

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.027

种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响

张霞¹ 张育林¹ 刘丹¹ 杜昊辉¹ 李军² 王旭东¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在连续9年田间定位试验基础上,分析了渭北旱塬小麦连作和小麦/玉米轮作两种种植方式下耕作措施对黑垆土水稳性团聚体含量、有机碳(SOC)含量、小麦产量和水分利用效率(WUE)的影响。结果表明:小麦/玉米轮作下0~20 cm土层大于0.25 mm水稳性大团聚体含量($R_{0.25}$)、水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、SOC含量、各粒级团聚体有机碳含量和WUE大多高于小麦连作。与连年翻耕(CC)相比,连年免耕(NN)、连年深松(SS)、免耕-深松(NS)处理主要增加了0~10 cm土层 $R_{0.25}$ 、SOC、各粒级团聚体有机碳含量和大于0.25 mm大团聚体有机碳贡献率($I_{\text{SOC}_{0.25}}$)。在大于10 cm土层,NS处理的SOC含量有所增加,且提高了35~50 cm土壤 $R_{0.25}$ 、各粒级团聚体有机碳含量以及 $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ 。相对于连年翻耕处理,免耕-深松处理的小麦产量和WUE均显著增加,且在小麦连作和小麦/玉米轮作两种种植方式下,小麦产量分别增加了14.25%、19.30%;WUE分别增加了24.98%、9.89%。整体来看,小麦/玉米轮作比小麦连作更有利于改善土壤结构、增加土壤有机碳含量和提高WUE,且免耕-深松相结合的轮耕措施是该地区较适宜的耕作模式。

关键词: 种植方式; 耕作措施; 水稳性团聚体; 土壤有机碳; 水分利用效率

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0250-12

Effects of Planting Methods and Tillage Systems on Soil Structure and Water Use Efficiency

ZHANG Xia¹ ZHANG Yulin¹ LIU Dan¹ DU Haohui¹ LI Jun² WANG Xudong¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on a 9-year field experiment, the effects of tillage systems on water-stable aggregate content, soil organic carbon (SOC) content, wheat yield and soil water use efficiency (WUE) were investigated under the two planting methods (wheat continuous cropping and wheat/maize rotation) in dark loess of Weibei Highland. The results showed that the content of water stable macroaggregate with diameter larger than 0.25 mm ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), SOC content, the aggregate-associated organic carbon of all size classes and water use efficiency (WUE) under wheat/maize rotation were mostly higher than those under the wheat continuous cropping in 0~20 cm soil layer. Compared with the conventional tillage, the measures of no-tillage (NN), subsoiling (SS) and no-tillage-subsoiling (NS) mainly increased soil $R_{0.25}$, SOC, the aggregate-associated organic carbon of all size classes and the contribution of soil organic carbon in water stable macroaggregate with a diameter larger than 0.25 mm to total soil organic carbon ($I_{\text{SOC}_{0.25}}$) in 0~10 cm soil layer. In the soil layer below 10 cm, the SOC content of NS treatment was increased, and the measures of NS also increased soil $R_{0.25}$, the aggregate-associated organic carbon of all size classes and $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ in soil layer of 35~50 cm. Compared with the conventional tillage, the measures of NS increased wheat yield and WUE significantly, by 14.25% and 19.30% for wheat yield, by 24.98% and 9.89% for WUE in wheat continuous cropping and wheat/maize rotation, respectively. Generally, compared with the wheat continuous cropping, wheat/maize rotation was more beneficial to improving soil structure, increasing SOC content and WUE; and the tillage

收稿日期: 2018-09-14 修回日期: 2018-10-15

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503116)

作者简介: 张霞(1993—),女,博士生,主要从事土壤化学研究,E-mail: m18821620696_2@163.com

通信作者: 王旭东(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤化学研究,E-mail: wangxudong01@126.com

of NS was the most suitable measure for the local soil conditions.

Key words: planting methods; tillage systems; water-stable aggregate; soil organic carbon; water use efficiency

0 引言

土壤团聚体是由土粒和有机物质胶结而形成的直径为 0.25 ~ 10 mm 的结构单位,其形成与土壤有机碳密不可分,同时土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护可使有机碳减缓或免受矿化分解,对土壤固碳和土壤肥力的发挥具有十分重要的作用^[1-3]。耕作是影响土壤结构稳定、有机碳矿化的主要人为因素^[4-5],频繁的翻耕使土壤结构遭到破坏,土壤有机碳含量下降^[6]。很多研究表明,以少耕、免耕为主要内容的保护性耕作对增加土壤结构稳定性、提高土壤有机碳含量、增加土壤固碳能力有重要作用^[7-9]。张祥彩等^[10]研究表明,免耕、深松可分别提高 0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm 土层粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量。杨永辉等^[11]在研究长期免耕下土壤结构与有机碳分布的特征时发现,长期免耕处理有利于提高土壤大于 0.5 mm 大粒级团聚体含量,显著增加土壤结构稳定性,并提高了 0 ~ 40 cm 土层总有机碳及各粒级团聚体有机碳含量。目前,国内外关于不同耕作方式等对土壤结构稳定及有机碳分布影响的研究较多^[12-14],但是关于作物种植方式对土壤结构稳定及有机碳分布影响的研究不多,且多集中于水旱轮作、禾本科-豆科作物轮作的研究^[15-17],关于小麦连作与小麦/玉米轮作下土壤结构及有机碳差异的研究较少。

渭北旱塬是黄土高原典型的旱作雨养农业

区,作为陕西省重要的粮食生产基地,冬小麦和春玉米是该地区的主要粮食作物,而降水短缺及其季节分布不均制约着作物生长发育,农民习惯采用“翻耕+浅旋”的耕作方式,长期剧烈的土壤扰动引发了该地区土壤结构破坏严重、土壤有机碳矿化损失大、水分利用效率低等一系列问题^[18-19]。如何构建适合当地的耕作方式、改善土壤结构、增加土壤固碳能力、提高作物产量和水分利用效率是亟待解决的问题。为此,本文基于渭北旱塬的长期定位试验,在小麦连作和小麦/玉米轮作两种种植方式下,以耕作措施对土壤结构稳定、有机碳固定、小麦水分利用的影响为研究重点,探讨不同种植方式与耕作措施下土壤结构、有机碳与小麦产量、水分利用效率的关系,以期为渭北旱塬区选择更有利于土壤结构稳定、有机碳积累、提高小麦水分利用效率的种植方式与耕作措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验在陕西省合阳县甘井镇进行(35°19'54.45"N,110°05'58.35"E),地属黄土高原渭北旱塬沟壑区,海拔 850 m,年平均气温 10℃左右,年降水量约 520 mm,年蒸发量约 1 832.8 mm。降雨年际间分配不均,主要集中在 7—9 月。供试土壤为黑垆土,试验前土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 2007 年试验开始前供试土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of tested soil before beginning of experiment in 2007

土层深度/cm	有机碳质量比/(g·kg ⁻¹)	全氮质量比/(g·kg ⁻¹)	全磷质量比/(g·kg ⁻¹)	全钾质量比/(g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/(mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/(mg·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	质地类型
0 ~ 10	7.4	1.35	0.62	5.95	40.62	3.77	151.09	1.38	48.7	中壤土
10 ~ 20	7.3	1.29	0.57	5.88	32.52	3.13	145.51	1.48	46.8	重壤土
20 ~ 35	5.8	0.93	0.21	5.56	21.03	2.38	141.04	1.58	44.6	重壤土
35 ~ 50	4.3	0.89	0.09	5.62	16.77	1.66	143.22	1.57	44.9	重壤土

1.2 试验设计

本试验于 2007 年 9 月—2016 年 6 月进行,试验期间无灌溉。试验采用裂区设计,主区为种植方式,分为小麦连作和小麦/玉米轮作 2 种,均为一年一熟制;副区为耕作方式,分为连年免耕(NN)、连年深松(SS)、免耕-深松(NS)和连年翻耕(CC)4 种,两种因素相互组合,共 8 个处理(表 2)。试验设 3 次重

