3、2~1 mm和0.5~0.25 mm粒径影响达显著水平;秸秆还田与灌溉方式的互作效应对2019年3~1 mm粒径的影响达显著水平,1~0.25 mm粒径影响达极显著水平,对2020年5~3、1~0.5 mm粒径影响达极显著水平,3~1、0.5~0.25 mm粒径的影响达显著水平。

2.2 秸秆还田与灌溉方式对耕层土壤水稳性团聚体稳定性的影响

由表4可知,S⁺处理下,2019年D处理与F处理的MWD、GMD、R_{0.25}和E_{LT}差异均不显著,2020年D处理的MWD和GMD显著高于F处理,D处理的R_{0.25}和E_{LT}与F处理差异不显著;S⁻处理下,2019年除D处理的MWD显著高于F处理外,其他稳定性参数差异均不

显著,2020年除D处理的E_{LT}显著低于F处理外,其他稳定性参数差异均不显著;F灌溉方式下,2019、2020年均均为S⁺处理的MWD和GMD与S⁻处理差异不显著,S⁺处理的R_{0.25}显著高于S⁻处理,S⁺处理的E_{LT}显著低于S⁻处理;D灌溉方式下,2019年除MWD外其他稳定性参数S⁺处理与S⁻处理差异不显著,2020年除E_{LT}外其他稳定性参数S⁺处理均显著高于S⁻处理;同一处理不同年度间,R_{0.25}在2020年均高于2019年,E_{LT}在2020年均低于2019年,S⁺+F处理和S⁻+D处理MWD和GMD在2020年低于2019年,其他处理2020年均高于2019年。秸秆还田对2019年R_{0.25}和E_{LT}影响达显著水平,对2020年MWD和E_{LT}影响显著,对R_{0.25}影响达极显著水平;灌溉方式对2019年MWD、2020年MWD和E_{LT}影响达显著水平;秸秆还田与灌溉方式互作对2019年MWD影响达显著水平,对2020年MWD和GMD的影响达极显著水平。

2.3 秸秆还田与灌溉方式对耕层土壤有机碳及水稳性团聚体有机碳固持特征的影响

由表5可知,在S⁺处理下,3~2、2~1、1~0.5 mm粒径团聚体有机碳含量D处理均显著高于F处理;S⁻处理下,2019年3~2、2~1 mm粒径D处理显著高于F处理,其他粒径差异不显著,2020年除2~1 mm粒径D处理显著高于F处理外,其他粒径D处理与F处理差异不显著;F灌溉方式下,2019、2020年3~2、2~1、1~0.5 mm粒径S⁺处理均显著高于S⁻处理;D灌溉方式下各粒径均表现为S⁺处理显著高于S⁻处理;同一处理不同年度间,除S⁻+D处理3~2 mm粒径团聚体有机碳含量2020年低于2019年外,同一处理各粒径团聚体有机碳含量2020年均高于2019年。秸秆还田对2019年5~3、0.5~0.25 mm粒径团聚体有机碳含量影响达显著水平,对2019年其他粒径及2020年各粒径的影响均达极显著水平;灌溉方式对2019年5~3、1~0.5 mm粒径的影响达显著水平,对3~1 mm粒径的影响达极显著水平;对2020年3~1 mm粒径的影响达极显著水平,对1~0.25 mm粒径的影响达显著水平;秸秆还田与灌溉方式互作对2019年5~0.5 mm粒径的影响均达极显著水平,对2020年3~0.25 mm粒径团聚体有机碳含量的影响均达极显著水平。

由表6可知,在S⁺处理下,土壤有机碳含量2019年D处理显著高于F处理,团聚体有机碳富集系数2019年5~3 mm粒径D处理显著高于F处理;S⁻处理下,土壤有机碳含量D处理与F处理差异不显著,团聚体有机碳富集系数2019、2020年2~1 mm粒径D处

表3 秸秆还田与灌溉方式对土壤水稳性团聚体质量分数的影响(%)

Table 3 Effects of straw returning and irrigation methods on mass fraction of soil water stable aggregates (%)

