

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.013

田琨, 杨彩红, 吴建东, 等. 免耕对不同麦玉轮作农田土壤碳组分及理化性质的影响. 土壤, 2024, 56(2): 342–349.

免耕对不同麦玉轮作农田土壤碳组分及理化性质的影响^①

田琨^{1,2}, 杨彩红^{1*}, 吴建东², 李艳翠², 刘育秉², 姜晓敏¹, 崔文强¹

(1 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000)

摘要: 为探讨耕作及轮作方式对农田土壤理化性质和碳组分的影响, 设置免耕和传统耕作 2 种耕作方式, 以及小麦-玉米轮作、小麦/玉米间作、小麦-冬油菜-玉米轮作 3 种植模式共 6 个处理进行试验。结果表明: 与传统耕作相比, 免耕增加了 0~5、5~20 cm 土层全氮、全磷、速效磷和水分含量, 降低了土壤 pH 和容重。免耕小麦/玉米间作(NT.W1/NT.WM.1)处理的土壤容重、含水量、全氮、全磷含量高于免耕小麦-玉米-冬油菜轮作(NT.WRM3)和免耕小麦-玉米轮作(NT.WM5)处理, 在不同土层间, 土壤全氮、全磷和速效磷含量随着土层深度的增加而降低。土壤碳组分含量总体表现为免耕处理高于传统耕作处理, 在 0~5 cm 土层免耕处理土壤有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳含量较相应传统耕作处理分别增加了 1.31%~36.57%、2.07%~35.22%、2.38%~4.78%、2.08%~11.68%, 在 5~20 cm 土层免耕处理土壤有机碳和微生物生物量碳含量高于传统耕作处理。在不同免耕处理下, 土壤有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量在 0~5、5~20 cm 土层总体表现为 NT.WM5 处理高于其他免耕处理。相关性分析表明, 土壤有机碳、微生物生物量碳和速效磷含量呈极显著正相关, 容重和有机碳含量呈极显著负相关。综上, 免耕小麦/玉米间作利于改善土壤理化性质, 免耕小麦-玉米轮作有利于提高土壤有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量。

关键词: 免耕; 土壤碳组分; 土壤理化性质; 轮作方式

中图分类号: S513; S565.1 **文献标志码:** A

Effects of No-till on Soil Carbon Components and Physicochemical Properties Under Different Wheat-Maize Rotation Fields

TIAN Kun^{1,2}, YANG Caihong^{1*}, WU Jiandong², LI Yancui², LIU Yubing², JIANG Xiaomin¹, CUI Wenqiang¹

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Hydraulic Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of tillage and crop rotation on soil physicochemical properties and carbon components, an field experiment was conducted, in which two tillage modes (no-tillage and traditional tillage) and three planting modes (wheat-maize rotation, wheat/maize intercropping, wheat-winter rapeseed-maize rotation) were designed. The results showed that compared with traditional tillage, no-tillage increased total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and water content in 0–5 and 5–20 cm soil layer, but decreased soil pH and bulk density. Soil bulk density, water content, total nitrogen and total phosphorus under no-tillage and wheat/corn intercropping (NT.W1/NT.WM.1) were higher than those under no-tillage and wheat-corn-winter rapeseed rotation (NT.WRM3) and no-tillage and wheat-corn rotation (NT.WM5). The contents of total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus decreased with the increase of soil depth. Soil carbon content under no-tillage treatment was higher than that under traditional tillage treatment. Compared with traditional tillage treatment, the contents of soil organic carbon, particulate organic carbon, soluble organic carbon and microbial biomass carbon in 0–5 cm soil layer were increased by 1.31%–36.57%, 2.07%–35.22%, 2.38%–4.78% and 2.08%–11.68%, respectively. The contents of soil organic carbon and microbial biomass carbon under no-tillage treatment in 5–20 cm soil layer were higher than those under traditional tillage treatment. Under different no-tillage treatments, the contents of soil organic carbon, particulate organic carbon and microbial biomass carbon in 0–5 and 5–20 cm soil layers under NT.WM5 were higher than those in other no-tillage

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41561062)、甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2021-12)、甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA014)和甘肃省水利科学实验研究及技术推广项目(23GSLK018)资助。

* 通讯作者(84867024@qq.com)

作者简介: 田琨(1994—), 男, 甘肃定西人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 781282992@qq.com

treatments. Correlation analysis showed that soil organic carbon, microbial biomass carbon and available phosphorus were positively correlated, while bulk density and organic carbon content were negatively correlated. In conclusion, no-tillage and wheat/maize intercropping can improve soil physicochemical properties, and no-tillage and wheat-maize rotation can increase soil organic carbon, particulate organic carbon and microbial biomass carbon content.