复,小区面积 22.5 m × 5 m = 112.5 m²。2007 年试验开始前长期采用传统翻耕耕作方式,前作作物为玉米,2007—2016 年试验期间在小麦、玉米收获后均全额秸秆粉碎覆盖。供试小麦品种 2007—2013 年期间为晋麦 47,2014 年及以后为长 6 359。小麦/玉米轮作田玉米田供试玉米品种为豫玉 22。小麦/玉米轮作田作物播种见表 3。

表2 试验处理

Tab.2 Experimental treatments

耕作体系	小麦连作(W)	小麦/玉米轮作(R)
连年翻耕(CC)	连作田连年翻耕(WCC)	轮作田连年翻耕(RCC)
连年免耕(NN)	连作田连年免耕(WNN)	轮作田连年免耕(RNN)
连年深松(SS)	连作田连年深松(WSS)	轮作田连年深松(RSS)
免耕-深松(NS)	连作田免耕-深松(WNS)	轮作田免耕-深松(RNS)

表3 2007—2016年小麦/玉米轮作田种植作物

Tab.3 Cultivated crops in rotation in 2007—2016

时段	2007.09—	2009.04—	2009.09—	2011.04—	2011.09—	2013.04—	2013.09—	2015.04—	2015.09—
	2008.06	2009.09	2010.06	2011.09	2012.06	2013.09	2014.06	2015.09	2016.06
种植作物	冬小麦	春玉米	冬小麦	春玉米	冬小麦	春玉米	冬小麦	春玉米	冬小麦

小麦连作田中,施肥量 N 为 150 kg/hm², P₂O₅ 为 120 kg/hm², K₂O 为 90 kg/hm², 生育期不追肥,其中氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、磷酸二铵和氯化钾。冬小麦播种时,旋耕切碎残茬、平整地表和混合肥料后,采用条播机播种,每年9月下旬播种,次年6月中下旬收获,行距20 cm。试验期间其他田间管理措施同当地大田,无灌溉。

小麦/玉米轮作田中,小麦和玉米施基肥: N 150 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm² 和 K₂O 90 kg/hm², 播前人工撒施肥料;作物生育期,小麦不追肥,玉米大喇叭口期追施 N 150 kg/hm²,其中氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素、磷酸二铵和氯化钾。小麦用条播机播种,每年9月下旬播种,次年6月中下旬收获;玉

米用点播机播种,每年4月下旬播种,9月中下旬收获。试验期间其他田间管理措施同当地大田,无灌溉。

免耕是指在作物收获后将秸秆粉碎覆盖地表,无其他措施,保持秸秆覆盖地表越过休闲期;翻耕是指在作物收获后将秸秆粉碎覆盖地表,然后采用传统铧式犁(1LF-230型双向反转二铧犁,耕宽60 cm,耕深20~30 cm)将土壤翻耕20~25 cm,秸秆翻埋于土壤中,地表裸露越过休闲期;深松是在作物收获时将秸秆粉碎覆盖于地表,采用深松机(型号为1S2200,耕宽50 cm,耕深30~40 cm)进行深松,深度为30~35 cm,保持秸秆覆盖地表越过休闲期。2007—2016年土壤耕作次序见表4。

表4 2007—2016年土壤轮耕次序

Tab.4 Sequence of soil rotational tillage systems in 2007—2016

耕作体系	时段									
	2007—2008	2008—2009	2009—2010	2010—2011	2011—2012	2012—2013	2013—2014	2014—2015	2015—2016	
CC	CT									
NN	NT									
SS	ST									
NS	NT	ST	NT	ST	NT	ST	NT	ST	NT	

注: ST为深松;NT为免耕;CT为翻耕。

1.3 土样采集与测定

2016年6月中下旬小麦收获后在田间取样,每个处理多点分层取样,分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~35 cm和35~50 cm土层的原状土样,将采集的原状土样在室内沿自然结构轻轻掰成小土块,过8 mm筛,自然风干,用于团聚体分析。

土壤各粒级水稳性团聚体含量采用湿筛法(Elliot法)测定^[20],土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法测定^[21]。

1.4 计算公式

各粒级水稳性团聚体含量计算公式为

$$W_{A_i} = \frac{M_i}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W_{A_i} ——各粒级水稳性团聚体含量, %

M_i ——各粒级水稳性团聚体质量, g

M ——土壤样品总质量, g

团聚体平均重量直径^[22]计算公式为

$$I_{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_{A_i}}{\sum_{i=1}^n W_{A_i}} \quad (2)$$

式中 I_{MWD} ——团聚体平均重量直径, mm

X_i ——各粒级团聚体的平均直径, mm

各粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率计算公式为

$$A_i = \frac{I_{Soc_i} W_{A_i}}{I_{Soc}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 A_i ——各粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率, %

I_{soc_i} ——各粒级团聚体中有机碳质量比, g/kg

I_{soc} ——土壤有机碳质量比, g/kg

水分利用效率计算公式为

$$WUE = \frac{Y_a}{ET_a} \quad (4)$$

其中 $ET_a = W_e - W_b + P$ (5)

$$W = DHC_w \quad (6)$$

式中 WUE ——水分利用效率, kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$)

Y_a ——单位面积的作物产量, kg/ hm^2

ET_a ——作物整个生育期耗水量, mm

W_e ——作物播种时土壤蓄水量, mm

W_b ——作物收获时土壤蓄水量, mm

P ——作物整个生育期降雨量, mm

W ——土壤蓄水量, mm

D ——土壤容重, g/ cm^3

H ——土层厚度, cm

C_w ——田间土壤含水率, %

1.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 软件进行相关数据的计算与处理并作图。用 SAS 8.0 软件进行相关性分析和方差分析, 显著性检验为 Duncan 新复极差法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式和耕作措施下农田土壤团聚体的变化

2.1.1 土壤 0~50 cm 水稳性团聚体分布

不同处理下土壤水稳性团聚体分布如表 5 所示, 从种植方式看, 小麦/玉米轮作下耕层 (0~20 cm 土层) 土壤大于 0.25 mm 大团聚体含量 ($R_{0.25}$) 均高于小麦连作下对应耕作处理。从耕作措施来看, 在 0~10 cm 土层, 各粒级团聚体 (大于 2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm) 含量均以 WCC 处理最小, 且在两种种植方式下, 各耕作处理的 $R_{0.25}$ 含量由大到小均表现为连年免耕、连年深松、免耕-深松、连年翻耕。在 10~20 cm 土层, 8 种处理的大于 2 mm、0.5~1 mm 粒级团聚体含量差异不显著; 1~2 mm、0.25~0.5 mm 粒级团聚体含量分别以 RNS、RNN 处理最大, 与连年翻耕处理相比, 小麦连作下免耕、深松以及免耕-深松轮耕处理的 $R_{0.25}$ 含量均略有增加; 小麦/玉米轮作下各耕作处理间的 $R_{0.25}$ 含量无显著差异。在 20~35 cm 土层, 各处理的大于 2 mm 粒级团聚体含量差异不显著; 1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量

均以 RNS 处理最大, 与连年翻耕处理相比, 除了小麦/玉米轮作下连年深松处理的 $R_{0.25}$ 含量显著减少外, 其他处理均变化不明显。在 35~50 cm 土层, 大于 2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒径团聚体含量均以 RSS 处理最大, 0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量以 RNN 处理最大; 与连年翻耕处理相比, 小麦连作下免耕-深松处理的 $R_{0.25}$ 含量显著增加; 小麦/玉米轮作下其他耕作处理的 $R_{0.25}$ 含量均有所增加, 且连年免耕、连年深松处理达差异显著水平。

2.1.2 种植方式和耕作措施对土壤中大于 0.25 mm 粒级团聚体的交互作用

通过方差分析 (表 6) 可知, 种植方式和耕作措施对 $R_{0.25}$ 的影响不同。在 0~10 cm 表层, 影响 $R_{0.25}$ 的因素中耕作措施的作用极显著 ($P < 0.01$), 且种植方式和耕作措施的交互效应对 $R_{0.25}$ 的作用也达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。在 10~20 cm 土层, 种植方式和耕作措施对土壤 $R_{0.25}$ 的影响不大。在 20~35 cm 和 35~50 cm 土层, 种植方式和耕作措施对 $R_{0.25}$ 均分别产生显著影响 ($P < 0.05$) 和极显著影响 ($P < 0.01$), 且两者的交互效应对 $R_{0.25}$ 也有极显著影响 ($P < 0.01$)。