年份 Year	秸秆还田 Straw returned	灌溉方式 Irrigation	质量分数 Mass fraction				
			5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
2019	S ⁺	F	4.24a	5.14a	10.54a	14.15a	8.25b
		D	3.58a	5.56a	10.79a	14.09a	9.98a
	S ⁻	F	1.99b	3.83b	9.66b	13.36c	7.36c
		D	4.44a	4.92a	9.46b	13.90b	7.69c
	秸秆还田(S)		ns	*	**	**	**
	灌溉方式(I)		*	*	ns	*	*
	I×S		ns	*	*	**	**
2020	S ⁺	F	3.00b	5.85ab	13.84a	14.71b	9.56ab
		D	4.11a	6.14a	14.26a	15.28a	10.16a
	S ⁻	F	2.77c	4.48c	11.57c	13.76c	7.29c
		D	2.87bc	5.18bc	12.48b	14.65b	8.53b
	秸秆还田(S)		**	**	**	**	**
	灌溉方式(I)		*	ns	*	**	*
	I×S		**	*	*	**	*

注:表中不同小写字母表示不同处理间在0.05水平上显著差异,ns表示无显著性差异,*表示0.05水平显著,**表示0.01水平显著。下同。

Note: The lowercase letters in the table indicate significant differences among different treatments at 0.05 level, ns indicates no significant differences, * indicates significant differences at 0.05 level, ** indicates significant differences at 0.01 level. The same below.

表4 秸秆还田与灌溉方式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

Table 4 Effects of straw returning and irrigation methods on the stability of soil water stable aggregates

年份 Year	秸秆还田 Straw returned	灌溉方式 Irrigation	平均质量直径(MWD) Mean weight diameter/mm	几何平均直径(GMD) Geometric mean diameter/mm	>0.25 mm 粒径团聚体含量($R_{0.25}$) Content of aggregates>0.25 mm/%	不稳定团粒指数(E_{1T}) Unstable pellet index
2019	S ⁺	F	1.40ab	1.07a	42.32a	2.08b
		D	1.33b	1.01a	44.01a	2.06b
	S ⁻	F	1.24b	0.98a	36.20b	2.14a
		D	1.42a	1.08a	40.41ab	2.10ab
	秸秆还田(S)		ns	ns	*	*
	灌溉方式(I)		*	ns	ns	ns
	I×S		*	ns	ns	ns
2020	S ⁺	F	1.32b	1.03b	46.96ab	2.03bc
		D	1.37a	1.06a	49.96a	2.00c
	S ⁻	F	1.32b	1.04b	39.88c	2.10a
		D	1.31b	1.03b	43.70bc	2.06b
	秸秆还田(S)		*	ns	**	*
	灌溉方式(I)		*	ns	ns	*
	I×S		**	**	ns	ns

表5 秸秆还田与灌溉方式对水稳性团聚体有机碳含量的影响($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Effects of straw returning and irrigation methods on organic carbon content of water stable aggregates($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

年份 Year	秸秆还田 Straw returned	灌溉方式 Irrigation	有机碳含量 Organic carbon content				
			5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
2019	S ⁺	F	7.24b	7.94b	8.45b	7.62b	7.42ab
		D	7.56a	8.17a	8.79a	7.87a	7.52a
	S ⁻	F	7.12b	7.65c	8.14c	7.43c	7.03b
		D	7.25b	8.04b	8.43b	7.57bc	7.15b
	秸秆还田(S)		*	**	**	**	*
	灌溉方式(I)		*	**	**	*	ns
	I×S		**	**	**	**	*
2020	S ⁺	F	7.92a	8.75b	9.09b	8.26b	8.11b
		D	8.38a	9.05a	9.73a	8.94a	8.78a
	S ⁻	F	7.13b	7.87c	8.25d	7.73c	7.53c
		D	7.34b	8.02c	8.66c	7.96c	7.72bc
	秸秆还田(S)		**	**	**	**	**
	灌溉方式(I)		ns	**	**	*	*
	I×S		*	**	**	**	**

理显著高于F处理;F灌溉方式下,土壤有机碳含量2019年S⁺处理显著高于S⁻处理,各粒径团聚体有机碳富集系数2019年S⁺处理与S⁻处理差异不显著,2020年除0.5~0.25 mm粒径外其他粒径S⁺处理均显著高于S⁻处理;D灌溉方式下,土壤有机碳含量S⁺处理显著高于S⁻处理,各粒径团聚体有机碳富集系数2019年S⁺