Key words: No-tillage; Soil carbon component; Physical and chemical properties of soil; Crop rotation pattern

近年来,我国对粮食需求的总量不断增加,为了确保粮食安全,改善耕地质量成为农业工作的重点。长期的传统耕作会破坏土壤结构,降低土壤肥力和有机碳含量,提高土壤有机质的分解和转化,使土壤微生物结构多样性降低,造成土壤侵蚀和土壤质量降低等一系列问题^[1]。少免耕等保护性耕作有利于提升土壤有机碳含量,改善土壤理化性质,进而提高作物产量^[2],同时,还会减少土壤侵蚀,提高土壤质量和土地生产力。大量研究表明,少免耕减少了土壤扰动,降低了地表蒸发量,从而提高了土壤水分,降低了水土流失,改善了土壤结构^[3],通过少动土、少裸露实现了保土、保肥、节水和稳产^[4]。长期连作会导致土壤质量和生物多样性下降^[5],间作和轮作可改善连作障碍^[6],为作物生长提供良好的生长环境^[7]。轮作和间作较连作改善土壤质量,在农田土壤中起到保持土壤肥力和防止水土流失的重要作用^[8]。

土壤碳组分是土壤重要的组成部分,是评价农田生态环境和土壤肥力的核心因子^[9],在维持土壤肥力、作物产量以及维护农田生态环境等方面均起重要作用。在农田系统中,土壤碳组分含量不是由单一因素决定的,而是由不同的自然环境、土壤耕作方式、土壤类型以及种植模式等多方面综合决定的^[10]。耕作方式和种植模式的不同,会改变土壤温度和湿度以及进入土壤中的肥料和植物残体的数量,从而影响土壤中养分的矿化、运输、吸收和利用,改变土壤理化性质,进而影响土壤微生物碳含量。有研究认为,免耕是农田土壤碳截存最有效的措施之一^[11-12]。但也有研究认为,免耕只是改变了碳在土层中的分布,使其在表层富集,对土壤碳截存并无作用^[13-14]。薛建福等^[15]研究表明,土壤表层有机碳在保护性耕作下能够显著增加。Guo 等^[16]研究表明,相比翻耕,免耕能够提高土壤可溶性碳和微生物生物量碳含量。目前,已有大量保护性耕作对农田土壤有机碳的影响研究,很多学者开始将保护性耕作对土壤碳组分的研究作为研究热点。

本研究以 2016 年开始的长期保护性耕作定位试验为平台,研究免耕与不同种植模式耦合对农田土壤理化性质和碳组分的影响,以探索适宜当地生产和生态环境的耕作方式和种植模式的组合,进而为西北旱

区制定合理的种植模式和土壤耕作制度提供相应的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学校地联合绿洲农业科研教学基地进行。该基地位于河西走廊东端(37°96'N, 102°64'E),属典型的内陆荒漠季风气候,具有干旱少雨、日照充足、昼夜温差大等特点,平均海拔 1 506 m,多年平均气温约 7.2 °C,多年平均降水量 156 mm,多年平均无霜期 156 d,年均蒸发量约 2 400 mm,年太阳辐射总量 504~630 kJ/cm²。试区土壤为厚层灌漠土,土壤容重为 1.57 g/cm³,耕层土壤有机质含量为 14.62 g/kg,全氮、全磷含量分别为 0.74 g/kg、1.31 g/kg,起沙风 7.9 m/s^[17]。

1.2 试验设计

试验始于 2016 年 3 月,设置大田裂区试验,主因素为免耕和传统耕作 2 种耕作方式,副因素为玉米/小麦间作、玉米-小麦轮作、麦后插种冬油菜还田玉米轮作 3 种种植方式,共 6 个处理,如表 1 所示。每个处理 3 个重复,共 18 个小区,小区面积为 10 m×11 m。2021 年作物种植基本概况如表 2 所示。

1.3 土样采集

于 2021 年 9 月作物成熟期,在各试验小区采用“S”形 5 点法分别采集 0~5、5~20 cm 耕层土样,其中小麦/玉米间作处理分别在各样带采集土样。采集的土样用 7 号自封袋分装带回实验室,在室内风干且去除杂质,研磨过 0.25 mm 筛用于土壤理化性质和土壤碳组分含量的测定。