2.1.3 土壤水稳性团聚体平均重量直径变化

各处理水稳性团聚体平均重量直径 (MWD) 受种植方式和耕作措施的交互效应比较明显 (表 7)。在 0~10 cm 和 35~50 cm 土层, 种植方式和耕作措施的交互效应对 MWD 均产生极显著影响 ($P < 0.01$)。

在 0~10 cm 土层, 小麦/玉米轮作下各耕作处理 MWD 高于小麦连作下对应耕作处理; 与连年翻耕处理相比, 小麦连作下其他耕作处理的 MWD 均有所增加, 其中免耕-深松处理达差异显著水平; 小麦/玉米轮作下各耕作处理间的 MWD 差异不显著。在 10~20 cm 土层, 小麦/玉米轮作下各耕作处理 MWD 高于小麦连作下对应耕作处理; 但在同一种种植条件下, 不同耕作之间差异不显著。在 20~35 cm 土层, 与连年翻耕处理相比, 小麦连作下其他耕作处理的 MWD 均略有增加; 小麦/玉米轮作下连年深松处理的 MWD 显著减少。在 35~50 cm 土层, 小麦连作下各耕作处理间的 MWD 差异不显著; 小麦/玉米轮作下连年免耕、连年深松处理的 MWD 显著高于连年翻耕处理。

2.2 不同种植方式与耕作措施下农田土壤有机碳含量变化

2.2.1 土壤有机碳含量变化

如图 1 所示, 8 个处理的土壤有机碳含量均随土层加深而减少, 且小麦/玉米轮作下各耕作处理

表5 不同处理下土壤水稳性团聚体的分布
Tab.5 Distribution of water stable aggregate under different treatments

土层深度/ cm	处理	粒径/mm					
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0~0.25	>0.25($R_{0.25}$)
0~10	WCC	(1.34 ± 0.40) ^b	(1.10 ± 0.04) ^d	(2.04 ± 0.14) ^f	(3.14 ± 0.24) ^d	(92.39 ± 0.75) ^a	(7.61 ± 0.75) ^c
	WNN	(2.57 ± 0.04) ^{ab}	(2.82 ± 0.04) ^b	(4.00 ± 0.08) ^e	(8.93 ± 0.86) ^{bc}	(81.70 ± 0.94) ^b	(18.31 ± 0.94) ^b
	WSS	(2.34 ± 0.25) ^b	(2.73 ± 0.13) ^b	(5.08 ± 0.62) ^e	(8.47 ± 0.76) ^c	(81.40 ± 0.53) ^b	(18.61 ± 0.53) ^b
	WNS	(3.69 ± 0.52) ^{ab}	(2.61 ± 0.17) ^b	(4.27 ± 0.14) ^e	(5.72 ± 0.23) ^d	(83.72 ± 0.32) ^b	(16.29 ± 0.32) ^b
	RCC	(5.20 ± 1.05) ^a	(3.52 ± 0.04) ^a	(6.87 ± 0.68) ^d	(11.36 ± 0.25) ^b	(73.06 ± 3.02) ^c	(26.94 ± 3.02) ^a
	RNN	(3.17 ± 1.73) ^{ab}	(3.42 ± 0.25) ^a	(8.97 ± 0.16) ^c	(14.13 ± 1.17) ^a	(70.32 ± 2.67) ^c	(29.68 ± 2.67) ^a
	RSS	(3.49 ± 2.09) ^{ab}	(2.81 ± 0.07) ^b	(12.34 ± 0.57) ^a	(9.57 ± 2.53) ^{bc}	(71.79 ± 0.91) ^c	(28.21 ± 0.91) ^a
	RNS	(3.82 ± 0.27) ^{ab}	(1.61 ± 0.51) ^c	(10.97 ± 0.66) ^b	(10.81 ± 1.23) ^{bc}	(72.79 ± 2.01) ^c	(27.21 ± 2.01) ^a
10~20	WCC	(0.85 ± 0.23) ^a	(0.92 ± 0.21) ^e	(2.41 ± 0.57) ^a	(3.72 ± 0.20) ^b	(92.11 ± 0.06) ^a	(7.90 ± 0.06) ^c
	WNN	(1.54 ± 0.78) ^a	(1.65 ± 0.26) ^{de}	(2.72 ± 0.04) ^a	(4.81 ± 1.03) ^{ab}	(89.30 ± 2.11) ^{abc}	(10.71 ± 2.11) ^{abc}
	WSS	(0.93 ± 0.36) ^a	(1.63 ± 0.12) ^{de}	(2.68 ± 0.68) ^a	(4.64 ± 1.15) ^{ab}	(90.14 ± 2.07) ^{ab}	(9.87 ± 2.07) ^{bc}
	WNS	(1.80 ± 0.47) ^a	(2.53 ± 0.11) ^{bc}	(3.31 ± 0.26) ^a	(5.34 ± 0.37) ^{ab}	(87.03 ± 0.25) ^{abc}	(12.97 ± 0.25) ^{abc}
	RCC	(2.40 ± 1.63) ^a	(2.45 ± 0.20) ^{cd}	(5.95 ± 3.94) ^a	(6.36 ± 2.89) ^{ab}	(82.85 ± 5.40) ^{bc}	(17.15 ± 0.25) ^{ab}
	RNN	(2.31 ± 0.15) ^a	(3.27 ± 0.36) ^{ab}	(3.47 ± 0.16) ^a	(8.75 ± 2.66) ^a	(82.22 ± 2.61) ^c	(17.79 ± 2.61) ^a
	RSS	(1.54 ± 0.40) ^a	(1.95 ± 0.33) ^{cd}	(3.06 ± 0.32) ^a	(3.44 ± 0.07) ^b	(90.02 ± 0.34) ^{ab}	(9.98 ± 0.34) ^{bc}
	RNS	(1.86 ± 0.97) ^a	(3.39 ± 0.71) ^a	(4.72 ± 0.29) ^a	(4.16 ± 0.16) ^b	(85.89 ± 2.16) ^{bc}	(14.12 ± 2.16) ^{ab}
20~35	WCC	(1.86 ± 0.80) ^a	(1.43 ± 0.09) ^{bc}	(3.03 ± 0.19) ^{bc}	(7.58 ± 0.81) ^a	(86.11 ± 0.27) ^{bc}	(13.89 ± 0.27) ^{ab}
	WNN	(0.95 ± 0.33) ^a	(1.77 ± 0.56) ^{bc}	(3.11 ± 0.24) ^b	(6.89 ± 3.35) ^a	(87.29 ± 2.71) ^{abc}	(12.72 ± 0.71) ^{bc}
	WSS	(1.18 ± 0.54) ^a	(2.03 ± 0.54) ^{bc}	(2.48 ± 0.04) ^{cd}	(4.01 ± 0.52) ^{bc}	(90.31 ± 0.57) ^a	(9.69 ± 0.57) ^{bc}
	WNS	(1.37 ± 0.33) ^a	(1.65 ± 0.21) ^{bc}	(2.57 ± 0.39) ^{bed}	(4.23 ± 0.24) ^b	(90.18 ± 0.09) ^a	(9.82 ± 0.09) ^{bc}
	RCC	(2.46 ± 0.24) ^a	(3.54 ± 0.42) ^a	(2.56 ± 0.03) ^{bed}	(5.27 ± 3.17) ^a	(86.21 ± 3.85) ^{abc}	(13.80 ± 3.85) ^{ab}
	RNN	(2.83 ± 1.14) ^a	(2.33 ± 0.04) ^{ab}	(2.96 ± 0.21) ^{bc}	(2.52 ± 0.19) ^c	(89.37 ± 0.78) ^{ab}	(10.64 ± 0.78) ^{bc}
	RSS	(1.25 ± 0.73) ^a	(0.59 ± 0.83) ^c	(2.06 ± 0.35) ^d	(3.18 ± 0.52) ^{bc}	(92.94 ± 2.43) ^a	(7.07 ± 2.43) ^c
	RNS	(2.60 ± 1.27) ^a	(3.70 ± 1.16) ^a	(5.73 ± 0.29) ^a	(9.13 ± 1.24) ^a	(78.84 ± 1.01) ^c	(21.16 ± 1.01) ^a
35~50	WCC	(0.74 ± 0.23) ^c	(0.86 ± 0.21) ^c	(1.97 ± 0.10) ^d	(4.25 ± 0.74) ^{bc}	(92.19 ± 1.27) ^a	(7.81 ± 1.27) ^b
	WNN	(0.57 ± 0.13) ^c	(1.33 ± 0.49) ^c	(2.73 ± 0.30) ^{bed}	(5.68 ± 1.46) ^b	(89.70 ± 0.78) ^a	(10.31 ± 0.78) ^b
	WSS	(0.68 ± 0.72) ^c	(0.82 ± 0.21) ^c	(2.05 ± 0.03) ^d	(3.10 ± 0.37) ^c	(93.35 ± 0.91) ^a	(6.65 ± 0.91) ^b
	WNS	(1.20 ± 0.25) ^{bc}	(3.08 ± 1.23) ^{ab}	(4.29 ± 1.47) ^{ab}	(7.84 ± 0.18) ^a	(83.60 ± 0.32) ^b	(16.41 ± 0.32) ^a
	RCC	(0.91 ± 0.58) ^c	(2.10 ± 0.09) ^{bc}	(2.44 ± 0.18) ^{cd}	(4.16 ± 0.42) ^{bc}	(90.41 ± 0.11) ^a	(9.60 ± 0.11) ^b
	RNN	(2.19 ± 0.15) ^{ab}	(2.91 ± 0.53) ^{ab}	(5.39 ± 0.47) ^a	(9.40 ± 1.62) ^a	(80.12 ± 1.71) ^b	(19.88 ± 1.71) ^a
	RSS	(2.53 ± 1.00) ^a	(3.52 ± 0.52) ^a	(5.44 ± 0.88) ^a	(8.61 ± 0.57) ^a	(79.91 ± 0.07) ^b	(20.09 ± 0.07) ^a
	RNS	(0.62 ± 0.01) ^c	(1.19 ± 0.23) ^c	(4.10 ± 0.78) ^{abc}	(8.38 ± 0.10) ^a	(85.70 ± 0.71) ^a	(14.30 ± 0.71) ^{ab}