处理与S⁻处理差异不显著,2020年S⁺处理均显著高于S⁻处理;同一处理不同年度间,土壤有机碳含量2020年高于2019年,团聚体有机碳富集系数除S⁻+F处理5~3 mm粒径2020年低于2019年,S⁻+F处理2~1 mm粒径和S⁺+D处理5~3 mm粒径2020年与2019年相同外,各处理各粒径团聚体有机碳富集系数2020年均高于2019年。秸秆还田对2019年土壤有机碳含量的影响达极显著水平,对2020年土壤有机碳含量影响达显著水平,对2019年各粒径团聚体有机碳富集系数的影响均不显著,对2020年5~0.5 mm粒径影响达极显著水平,对0.5~0.25 mm粒径影响达显著水平;灌溉方式对2019年5~3、2~1 mm粒径团聚体有机碳富集系数的影响达显著水平,对2020年2~1 mm粒径影响达显著水平;秸秆还田与灌溉方式互作对土壤有机碳含量的影响2019年达极显著水平,2020年达显著水平,对2019年2~1 mm粒径团聚体有机碳富集系数影响达显著水平,对2020年5~0.5 mm粒径团聚体有机碳富集系数的影响达显著水平。

2.4 秸秆还田与灌溉方式对玉米田耕层土壤三相比的影响

农田的理想土壤三相比为固相占50%、液相占25%、气相占25%,此时土壤环境更利于作物生长。由表7可知,同一处理吐丝期较完熟期土壤三相比更趋于理想状态;同一秸秆还田条件下,吐丝期、完熟期D处理较F处理土壤三相比更趋于理想状态;同一灌

表6 土壤有机碳及不同粒径团聚体有机碳富集系数

Table 6 Enrichment coefficients of soil organic carbon and organic carbon of aggregates with different particle sizes

年份 Year	秸秆还田 Straw returned	灌溉方式 Irrigation	有机碳含量 Organic carbon content/(g·kg ⁻¹)	有机碳富集系数 Organic carbon enrichment coefficient				
				5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
2019	S ⁺	F	9.32b	0.78b	0.85ab	0.91ab	0.82ab	0.79a
		D	9.45a	0.80a	0.86a	0.93a	0.83a	0.80a
	S ⁻	F	9.14c	0.78ab	0.83b	0.89b	0.81b	0.78a
		D	9.18c	0.79ab	0.85ab	0.92a	0.82ab	0.78a
	秸秆还田(S)		**	ns	ns	ns	ns	ns
	灌溉方式(I)		ns	*	ns	*	ns	ns
	I×S		**	ns	ns	*	ns	ns
2020	S ⁺	F	9.55ab	0.83ab	0.92a	0.96ab	0.90ab	0.85ab
		D	9.82a	0.85a	0.92a	0.99a	0.92a	0.89a
	S ⁻	F	9.23bc	0.77c	0.85b	0.89c	0.83c	0.82b
		D	9.31b	0.79bc	0.86b	0.93b	0.85bc	0.83b
	秸秆还田(S)		*	**	**	**	**	*
	灌溉方式(I)		ns	ns	ns	*	ns	ns
	I×S		*	*	*	*	*	ns

溉方式下,吐丝期、完熟期S⁺处理较S⁻处理土壤三相相比更趋于理想状态。土壤三相结构越接近理想状态,其STPSD值越接近0,GSSI越接近100,S⁺处理下,除2020年吐丝期D处理的STPSD显著低于F处理外,2019、2020年各时期D处理的STPSD和GSSI与F处理差异均未达显著水平;S⁻处理下,STPSD除2019年完熟期D处理与F处理差异不显著外,2019、2020年各时期D处理显著低于F处理,2019、2020年各时期D处理的GSSI均显著高于F处理;同一灌溉方式下,2019、2020年各时期S⁺处理的STPSD均显著低于S⁻处理,S⁺处理的GSSI均显著高于S⁻处理。同一处理不同年度间,土壤三相及结构2020年均优于2019年。秸秆还田对土壤三相影响显著,对2020年各时期STPSD和GSSI的影响达极显著水平;灌溉方式对土壤三相影响显著,对2019、2020年各时期GSSI影响均达显著水平;秸秆还田与灌溉方式互作对土壤三相影响显著,对2019、2020年吐丝期STPSD的影响达极显著水平,对2020年完熟期STPSD的影响达显著水平,对2019、2020年各时期GSSI影响均达显著水平。