1.4 测定项目及方法

土壤含水率采用铝盒烘干法测定;pH 采用电位法测定;容重采用环刀法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法测定;速效磷采用钼锑抗比色法测定,有机碳采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化外加热法测定^[18];颗粒有机碳参照 Cambardella 和 Elliott^[19]的方法测定;水溶性有机碳参照蒋友如等^[20]的方法测定;重组有机碳参照赵靖静等^[21]的方法测定;微生物生物量碳参照林启美等^[22]的方法测定。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

耕作方式	处理代号	种植模式			
		2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
留 30 cm 茬、覆盖免耕	NT.W1/NT.WM.1	小麦/玉米	小麦/玉米	小麦/玉米	小麦/玉米
	NT.WRM3	小麦-冬油菜	玉米	小麦-冬油菜	玉米
	NT.WM5	小麦	玉米	小麦	玉米
传统耕作	CT.W2/CT.WM.2	小麦/玉米	小麦/玉米	小麦/玉米	小麦/玉米
	CT.WRM4	小麦-冬油菜	玉米	小麦-冬油菜	玉米
	CT.WM6	小麦	玉米	小麦	玉米

注: NT.W1/NT.WM.1: 免耕小麦/玉米间作; NT.WRM3: 免耕小麦-玉米-冬油菜轮作; NT.WM5: 免耕小麦-玉米轮作; CT.W2/CT.WM.2 传统耕作小麦/玉米间作; CT.WRM4 传统耕作小麦-玉米-冬油菜轮作; CT.WM6 传统耕作小麦-玉米轮作。

表 2 2021 年作物种植基本概况
Table 2 Basic overview of crop planting in 2021

种植作物	播种日期	种植品种	种植密度		施肥	灌溉方式
			单作	间作		
玉米	4 月 17 日	先玉 335	8.25 万株/hm ²	5.25 万株/hm ² , 带宽 1.40 m, 株距 0.24 m, 行距 0.4 m, 共 3 行	纯 P 180 kg/hm ² , 全作基肥; 施纯 N 360 kg/hm ² , 按播前: 大喇叭口期: 拔节期=3:6:1 分施	均采用滴灌灌溉模式
小麦	3 月 18 日	宁春 4 号	675 万粒/hm ²	375 万粒/hm ² , 带宽 0.8 m, 行间距 0.12 m, 共 6 行	纯 P 90 kg/hm ² , 施纯 N 180 kg/hm ² , 全作基肥	
冬油菜	8 月 16 日	陇油 6 号	开沟条播, 播深 4 cm 左右, 行距 20 cm, 株距 10 cm, 播后及时沿播种沟镇压保墒, 此后常规管理, 不计产, 下季作物播种前收获冬油菜, 直接将冬油菜翻耕还田		施纯 N 225 kg/hm ²	

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2019 进行表格与图的制作, SPSS 25.0 进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对土壤理化性质的影响

由表 3 可知, 与传统耕作处理相比, 免耕处理降低了 0~5 cm 土层的 pH, 其中, CT.WM6 与 NT.WM.1 和 NT.WRM3 处理间差异显著($P<0.05$)。在 5~20 cm 土层, NT.WM.1 和 NT.WM5 处理较相应的传统耕作处理 CT.WM.2 和 CT.WM6 均增加了土壤 pH, 且土壤 pH 随着土层的加深而增加。土壤含水率在不同处理间均表现为免耕处理大于传统耕作处理。与传统耕作处理相比, 免耕处理显著降低了土壤容重。NT.WM5 处理 0~5、5~20 cm 土层土壤容重在各处理中最小, 与 NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3 处理相比, 分别降低了 9.66%、5.07%、5.76% 和 8.00%、6.12%、2.82%。且在不同耕作处理下土壤容重随着土层的