注:同一列不同小写字母表示不同处理之间差异达到显著水平($P < 0.05$),下同。

表6 种植方式、耕作措施对土壤中大于0.25 mm 团聚体的二因素方差分析

Tab.6 Two-factor variance analysis of different cropping methods, tillage systems and their interaction on water stable aggregate of size larger than 0.25 mm

土层深度/cm	影响因素		
	P	T	P × T
0~10	0.070	0.001 **	0.007 **
10~20	0.233	0.095	0.051
20~35	0.025 *	0.013 *	0.009 **
35~50	0.008 **	<0.001 **	<0.001 **

注:P表示种植方式;T表示耕作措施;*表示差异达0.05水平;**表示差异达0.01水平;下同。

0~50 cm 土层的土壤有机碳(SOC)含量大多高于小麦连作下对应耕作处理。表层土壤(0~10 cm)

的有机碳含量由大到小顺序为RNS、RNN、WNN、WNS、RSS、WSS、RCC、WCC,在两种种植方式下,连年免耕、连年深松、免耕-深松处理的SOC含量均显著高于连年翻耕处理。在10~20 cm 土层,各处理的SOC含量差异不大,但WNN处理显著低于其他处理。在20~35 cm 土层,两种种植方式下的SOC含量由大到小均表现为免耕-深松、连年翻耕、连年深松、连年免耕。在35~50 cm 土层,与连年翻耕处理相比,小麦连作下其他耕作处理的SOC含量无明显变化;小麦/玉米轮作下的连年深松、连年免耕显著减少。

2.2.2 各粒级团聚体有机碳含量变化

由表8可知,随着土层的加深以及团聚体粒径变小,其有机碳含量呈降低趋势。整体上看,小麦/

表 7 不同种植方式和耕作措施对土壤团聚体 MWD 的影响

Tab.7 Effects of different cropping methods and tillage systems on soil water-stable aggregate mean weight diameter (MWD)

处理	土层深度/cm			
	0~10	10~20	20~35	35~50
WCC	(0.34 ± 0.02) ^c	(0.32 ± 0.01) ^c	(0.37 ± 0.05) ^{abc}	(0.31 ± 0.01) ^d
WNN	(0.44 ± 0.01) ^{bc}	(0.36 ± 0.04) ^{abc}	(0.34 ± 0.02) ^c	(0.31 ± 0.01) ^d
WSS	(0.43 ± 0.01) ^{bc}	(0.33 ± 0.02) ^{bc}	(0.35 ± 0.02) ^{bc}	(0.31 ± 0.03) ^d
WNS	(0.49 ± 0.03) ^{ab}	(0.39 ± 0.02) ^{abc}	(0.35 ± 0.02) ^{bc}	(0.38 ± 0.00) ^{cd}
RCC	(0.59 ± 0.05) ^a	(0.45 ± 0.04) ^a	(0.43 ± 0.02) ^{ab}	(0.34 ± 0.02) ^{cd}
RNN	(0.51 ± 0.08) ^{ab}	(0.43 ± 0.01) ^a	(0.43 ± 0.05) ^{ab}	(0.43 ± 0.05) ^{ab}
RSS	(0.52 ± 0.09) ^{ab}	(0.37 ± 0.02) ^{abc}	(0.33 ± 0.05) ^c	(0.45 ± 0.02) ^a
RNS	(0.53 ± 0.02) ^{ab}	(0.41 ± 0.06) ^{ab}	(0.46 ± 0.05) ^a	(0.33 ± 0.01) ^{cd}
P	0.265	0.015 *	0.256	0.116
T	0.124	0.303	0.140	0.074
P × T	0.004 **	0.257	0.1901	0.005 **

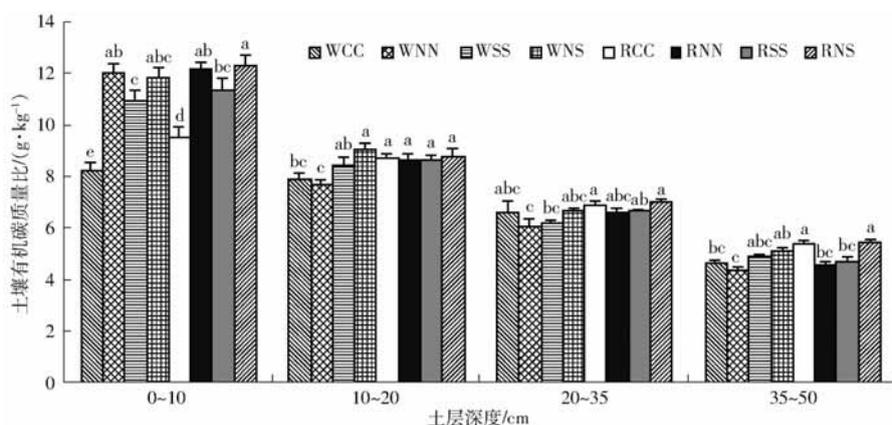


图 1 土壤有机碳质量比的变化

Fig.1 Soil organic carbon content

玉米轮作下各粒级团聚体有机碳含量大多高于小麦连作下对应耕作处理。在 0~10 cm 土层, 大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳含量均以 WCC 处理最小, 且在两种种植方式下其他耕作处理大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳含量均高于连年翻耕处理。在 10~20 cm 土层, 小麦连作和小麦/玉米轮作下, 与连年翻耕相比, 连年免耕、连年深松主要增加了大于 2 mm 粒径团聚体有机碳含量, 免耕-深松则增加了 1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0~0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量。在 20~35 cm 土层, 大于 2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 粒径团聚体有机碳含量以 RNS 处理最大, 0.25~0.5 mm、0~0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量以 RSS 处理最大, 与连年翻耕相比, 两种种植方式下连年免耕处理的各粒径团聚体有机碳含量有所减少, 免耕-深松处理有所增加, 连年深松处理变化不显著。在 35~50 cm 土层, 各粒级团聚体有机碳含量均以 RNS 处理最大, 且与连年翻耕相比, 两种种植方式下连年免耕、连年深松处理的各粒径团聚体有机碳含量变化不显著, 免耕-深松处理则有所增加。