3 讨论

3.1 秸秆还田与灌溉方式对土壤不同粒径水稳性团聚体含量的影响

土壤团聚体协调土壤水、肥、气、热效果显著,其大小、数量对土壤通气状况、土壤肥力、固碳能力和抗蚀能力具有重要影响^[17]。本研究结果表明,与试验开

展前相比,秸秆还田、浅埋滴灌处理各粒径团聚体含量均有所提高,秸秆还田可显著提高>0.25 mm大团聚体总量,浅埋滴灌下粒径>0.25 mm的各粒径大团聚体含量较传统畦灌均有所提高,对2~1 mm粒径团聚体影响达显著水平,秸秆还田配合浅埋滴灌种植模式对3~0.5 mm粒径团聚体含量提升效果显著。秸秆腐解可释放土壤微生物所需营养物质,促进微生物数量以及活力的提高,土壤微生物利用菌丝物理缠绕以及所产生的分泌物作为胶结物质将土壤中细小微团粒胶结从而形成大团聚体^[18],同时秸秆在微生物的作用下被分解转化,可形成不同组成和性质的有机质组分,也可作为胶结物质将现存微团聚体胶结成大团聚体^[19]。浅埋滴灌的滴渗式补水较为舒缓,可有效减弱水分对土壤的冲击,降低水分对已有大团聚体的破坏度,且浅埋滴灌灌水少量多次,土壤保持湿润时间较长,削弱了干湿交替下团聚体的收缩和膨胀,降低了土壤部分团聚体碎裂概率^[20]。秸秆还田配合浅埋滴灌种植模式在促进大团聚体形成的同时可保证其稳定性,对土壤水稳性大团聚体含量的增加具有重要意义。

3.2 水稳性团聚体变化对土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳是衡量土壤肥力、改善土壤结构的重要指标,对于促进土壤养分循环、增加养分有效性有重要作用。研究表明,表层土壤总有机碳含量的增加主要因为大团聚体对有机碳的固持作用,有机碳是团聚体形成的重要胶结剂,能够提高土粒的团聚性并促进形成团粒结构^[21]。罗晓虹等^[22]的研究指出,土壤团

表7 秸秆还田与灌溉方式对土壤三相比的影响

Table 7 Effects of straw returning and irrigation methods on soil three-phase flow

年份 Year	时期 Period	秸秆还田 Straw returned	灌溉方式 Irrigation	固相 Solid phase/%	液相 Liquid phase/%	气相 Gas phase/%	土壤三相结构距离 STPSD	广义土壤结构指数 GSSI
2019	吐丝期	S ⁺	F	54.21b	25.72b	20.07ab	11.88b	98.32a
			D	52.83b	26.42a	20.75a	9.42b	98.88a
		S ⁻	F	57.12a	25.43b	17.45c	16.72a	95.72b
			D	54.02b	26.15a	19.83b	11.58b	98.23a
		秸秆还田(S)		*	ns	**	*	*
		灌溉方式(I)		*	**	*	*	*
		I×S		*	*	*	**	*
	完熟期	S ⁺	F	55.47b	22.76b	21.77a	14.20a	98.38a
			D	54.72b	22.95b	22.33a	12.91a	98.80a
		S ⁻	F	59.25a	24.05a	16.70c	20.07a	94.12b
			D	56.98ab	23.17b	19.84b	16.59a	97.16a
		秸秆还田(S)		*	ns	**	ns	*
		灌溉方式(I)		ns	*	*	ns	*
		I×S		ns	ns	**	ns	*
2020	吐丝期	S ⁺	F	52.83b	25.87b	21.30a	9.36b	99.12a
			D	51.75c	26.44a	21.81a	7.21c	99.40a
		S ⁻	F	55.47a	24.89c	19.64c	14.02a	97.75c
			D	53.21b	25.76b	21.03b	10.07b	98.96b
		秸秆还田(S)		**	**	**	**	**
		灌溉方式(I)		**	**	*	**	*
		I×S		**	**	*	**	*
	完熟期	S ⁺	F	54.72c	23.17b	22.11b	12.88c	98.78a
			D	53.96c	23.04b	23.00a	11.59c	99.15a
		S ⁻	F	58.87a	24.40a	16.73d	19.48a	94.35c
			D	56.60b	23.48b	19.92c	15.96b	97.39b
		秸秆还田(S)		**	ns	**	**	**
		灌溉方式(I)		ns	*	**	*	*
		I×S		ns	ns	**	*	*