加深而增加。

由表 4 可知, 在 0~5 cm 土层, 免耕处理较传统耕作处理土壤全氮含量有所提高, NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 处理土壤全氮含量较相应传统耕作处理 CT.W2、CT.WM.2、CT.WRM4、CT.WM6 增加了 17.22%、3.82%、33.04%、31.58%; 且随着土层深度的增加, 土壤全氮含量降低。在 0~5、5~20 cm 土层, NT.W1 处理土壤全磷含量较 NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 处理分别增加了 35.79%、21.70%、24.04% 和 29.47%、6.03%、20.59%。在各处理间, 除 CT.WM6 处理 0~5 cm 土层土壤速效磷含量高于 NT.WM5 处理外, 其他处理均表现出免耕处理大于传统耕作处理。除 NT.WM.1 和 CT.WM.2 处理外, 土壤速效磷含量均随着土层深度的增加而降低。

2.2 耕作方式对土壤碳组分的影响

2.2.1 耕作方式对土壤有机碳的影响 由图 1 可知, 与传统耕作处理相比, 免耕处理提高了土壤有

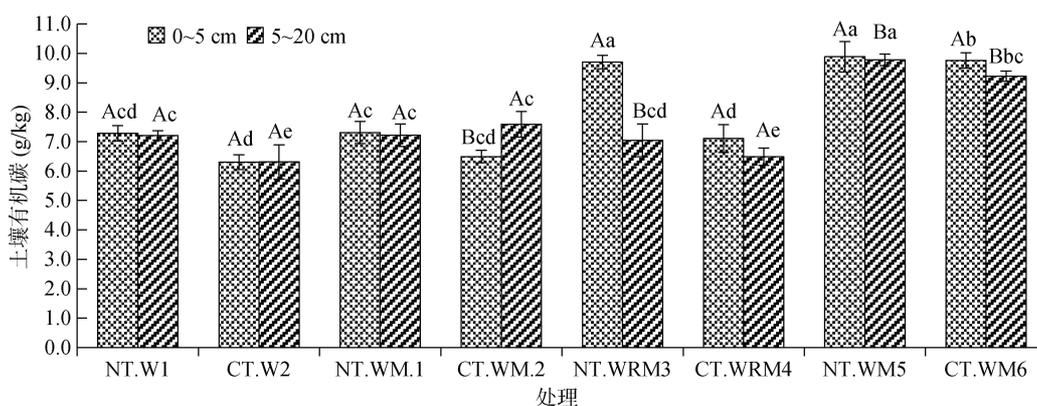
表 3 不同处理对土壤 pH、含水率以及容重的影响
Table 3 Effects of different treatments on soil pH, water content and bulk density

处理	0 ~ 5 cm			5 ~ 20 cm		
	pH	含水率(%)	容重(g/cm ³)	pH	含水率(%)	容重(g/cm ³)
NT.W1	8.35 abc	8.71 ± 0.40 a	1.45 ± 0.06 ab	8.41 cd	9.11 ± 0.32 a	1.50 ± 0.02 a
NT.WM.1	8.11 d	8.63 ± 0.24 a	1.38 ± 0.03 ab	8.43 cd	9.49 ± 0.35 a	1.47 ± 0.02 a
NT.WRM3	8.25 c	6.49 ± 0.47 c	1.39 ± 0.07 ab	8.60 abc	8.21 ± 0.25 b	1.42 ± 0.15 a
NT.WM5	8.31 bc	8.03 ± 0.48 ab	1.31 ± 0.06 ab	8.80 a	8.22 ± 0.43 b	1.38 ± 0.17 a
CT.W2	8.41 ab	8.08 ± 0.79 ab	1.48 ± 0.03 a	8.54 bcd	8.14 ± 0.09 b	1.51 ± 0.04 a
CT.WM.2	8.26 c	8.39 ± 0.41 a	1.45 ± 0.01 ab	8.32 d	9.18 ± 0.44 a	1.52 ± 0.02 a
CT.WRM4	8.43 ab	5.29 ± 0.14 d	1.40 ± 0.04 ab	8.77 a	7.12 ± 0.31 c	1.44 ± 0.07 a
CT.WM6	8.46 a	7.28 ± 0.44 bc	1.36 ± 0.17 ab	8.72 abc	7.91 ± 0.38 b	1.41 ± 0.03 a

注：NT.W1：免耕小麦/玉米间作小麦地取样，NT.WM.1：免耕小麦/玉米间作玉米地取样；CT.W2：传统耕作小麦/玉米间作小麦地取样，CT.WM.2：传统耕作小麦/玉米间作玉米地取样；同列不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平(P<0.05)，下同。

表 4 不同处理对土壤全氮、全磷、速效磷的影响
Table 4 Effects of different treatments on soil total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus

处理	0 ~ 5 cm			5 ~ 20 cm		
	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	速效磷(mg/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	速效磷(mg/kg)
NT.W1	0.59 ± 0.04 a	0.43 ± 0.03 a	123.38 ± 2.45 d	0.46 ± 0.05 a	0.41 ± 0.05 a	93.53 ± 1.10 f
NT.WM.1	0.54 ± 0.02 abc	0.32 ± 0.06 c	119.64 ± 0.94 e	0.38 ± 0.09 a	0.32 ± 0.01 ab	119.87 ± 1.62 c
NT.WRM3	0.50 ± 0.11 bc	0.35 ± 0.02 bc	222.26 ± 0.77 a	0.37 ± 0.05 a	0.39 ± 0.03 a	125.11 ± 1.67 b
NT.WM5	0.50 ± 0.23 bc	0.35 ± 0.06 c	152.89 ± 0.75 c	0.39 ± 0.05 a	0.34 ± 0.15 ab	138.95 ± 1.55 a
CT.W2	0.50 ± 0.02 bc	0.42 ± 0.01 ab	119.84 ± 1.21 e	0.31 ± 0.18 a	0.40 ± 0.12 a	93.19 ± 1.14 f
CT.WM.2	0.52 ± 0.03 abc	0.36 ± 0.04 bc	97.77 ± 0.95 f	0.41 ± 0.08 a	0.28 ± 0.03 ab	105.48 ± 0.95 e
CT.WRM4	0.37 ± 0.02 c	0.32 ± 0.30 c	162.29 ± 2.26 b	0.45 ± 0.06 a	0.37 ± 0.02 ab	110.59 ± 1.44 d
CT.WM6	0.38 ± 0.03 c	0.29 ± 0.01 c	154.39 ± 1.73 c	0.35 ± 0.02 a	0.24 ± 0.03 b	122.80 ± 1.34 c



(柱图上方不同大写字母表示同一处理不同土层间差异达到显著水平(P<0.05)，不同小写字母表示同一土层不同处理间差异达到显著水平(P<0.05)，下同)

图 1 不同处理对土壤有机碳含量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil organic carbon

机碳含量，但各免耕处理有机碳含量变化不一致。在 0 ~ 5 cm 土层，免耕处理 NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 土壤有机碳含量较相应传统耕作处理 CT.W2、CT.WM.2、CT.WRM4、CT.WM6 分别增加了 15.56%、12.61%、36.57%、1.31%。在免耕

处理下，各种植方式处理土壤有机碳含量表现出差异性，其中，NT.WM5 处理在 0 ~ 5、5 ~ 20 cm 土层有机碳含量均高于其他免耕处理，较 NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3 处理分别增加了 35.68%、35.17%、1.06% 和 35.73%、35.46%、38.82%。免耕处理下，土壤有机碳

含量随土壤深度的增加而降低。

2.2.2 耕作方式对土壤可溶性有机碳和重组有机碳的影响 如图 2 所示, 与传统耕作处理相比, 免耕耕作处理土壤可溶有机碳含量和重组有机碳含量在 0 ~ 5 cm 土层有所提高, 但各处理间有所差异。在 0 ~ 5 cm 土层, 免耕处理 NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 土壤可溶性有机碳含量和重组有机碳含量较相应传统耕作处理 CT.W2、CT.WM.2、CT.WRM4、CT.WM6 分别增加了 2.63%、2.38%、4.20%、4.78% 和 15.06%、10.63%、11.05%、1.75%。

免耕处理下, NT.W1 处理在 0 ~ 5 cm 土层土壤可溶性有机碳较 NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 处理分别增加了 11.08%、19.58%、32.33%。土壤可溶性有机碳除 CT.WM.2 处理表现出 5 ~ 20 cm 土层高于 0 ~ 5 cm 土层外, 其他处理均表现出土壤可溶性有机碳含量随土壤深度的增加而降低。土壤重组有机碳含量在 0 ~ 5、5 ~ 20 cm 土层均表现出 NT.WRM3>NT.W1>NT.WM5>NT.WM.1。不同处理土壤重组有机碳含量随