2.2.3 各粒级团聚体有机碳贡献率变化

不同处理下土壤各粒级团聚体有机碳贡献率的变化如图 2 所示, 在 0~10 cm 土层, 小麦/玉米轮作下大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳贡献率均高于小麦连作下对应耕作处理, 且与连年翻耕相比, 在小麦连作下, 其他耕作处理的大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳贡献率均有所增加; 在小麦/玉米轮作下, 连年免耕、连年深松增加了 0.5~1 mm 粒径团聚体有机碳贡献率, 免耕-深松则增加了小于 1 mm 各粒径团聚体有机碳贡献率。在 10~20 cm 土层, 小麦连作下, 连年免耕、免耕-深松处理大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳贡献率均高于连年翻耕处理, 连年深松则增加了大于 2 mm、1~2 mm、0.25~0.5 mm 粒径团聚体有机碳贡献率; 在小麦/玉米轮作下, 与连年翻耕相比, 连年免耕增加了 1~2 mm、0.25~0.5 mm 粒径团聚体有机碳贡献率, 免耕-深松则增加了 1~2 mm、0~0.25 mm 粒径团聚体有机碳贡献率。在 20~35 cm 土层, 大于 0.25 mm 各粒级大团聚体有机碳含量均以 RNS 处理最大, 且与连年翻耕相比, 在小麦连作下, 连年免

表8 不同处理下土壤水稳性团聚体有机碳质量比分布

Tab.8 Distribution of aggregate-associated organic carbon under different treatments

g/kg

土层深度/ cm	处理	粒径/mm				
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0~0.25
0~10	WCC	(12.99 ± 0.90) ^d	(11.22 ± 0.28) ^d	(10.22 ± 0.21) ^d	(6.88 ± 0.78) ^c	(5.26 ± 0.21) ^e
	WNN	(16.73 ± 0.60) ^{ab}	(14.82 ± 0.43) ^{abc}	(12.13 ± 0.44) ^c	(8.32 ± 0.94) ^{bc}	(5.12 ± 0.14) ^e
	WSS	(14.77 ± 0.06) ^c	(14.06 ± 0.86) ^c	(12.34 ± 0.78) ^{bc}	(7.67 ± 0.40) ^{bc}	(5.45 ± 0.15) ^e
	WNS	(16.02 ± 0.45) ^b	(14.15 ± 0.14) ^{bc}	(13.35 ± 0.39) ^{ab}	(11.10 ± 0.92) ^a	(7.53 ± 0.20) ^b
	RCC	(13.29 ± 0.06) ^d	(12.17 ± 0.35) ^d	(10.95 ± 0.25) ^d	(7.58 ± 0.78) ^{bc}	(5.96 ± 0.21) ^d
	RNN	(17.37 ± 0.54) ^a	(15.52 ± 0.43) ^a	(13.08 ± 0.65) ^{abc}	(9.32 ± 0.51) ^b	(6.57 ± 0.36) ^c
	RSS	(15.67 ± 0.34) ^{bc}	(14.91 ± 0.64) ^{abc}	(12.79 ± 0.42) ^{bc}	(8.47 ± 0.40) ^{bc}	(6.15 ± 0.15) ^{cd}
	RNS	(17.22 ± 0.26) ^a	(15.35 ± 0.57) ^{ab}	(14.05 ± 0.39) ^a	(11.60 ± 0.64) ^a	(8.23 ± 0.20) ^a
10~20	WCC	(11.49 ± 0.46) ^c	(9.28 ± 0.21) ^d	(8.99 ± 0.71) ^c	(6.72 ± 0.81) ^{ab}	(6.38 ± 0.49) ^{abc}
	WNN	(13.34 ± 1.29) ^{ab}	(9.79 ± 0.22) ^{cd}	(9.45 ± 0.04) ^{bc}	(5.59 ± 0.42) ^c	(5.38 ± 0.43) ^d
	WSS	(13.92 ± 0.00) ^{ab}	(10.21 ± 0.21) ^{bc}	(7.83 ± 0.82) ^d	(6.87 ± 0.27) ^{ab}	(3.91 ± 0.34) ^e
	WNS	(12.86 ± 0.28) ^{abc}	(11.73 ± 0.25) ^a	(10.21 ± 0.23) ^{ab}	(6.41 ± 0.25) ^{bc}	(5.95 ± 0.35) ^{bed}
	RCC	(12.27 ± 0.50) ^{bc}	(10.89 ± 0.25) ^b	(9.86 ± 0.54) ^{abc}	(7.59 ± 0.64) ^a	(6.65 ± 0.25) ^{ab}
	RNN	(14.40 ± 0.39) ^a	(10.67 ± 0.32) ^b	(9.51 ± 0.42) ^{bc}	(6.41 ± 0.39) ^{bc}	(6.15 ± 0.47) ^{bed}
	RSS	(14.12 ± 1.32) ^a	(10.55 ± 0.54) ^{bc}	(10.12 ± 0.15) ^{abc}	(7.19 ± 0.21) ^{ab}	(5.69 ± 0.30) ^{cd}
	RNS	(12.59 ± 0.46) ^{abc}	(12.41 ± 0.56) ^a	(10.99 ± 0.27) ^a	(7.65 ± 0.30) ^a	(7.23 ± 0.39) ^a
20~35	WCC	(11.06 ± 0.30) ^{bc}	(9.02 ± 0.64) ^{bed}	(8.82 ± 0.28) ^{abc}	(5.97 ± 0.63) ^{bcd}	(6.22 ± 0.28) ^a
	WNN	(8.76 ± 0.40) ^d	(8.19 ± 0.35) ^d	(8.09 ± 0.26) ^{cd}	(5.12 ± 0.08) ^d	(4.67 ± 0.30) ^{bc}
	WSS	(8.99 ± 0.39) ^d	(8.95 ± 0.57) ^{bed}	(7.31 ± 0.54) ^d	(5.74 ± 0.41) ^{cd}	(3.71 ± 0.36) ^c
	WNS	(10.55 ± 0.36) ^c	(9.63 ± 0.40) ^{abc}	(8.78 ± 0.56) ^{abc}	(6.26 ± 0.39) ^{abc}	(5.64 ± 0.89) ^{ab}
	RCC	(11.27 ± 0.30) ^{abc}	(9.74 ± 0.23) ^{ab}	(9.22 ± 0.08) ^{ab}	(5.94 ± 0.41) ^{bed}	(6.33 ± 0.41) ^a
	RNN	(9.48 ± 0.59) ^d	(8.51 ± 0.55) ^{cd}	(8.26 ± 0.33) ^{bcd}	(6.11 ± 0.08) ^{bc}	(5.49 ± 0.53) ^{ab}
	RSS	(11.61 ± 0.44) ^{ab}	(10.01 ± 0.11) ^{ab}	(9.05 ± 0.57) ^{abc}	(7.01 ± 0.32) ^a	(6.46 ± 0.42) ^a
	RNS	(12.18 ± 0.46) ^a	(10.69 ± 0.09) ^a	(9.60 ± 0.48) ^a	(6.75 ± 0.22) ^{ab}	(6.25 ± 0.93) ^a
35~50	WCC	(7.83 ± 0.11) ^d	(7.32 ± 0.72) ^{bc}	(6.07 ± 0.41) ^{de}	(4.68 ± 0.41) ^b	(3.83 ± 0.64) ^b
	WNN	(6.72 ± 0.45) ^e	(6.62 ± 0.35) ^c	(6.57 ± 0.56) ^{ede}	(4.33 ± 0.43) ^b	(4.08 ± 0.61) ^{ab}
	WSS	(7.92 ± 0.28) ^d	(7.52 ± 0.33) ^{bc}	(5.89 ± 0.21) ^e	(5.24 ± 0.45) ^{ab}	(4.45 ± 0.01) ^{ab}
	WNS	(9.78 ± 0.32) ^{ab}	(8.27 ± 0.44) ^{ab}	(7.93 ± 0.27) ^{ab}	(5.39 ± 0.32) ^{ab}	(4.63 ± 0.34) ^{ab}
	RCC	(8.38 ± 0.18) ^{cd}	(7.87 ± 0.65) ^{ab}	(6.62 ± 0.48) ^{ede}	(5.33 ± 0.48) ^{ab}	(4.43 ± 0.64) ^{ab}
	RNN	(7.57 ± 0.52) ^d	(7.72 ± 0.50) ^{abc}	(7.17 ± 0.42) ^{bc}	(5.38 ± 0.34) ^{ab}	(4.05 ± 0.41) ^{ab}
	RSS	(8.97 ± 0.50) ^{bc}	(8.07 ± 0.40) ^{ab}	(6.94 ± 0.43) ^{cd}	(5.84 ± 0.45) ^a	(4.03 ± 0.53) ^{ab}
	RNS	(10.33 ± 0.25) ^a	(8.82 ± 0.37) ^a	(8.43 ± 0.41) ^a	(6.19 ± 0.61) ^a	(5.11 ± 0.47) ^a