聚体有机碳与团聚体稳定性呈极显著的正相关关系,有机碳的循环转化与团聚体稳定性密不可分。李娟等^[23]的研究表明,>0.5 mm 粒径团聚体中的有机碳对土壤有机碳总量的贡献率最高,且 1~5 mm 粒径团聚体更利于土壤有机碳的积累;SIX 等^[24]的研究指出,土壤中有有机碳含量与>0.25 mm 水稳定性团聚体含量呈正相关关系,与大团聚体有机碳含量高度相关。本研究中,与试验开展前相比,秸秆还田、浅埋滴灌处理土壤总有机碳含量以及 5~3 mm 粒径有机碳含量均有所提高,秸秆还田与浅埋滴灌互作效应对 3~0.5 mm 粒径有机碳含量的提升及有机碳富集系数的影响达显著水平,大团聚体中有有机碳对土壤总有机碳含量的提高起主导作用。秸秆还田配合浅埋滴灌种植模式可显著提高水稳性大团聚体含量及稳定性,大团聚体是

有机碳的储存场所,可抵抗水分对有机碳的侵蚀,稳定的团聚体可有效防止因团聚体破碎而造成的有机碳流失,对有机碳具有保护作用,进而保持土壤中较高的有机碳含量。

3.3 水稳性团聚体变化对土壤三相比的影响

土壤三相比是评价土壤对作物适宜性的重要参数^[25],会影响土壤容重、孔隙度、含水量的高低,旱作农业理想的固、液、气比例为 50:25:25,三相之间互相联系、互相转化又互相制约。土壤质量变差的主要原因是土壤团聚体结构较差,从而导致固、液、气三相比比例失调,自然活力和自我调节能力下降^[26]。董建新等^[27]分析了秸秆还田下团聚体对土壤容重、孔隙度、含水量的影响,发现土壤容重多与水稳性大团聚体含量呈负相关,与微团聚体含量呈正相关,而土壤含水

量则与之相反。本研究发现,与试验开展前相比,秸秆还田、浅埋滴灌处理各时期土壤固相比比例下降,气相比比例上升,二者互作可显著提高各时期土壤气相占比及广义土壤结构指数,使土壤三相比更加合理。秸秆还田与浅埋滴灌互作效应提高了水稳性大团聚体的含量及稳定性,可有效增大孔隙度、降低土壤容重、提高土壤透气性、提高土壤抗外界干扰的能力,从而保持土壤结构稳定。秸秆还田配合浅埋滴灌种植模式能够提高土壤水稳性大团聚体含量及稳定性,对优化土壤三相比、改善土壤环境具有重要作用。

4 结论

(1) 秸秆还田可显著提高耕层土壤5~0.25 mm粒径的水稳性团聚体含量,浅埋滴灌可显著提高1~0.25 mm粒径水稳性团聚体含量,二者互作能提高大于0.25 mm粒径的水稳性大团聚体含量及稳定性。

(2) 秸秆还田可显著提高各粒径团聚体有机碳含量、有机碳富集系数和土壤总有机碳含量,浅埋滴灌对团聚体有机碳富集系数及土壤总有机碳含量影响不显著,秸秆还田与浅埋滴灌互作可显著提高3~0.5 mm粒径团聚体中有机碳含量及有机碳富集系数,从而提高土壤总有机碳含量。

(3) 秸秆还田与浅埋滴灌互作可提高水稳性大团聚体含量及稳定性,优化土壤三相比,增加土壤总有机碳含量,促进土壤结构稳定。秸秆还田配合浅埋滴灌田间管理模式,可作为改善农田土壤性质、提高耕地质量的种植方式。

参考文献:

- [1] DHALIWAL S S, KUMAR Y, SINGH S P, et al. Effect of conservation tillage and residue management on soil organic carbon storage, ecosystem dynamics and soil microbial biomass in sub-tropical agro-ecosystem: A review[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(9):2920-2935.
- [2] 赵雪淞, 宋王芳, 高欣, 等. 秸秆还田和耕作方式对花生土壤微生物量、酶活性和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3):126-132. ZHAO X S, SONG W F, GAO X, et al. Effects of straw returning and tillage methods on soil microbial biomass, enzyme activity and yield of peanut[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3):126-132.
- [3] 唐鹏飞, 韩兵兵, 王佳敏, 等. 棉秆还田不同年限对土壤有机碳及其矿化特征的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(12):127-133. TANG P F, HAN B B, WANG J M, et al. Effects of cotton straw returning on the soil organic carbon and organic carbon mineralization dynamics[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(12):127-133.
- [4] NDZELU B S, DOU S, ZHANG X. Corn straw return can increase labile soil organic carbon fractions and improve water-stable aggregates in Haplic Cambisol[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(6):1018-1030.
- [5] YAKOVENKO V, OLES H, DNIPRO. Technique for preparation thin sections of structural soil aggregates of certain size fractions[J]. *Fundamental and Applied Soil Science*, 2020, 19(2):55-58.
- [6] 李艳, 李玉梅, 刘峥宇, 等. 秸秆还田对连作玉米黑土团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(2):129-138. LI Y, LI Y M, LIU Z Y, et al. Effects of straw incorporation on aggregate stability and organic carbon content of black soil in continuous cropping maize[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(2):129-138.
- [7] DUVAL M E, GALANTINI J A, IGLESIAS J O, et al. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 131(4):11-19.
- [8] DENEK K, ZOTARELLI L, BODDEY R M, et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management induced changes in soil organic carbon in two Oxisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5):1165-1172.
- [9] LI S, GU X, ZHUANG J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155(6):199-206.
- [10] BUYANOVSKY G A, ASLAM M, WAGNER, et al. Carbon turnover in soil physical fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4):1167-1173.
- [11] 赵英, 郭旭新, 樊会芳, 等. 不同灌溉方式对猕猴桃园土壤团聚体结构和养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3):320-325. ZHAO Y, GUO X X, FAN H F, et al. Effects of different irrigation methods on soil aggregate structure and nutrients in kiwifruit orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3):320-325.
- [12] 朱建彬, 郭相平, 谢毅, 等. 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(3):632-638. ZHU J B, GUO X P, XIE Y, et al. Effects of returning straw interlayer to the field, water and nitrogen management on aggregates and carbon sequestration of facility soil[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(3):632-638.
- [13] 张玉龙, 唐首峰, 任秉枢, 等. 不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3):125-128, 134. ZHANG Y L, TANG S F, REN B S, et al. Effect on soil water-stable aggregates of different irrigation methods in protected field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3):125-128, 134.
- [14] 冀保毅, 程琴, 卫云飞, 等. 不同灌溉方式对农田土壤性状和花生落果率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6):8-12. JI B Y, CHENG Q, WEI Y F, et al. Impact of irrigation methods on soil physical properties and abscission of peanut seeds[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(6):8-12.
- [15] 张明伟, 杨恒山, 范秀艳, 等. 浅埋滴灌下水氮减量对春玉米干物质积累及水氮利用效率的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(2):149-156. ZHANG M W, YANG H S, FAN X Y, et al. Effect of reduction of nitrogen and irrigation on dry matter accumulation and utilization efficiency of water and nitrogen of spring maize in shallow drip irrigation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(2):149-156.
- [16] 王士杰, 尹光华, 李忠, 等. 浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春

- 玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 139–147.
- WANG S J, YIN G H, LI Z, et al. Effects of water–fertilizer coupling on the yield of spring maize under shallow–buried drip irrigation in semi–arid region of western Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 139–147.
- [17] HE X, CHEN J, LI Y, et al. Seasonal dynamics of soil aggregates and associated C and N stocks in different fertilizer managements[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021(3): 1–17.
- [18] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005(3): 415–421. WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005(3): 415–421.
- [19] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 668–676. YANG Y H, SU Y, HE Z C, et al. Transformation and distribution of straw–derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 668–676.
- [20] SENEVIRATNE C, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. Creep, shrinkage and permeation characteristics of geopolymer aggregate concrete: Long–term performance[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(4): 1–15.
- [21] FENG H J, WANG S Y, GAO Z D, et al. Aggregate stability and organic carbon stock under different land uses integrally regulated by binding agents and chemical properties in saline–sodic soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(15): 4151–4161.
- [22] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816–3824. LUO X H, WANG Z F, LU C, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3816–3824.
- [23] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2147–2156. LI J, LIAO H K, LONG J, et al. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2147–2156.
- [24] SIX J, ELLIOTT E, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no–tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 32(14): 2099.
- [25] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 102–106, 117. ZHANG L, ZHANG Z D, GUO Z Y, et al. Effects of subsoiling tillage and straw returning to field on soil physical properties[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 102–106, 117.
- [26] 李传哲, 章欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3424–3432. LI C Z, ZHANG H, YAO W J, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on soil physico–chemical properties and winter wheat yield in the typical ancient region of Yellow River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3424–3432.
- [27] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 921–934. DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 921–934.

(责任编辑: 宋潇)