土壤深度的增加而降低。

2.2.3 耕作方式对土壤颗粒有机碳和微生物生物量碳的影响 不同处理土壤颗粒有机碳和微生物生物量碳含量如图 3 所示。与传统耕作处理相比, 免耕处理增加了土壤 0 ~ 5 cm 土层颗粒有机碳和微生物生物量碳含量, 但各处理间颗粒有机碳含量变化不同, 其总体表现为免耕处理 NT.W1、NT.WM.1、NT.WRM3、NT.WM5 土壤颗粒有机碳和微生物生物量碳含量较相应传统耕作处理 CT.W2、CT.WM.2、CT.WRM4、CT.WM6 分别增加了 27.79%、2.07%、35.22%、35.22% 和 2.08%、11.68%、8.17%、5.43%。在 5 ~ 20 cm 土层, NT.W1 和 NT.WM5 处理土壤颗粒有机碳含量较 CT.W2 和 CT.WM6 处理分别降低了 2.59%、17.48%, 其他处理均表现出免耕处理大于传统耕作处理; 除 NT.W1 处理土壤微生物生物量碳含量小于 CT.W2 处理外, 其他处理表现为免耕大于传统耕作处理。在免耕耕作处理下, 土壤微生物生物量碳含量在 5 ~ 20 cm 土层中均表现为 NT.WM5>NT.WRM3>NT.WM.1>

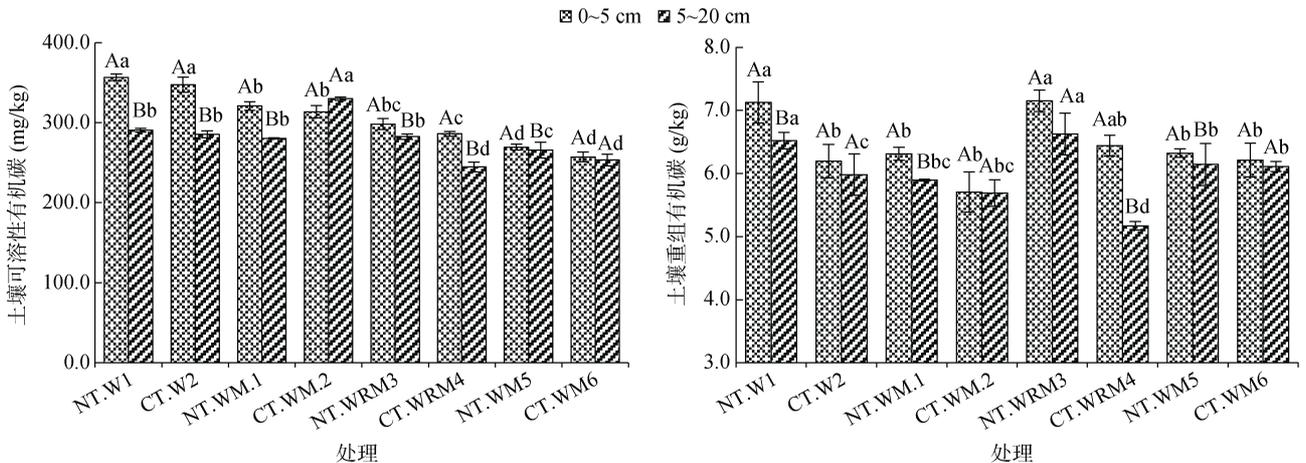


图 2 不同处理对土壤可溶性有机碳和重组有机碳的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on soil soluble carbon and recombinant organic carbon