耕、连年深松、免耕-深松处理的1~2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率均有所增加;在小麦/玉米轮作下,连年免耕增加了0.5~1 mm 粒径团聚体有机碳贡献率,连年深松增加了0~0.25 mm 粒径团聚体有机碳贡献率,免耕-深松处理大于0.25 mm 各粒径大团聚体有机碳贡献率均有所增加。在35~50 cm 土层,与连年翻耕相比,在小麦连作下,连年免耕处理增加了小于2 mm 各粒径团聚体有机碳贡献率,连年深松处理增加了0~0.25 mm 粒径团聚体有机碳贡献率,免耕-深松处理则增加了大于0.25 mm 各粒径大团聚体有机碳贡献率;在小麦/玉米轮作下,连年免耕、连年深松处理大于0.25 mm 各粒径大团聚体有机碳贡献率均有所增加,免耕-深松处理则增加了小于1 mm 各粒径团聚体有机碳贡献率。

2.2.4 种植方式和耕作措施对土壤大于0.25 mm 大团聚体有机碳贡献率的交互作用

通过方差分析(表9)可知,在0~50 cm 各土层,种植方式、耕作措施对大于0.25 mm 大团聚体有机碳贡献率($I_{\text{SOC}_{0.25}}$)的影响均达到极显著水平($P < 0.01$),且种植方式和耕作措施的交互效应对 $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ 也产生极显著影响($P < 0.01$)。

2.3 种植方式和耕作措施对土壤水分利用和小麦产量的影响

由表10可知,小麦产量由大到小顺序依次为RNS、WNS、WSS、RCC、WNN、WCC、RNN、RSS,在小麦连作和小麦/玉米轮作两种种植方式下,小麦产量均以免耕-深松处理最高,分别比连年翻耕处理增加了14.25%、19.30%。小麦/玉米轮作下各耕作处理的水分利用效率(WUE)均高于小麦连作对应耕

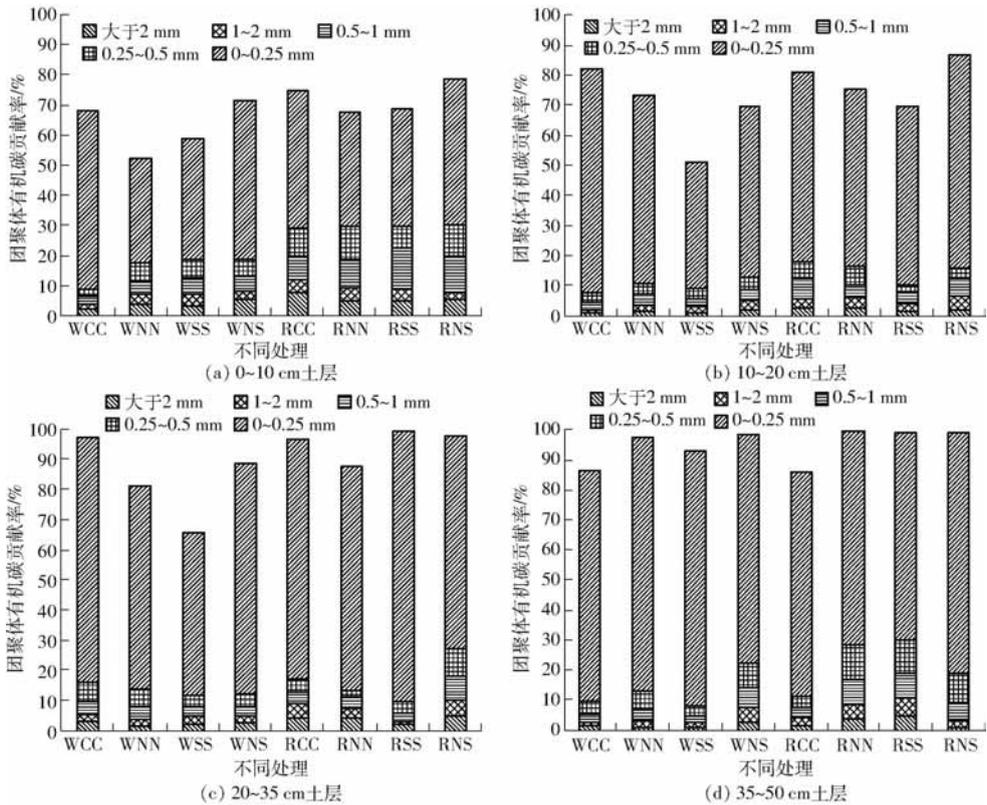


图 2 不同处理下土壤各粒级水稳定性团聚体有机碳贡献率的变化

Fig. 2 Contribution of aggregate-associated organic carbon to soil total organic carbon under different treatments

表 9 种植方式、耕作措施对土壤中大于 0.25 mm 大团聚体有机碳贡献率的二因素方差分析

Tab. 9 Two-factor variance analysis of different cropping methods, tillage systems and their interaction on contributing rate of soil organic carbon in water-stable aggregate of size larger than 0.25 mm

土层深度/cm	影响因素		
	P	T	P × T
0 ~ 10	0.002 **	<0.001 **	<0.001 **
10 ~ 20	0.008 **	<0.001 **	<0.001 **
20 ~ 35	0.009 **	<0.001 **	<0.001 **
35 ~ 50	0.005 **	<0.001 **	<0.001 **

作处理;在小麦连作下,其他耕作处理的 WUE 均显著高于连年翻耕处理,免耕-深松处理的 WUE 增加幅度最大,为 24.98%;在小麦/玉米轮作下,与连年翻耕处理相比,免耕-深松理的 WUE 增加显著,增加幅度为 9.89%。

2.4 小麦产量和水分利用效率与土壤性状的相关性
由表 11 可知, $R_{0.25}$ 、MWD 与 SOC 均呈显著正相关; $I_{SOC_{0.25}}$ 与 $R_{0.25}$ 、MWD、SOC 呈极显著正相关; WUE 与 $R_{0.25}$ 、MWD、SOC、 $I_{SOC_{0.25}}$ 呈显著正相关。进一步分析不同土层各因子的相关性表明(表 12),小麦产量与 20 ~ 35 cm 土层的 $R_{0.25}$ 、 $I_{SOC_{0.25}}$ 呈显著正相

表 10 2016 年不同处理下的小麦产量和水分利用效率

Tab. 10 Wheat yield and water use efficiency under different treatments in 2016

处理	休闲期蓄水量/	生育期蓄水量/	生育期耗水量/	产量/($kg \cdot hm^{-2}$)	水分利用效率/
	mm	mm	mm		($kg \cdot (hm^2 \cdot mm)^{-1}$)
WCC	394.9	180.8	461.9	(4 918 ± 160) ^c	(10.58 ± 0.30) ^e
WNN	385.8	211.3	414.5	(5 141 ± 29) ^{bc}	(12.36 ± 0.07) ^d
WSS	391.2	185.3	445.9	(5 396 ± 244) ^{bc}	(12.10 ± 0.21) ^d
WNS	399.6	229.5	410.1	(5 619 ± 238) ^b	(13.70 ± 0.58) ^{cd}
RCC	337.1	260.6	316.5	(5 317 ± 150) ^{bc}	(16.48 ± 0.47) ^{bc}
RNN	378.5	275.3	343.2	(4 424 ± 188) ^d	(12.89 ± 0.55) ^{cd}
RSS	338.5	262.1	316.3	(4 173 ± 106) ^d	(13.20 ± 0.34) ^{cd}
RNS	388.4	278.1	350.3	(6 343 ± 314) ^a	(18.11 ± 0.90) ^a

关,并与 35 ~ 50 cm 土层的 SOC 呈显著正相关; WUE 与 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 35 cm 土层的

MWD 以及 $I_{SOC_{0.25}}$ 呈显著正相关,并与 20 ~ 35 cm、35 ~ 50 cm 土层的 SOC 呈显著正相关。

表 11 小麦产量和水分利用效率与土壤性状的相关系数

	$R_{0.25}$	MWD	SOC	$I_{SOC_{0.25}}$	WUE	产量
$R_{0.25}$	1					
MWD	0.921 **	1				
SOC	0.792 *	0.728 *	1			
$I_{SOC_{0.25}}$	0.985 **	0.898 **	0.810 **	1		
WUE	0.727 *	0.729 *	0.772 *	0.717 *	1	
产量	0.063	-0.002	0.438	0.050	0.610	1

表 12 小麦产量、WUE 与各土层土壤水稳定性团聚体、有机碳的相关系数

Tab. 12 Correlation coefficients of wheat yield, WUE and soil water aggregate and organic carbon in different soil layers

	土层深度/cm	$R_{0.25}$	MWD	SOC	$I_{SOC_{0.25}}$
产量	0~10	-0.128	0.116	0.172	-0.045
	10~20	0.116	0.123	0.262	0.247
	20~35	0.736 *	0.409	0.224	0.732 *
	35~50	-0.383	-0.626	0.710 *	-0.427
WUE	0~10	0.626	0.802 *	0.323	0.715 *
	10~20	0.617	0.738 *	0.599	0.785 *
	20~35	-0.628	0.713 *	0.709 *	0.714 *
	35~50	0.188	0.013	0.840 *	0.147

3 讨论

3.1 种植方式和耕作措施对土壤团聚体的影响

土壤团聚体作为评价土壤结构质量的重要指标,其含量和稳定性能够直接影响土壤结构质量的优劣,并影响着土壤水分利用、养分运移和作物生长^[23-24]。本研究结果表明,不同种植方式和耕作措施下的各粒级团聚体在 0~50 cm 各土层表现出不同的分布趋势。从种植方式来看,小麦/玉米轮作下耕层土壤大于 0.25 mm 水稳性团聚体($R_{0.25}$)含量以及水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)高于小麦连作,说明小麦/玉米轮作比小麦连作更有利于耕层土壤水稳性团聚体形成,提高耕层土壤水稳性团聚体稳定性,这与李海波等^[25]研究结果一致。土壤团聚体受耕作影响较大,频繁的耕作阻碍团聚体的形成,降低土壤中大团聚体稳定性^[26]。侯贤清等^[27]研究发现,与连年翻耕相比,免耕与深松组合的隔年轮耕措施土壤中大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量增加显著;王勇等^[28]研究表明,免耕、深松等措施均可增加土壤大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量。本研究发现,连年免耕(NN)、连年深松(SS)以及免耕-深松(NS)轮耕处理主要增加了表层土壤(0~10 cm)水稳性团聚体的 $R_{0.25}$ 含量,这一方面是

因为 NN、SS、NS 耕作处理秸秆覆盖地表,增加了 0~10 cm 表层土壤有机物质输入,而有机质作为胶结剂促进团聚体形成,相关性分析(表 11)中 $R_{0.25}$ 与土壤有机碳含量呈显著正相关也进一步证明了这一点;另一方面是因为相对于翻耕(CC)处理,NN、NS 处理减少了机械对土壤的扰动,降低了耕作对土壤结构体的破坏。另外,无论是小麦连作,还是小麦/玉米轮作,NS 处理还对 35~50 cm 土层的 $R_{0.25}$ 含量有一定的增加作用,说明免耕-深松轮耕方式能够影响到更深层土壤结构的形成。

对各处理的土壤水稳定性团聚体的 MWD 进行比较时发现,在小麦连作下,连年免耕、连年深松、免耕-深松处理均增加了表层土壤(0~10 cm)水稳性团聚体的 MWD,而在小麦/玉米轮作下,各耕作处理的 MWD 表现出无明显规律,这可能是因为两种种植方式下的种植作物不一样,其作物根系生长及分泌物、作物还田秸秆的数量和质量、土壤微生物的差异导致的,有待进一步深入研究。

3.2 种植方式和耕作措施对土壤有机碳的影响

连续 9 年的定位试验表明,土壤有机碳含量受种植方式、耕作措施及两者的交互作用影响显著(表 8)。小麦/玉米轮作下土壤有机碳以及各粒级团聚体有机碳含量大多高于小麦连作下对应耕作处理,这主要是因为小麦/玉米轮作下玉米季还田的秸秆量较多,增加了农田土壤的有机物质输入。从耕作处理来看,与连年翻耕相比,连年免耕处理、连年深松处理均能显著增加 0~10 cm 土壤有机碳含量;免耕-深松处理则对 0~50 cm 各土层的有机碳含量均有增加作用,与李景等^[29]研究结果一致。土壤团聚体的形成与土壤有机碳密不可分,同时土壤团聚体对有机碳亦有保护作用^[30]。 $I_{SOC_{0.25}}$ 与 $R_{0.25}$ 、MWD、SOC 呈正相关也说明了土壤团聚体与有机碳之间的相互耦合关系(表 11)。相对于连年翻耕处理,连年免耕、连年深松、免耕-深松处理不但能提高表层(0~10 cm)土壤各粒级团聚体有机碳含量,对表层土壤大于 0.25 mm 大团聚体有机碳贡献率($I_{SOC_{0.25}}$)也有一定的增加作用。这是因为在连年免耕、连年深松、免耕-深松处理下秸秆覆盖于地表,增加了表层有机物质的输入,且土壤翻动小,降低了有机质的矿化,促进土壤表层有机碳含量的增加以及团聚体的形成,从而使表层土壤各粒级团聚体有机碳含量以及 $I_{SOC_{0.25}}$ 均有所增加;同时,由于连年免耕、连年深松、免耕-深松处理对土壤结构体破坏小,也进一步增加了对有机碳的保护作用。另外,免耕-深松处理对 35~50 cm 土层土壤各粒级团聚体有机碳含量以及 $I_{SOC_{0.25}}$ 也有增加作用,这可能是因为免

耕-深松处理的隔年深松耕作打破土壤犁底层,疏松底土,增加土壤透气性,促进作物根系生长发育,留下的根系残体较多,进而提高了深层土壤有机碳含量。

3.3 小麦产量和水分利用效率的变化及其与土壤性状的关系

本研究发现,与连年翻耕相比,免耕-深松处理可以显著提高小麦产量,且由相关性分析可知(表11),小麦产量与20~35 cm土层的 $R_{0.25}$ 、 $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ 呈显著正相关,并与35~50 cm土层的SOC呈显著正相关,表明在免耕-深松处理下,土壤结构稳定性提高,有机碳含量增加,使作物生长环境得到改善,小麦产量增加,这与ZHANG等^[31]研究结果一致。

在渭北旱塬地区水分短缺是制约农作物生长的重要因素,提高水分利用效率对作物增产有重要意义。通过相关分析发现,WUE与土壤水稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD呈显著正相关,且与0~10 cm、10~20 cm、20~35 cm土层的MWD也呈显著正相关,表明土壤结构体大小和稳定性是影响小麦WUE关键因素,且随着土壤水稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD的增加,土壤结构稳定性逐渐增强,提高了WUE。姬强等^[32]研究表明,有机碳的增加会促进提高土壤水分利用效率。本研究发现WUE与SOC、 $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ 呈显著正相关,并与0~10 cm、10~20 cm、20~35 cm土层的 $I_{\text{SOC}_{0.25}}$ 呈显著正相关,这表明有机碳的提高有利于促进提高土壤水分利用效率,且大于0.25 mm团聚体中的有机碳对作物的水分利用效率影响显著。在对比各处理的水分利用效率时,本研究发现,小麦/玉米轮作下水分利用效率高于小麦连作下对应耕作处理,这可能与小麦/玉米轮作下土壤有机碳含量较高,土壤结构相对较好,小麦生育期蓄水量较大

有关。相对于连年翻耕,免耕-深松处理的水分利用效率增加显著,这主要是因为免耕-深松处理下作物秸秆覆盖于土壤表层,减少了土壤水分的蒸发,增强了土壤蓄水能力,且隔年深松措施打破了犁底层,有利于增加土壤通透性,改善土壤结构,促进水分的传输,增强了土壤供给作物水分的能力,与前人研究结果一致^[33]。

4 结论

(1)9年的田间定位试验表明,在渭北高原黑垆土地地区,小麦/玉米轮作田耕层土壤大于0.25 mm水稳性大团聚体含量、水稳性大团聚体平均重量直径均高于小麦连作田,土壤结构更为稳定;且小麦/玉米轮作下土壤有机碳以及团聚体有机碳含量较高,更有利于土壤固碳。对比两种种植方式下的水分利用效率,小麦/玉米轮作下的水分利用效率也高于小麦连作方式。

(2)从耕作措施来看,相对于连年翻耕处理,连年免耕、连年深松处理主要增加了0~10 cm土层大于0.25 mm水稳性大团聚体含量、有机碳含量以及各粒级团聚体有机碳含量,并提高了表层土壤大于0.25 mm大团聚体有机碳贡献率。免耕-深松处理则均增加0~50 cm各土层的有机碳含量,且能提高0~10 cm和35~50 cm土壤 $R_{0.25}$ 、各粒级团聚体有机碳含量以及大于0.25 mm大团聚体有机碳贡献率。与连年翻耕处理相比,免耕-深松处理对小麦增产作用较大,且水分利用效率增加显著。综合来看,免耕-深松耕作不仅提高了土壤水稳性团聚体及有机碳的含量,且对提高小麦产量、水分利用效率也有显著效果,是该地区较适宜的耕作模式。

参 考 文 献

- [1] HUMBERTO B C, RATTAN L. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004, 23(6):481-504.
- [2] VERCHOT L V, DUTAUR L, SHEPHERD K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils[J]. Geoderma, 2011, 161(3):182-193.
- [3] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35):152-157.
ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao. Research process of the interaction mechanism between soil organic carbon and soil aggregate[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(35):152-157. (in Chinese)
- [4] MIKHA M M, VIGIL M F, BENJAMIN J G. Long-term tillage impacts on soil aggregation and carbon dynamics under wheat-fallow in the central great plains[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77:594-605.
- [5] CHEN Z, WANG H, LIU X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 165:121-127.
- [6] 陈宁宁, 李军, 吕薇, 等. 不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9):1102-1111.
CHEN Ningning, LI Jun, LÜ Wei, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei Highland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9):1102-1111. (in Chinese)

- [7] WANG Q, LU C, LI H, et al. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-year experiment on alkaline soils of Northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 137(3):43–49.
- [8] HONTORIA C, GOMEZ-PACARD C, MAEISCAL-SANCHO I, et al. Aggregate size distribution and associated organic C and N under different tillage systems and Ca-amendment in a degraded Ultisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160:42–52.
- [9] ZHANG Y, LI X, GREGORICH E G, et al. No-tillage with continuous maize cropping enhances soil aggregation and organic carbon storage in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2018, 330:204–211.
- [10] 张祥彩, 李洪文, 何进, 等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1):77–82, 71.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in Northern China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 1):77–82, 71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s115&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.015. (in Chinese)
- [11] 杨永辉, 武继承, 丁晋利, 等. 长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9):173–182.
YANG Yonghui, WU Jicheng, DING Jinli, et al. Effects of long-term no-tillage on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9):173–182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170922&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.022. (in Chinese)
- [12] DU Z, REN T, HU C, et al. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146(1):26–31.
- [13] ANDRUSCHKEWITSCH R, KOCH H J, LUDWIG B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites[J]. *Geoderma*, 2014, 217–218(3):57–64.
- [14] LIANG A Z, YANG X M, ZHANG X P, et al. Changes in soil organic carbon stocks under 10-year conservation tillage on a black soil in Northeast China[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(8):1425–1436.
- [15] 金雯晖, 杨劲松, 侯晓静, 等. 轮作模式对滩涂土壤有机碳及团聚体的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(6):1195–1201.
JIN Wenhui, YANG Jinsong, HOU Xiaojing, et al. Effects of rotation systems on soil organic carbon and aggregates in light salinized farmland in North Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2016, 48(6):1195–1201. (in Chinese)
- [16] 魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 等. 黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2):305–313.
WEI Yanchun, MA Tiane, WEI Xiaorong, et al. Effects of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):305–313. (in Chinese)
- [17] LI Z, LAI X, YANG Q, et al. In search of long-term sustainable tillage and straw mulching practices for a maize-winter wheat-soybean rotation system in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217:199–210.
- [18] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1):46–50.
LI Yuyuan, SHAO Ming'an. Impact of tillage on water transformation and runoff-sediment-yielding characteristics on slope land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1):46–50. (in Chinese)
- [19] 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):106–113.
LI Rong, WANG Min, JIA Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2):106–113. (in Chinese)
- [20] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014(12):4695–4704.
LI Jianlin, JIANG Changsheng, HAO Qingju. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2014(12):4695–4704. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–34.
- [22] 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.
TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22):7116–7124. (in Chinese)
- [23] BISSONNAIS Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 48(1):39–48.
- [24] CAI L Q, PENG Q I, ZHANG R Z. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two sequence rotation system with spring wheat and field pea[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2008, 22(2):141–145.
- [25] 李海波, 韩晓增, 许艳丽, 等. 不同管理方式对黑土农田根际土壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2008,

22(3):110-115.

LI Haibo, HAN Xiaozeng, XU Yanli, et al. Aggregate stability of rhizosphere soil as affected by land management in black soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3):110-115. (in Chinese)

- [26] PAUSTIAN K, SIX J, ELLIOTT E T, et al. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 147-163.
- [27] 侯贤清, 李荣, 贾志宽, 等. 西北旱作农田不同耕作模式对土壤性状及小麦产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5):1146-1157.
- HOU Xianqing, LI Rong, JIA Zhikuan, et al. Effects of different tillage practices on soil properties and wheat yields in dry farmland of Northwest China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5):1146-1157. (in Chinese)
- [28] 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.
- WANG Yong, JI Qiang, LIU Shuai, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7):1365-1373. (in Chinese)
- [29] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 15年保护性耕作对黄土坡耕地区土壤及团聚体固碳效应的影响 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4690-4697.
- LI Jing, WU Huijun, WU Xueping, et al. Effects of 15-year conservation tillage on soil and aggregate organic carbon sequestration in the Loess Hilly Region of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4690-4697. (in Chinese)
- [30] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts [J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81(2):253-263.
- [31] ZHANG Y, WANG R, WANG S, et al. Effects of different sub-soiling frequencies incorporated into no-tillage systems on soil properties and crop yield in dry land wheat-maize rotation system [J]. *Field Crops Research*, 2017, 209:151-158.
- [32] 姬强, 孙汉印, TARAQI A K, 等. 不同耕作措施对冬小麦-夏玉米复种连作系统土壤有机碳和水分利用效率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4):1029-1035.
- JI Qiang, SUN Hanyin, TARAQI A K, et al. Impact of different tillage practices on soil organic carbon and water use efficiency under continuous wheat maize binary cropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1029-1035. (in Chinese)
- [33] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土壤水分效应长周期模拟研究 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(14):2730-2746.
- ZHANG Yujiao, LI Jun, GUO Zheng, et al. Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei Highland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(14):2730-2746. (in Chinese)