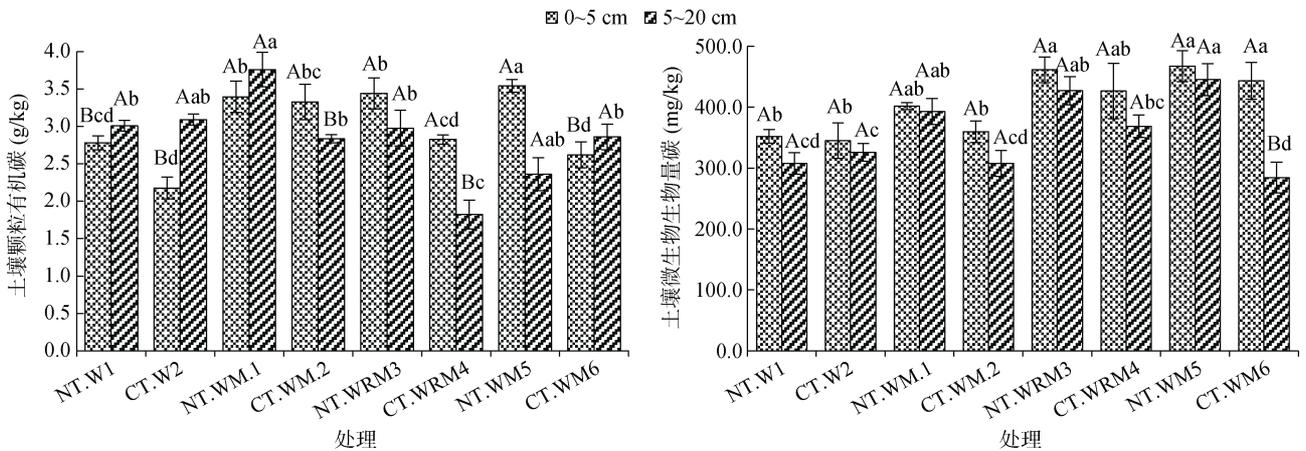


图 3 不同处理对土壤颗粒有机碳和微生物生物量碳的影响
Fig. 3 Effects of different treatments on soil particulate organic carbon and microbial biomass carbon

NT.W1。不同处理土壤微生物生物量碳含量均随着土层深度的增加而降低。

2.3 土壤理化性质与土壤碳组分的关系

本研究对土壤理化性质与土壤碳组分进行了相关性分析, 结果如表 5 所示。土壤有机碳与容重、全磷呈极显著负相关, 与速效磷呈极显著正相关。土壤

可溶性有机碳与土壤 pH 呈极显著负相关, 与容重、全氮、全磷呈显著正相关。土壤颗粒有机碳与速效磷呈极显著正相关, 与 pH 呈显著负相关。土壤重组有机碳、速效磷和可溶性有机碳呈极显著正相关。土壤微生物生物量碳与含水率、容重呈极显著负相关, 与速效磷呈极显著正相关。

表 5 土壤理化性质与土壤碳组分的相关性
Table 5 Correlations between soil physicochemical properties and carbon components

	pH	含水率	容重	全氮	全磷	速效磷	有机碳	可溶性有机碳	颗粒有机碳	重组有机碳	微生物生物量碳
pH	1										
含水率	-0.096	1									
容重	-0.048	0.344*	1								
全氮	-0.434**	0.104	-0.09	1							
全磷	0.011	0.060	0.315*	0.250	1						
速效磷	-0.149	-0.624**	-0.419**	0.116	-0.149	1					
有机碳	0.093	-0.242	-0.456**	-0.051	-0.447**	0.625**	1				
可溶性有机碳	-0.444**	0.259	0.307*	0.293*	0.326*	-0.117	-0.389**	1			
颗粒有机碳	-0.356*	-0.037	-0.169	-0.080	-0.164	0.426**	0.396**	0.044	1		
重组有机碳	-0.027	-0.079	-0.221	0.036	0.011	0.449**	0.395**	0.423**	0.285*	1	
微生物生物量碳	-0.095	-0.376**	-0.446**	0.230	-0.062	0.634**	0.305*	-0.179	0.262	0.201	1

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 耕作方式对土壤理化性质的综合影响

少免耕等保护性耕作措施可以通过减少土壤的人为扰动来保持良好的土壤结构, 是以保证作物产量为前提、提高土壤持续生产力为主要目的的一种耕作措施。刘敏等^[23]研究发现, 免耕比传统翻耕处理降低了表层土壤容重。本试验结果表明, 不同处理间 0~5、5~20 cm 土层土壤容重变化不同, 其中, 与传统耕作相比, 免耕下各种植方式处理降低了土壤容重, 这与李友军等^[24]的研究结果相同。本研究中, 免耕显著增加 0~5、5~20 cm 土层的土壤含水量, 说明免耕耕作的保水能力要高于传统耕作。大量研究表明, 免耕能够减少表层水分蒸发, 进而增加土壤含水量, 减少土壤侵蚀^[25]。不同条件下土壤 pH 的稳定有利于作物的生长, 土壤 pH 对土壤养分有重要的影响。本研究表明, 土壤 pH 总体表现为免耕处理低于传统耕作处理, 且随着土层的加深土壤 pH 也发生着不同的变化。王根林^[26]研究表明, 免耕处理土壤 pH 低于传统耕作处理, 与本研究结果一致。

土壤理化性质随着耕作方式的不同而有所变化, 免耕相对于其他传统耕作方式对土壤养分具有显著的

影响。许多研究表明, 免耕能够促进氮、磷、钾等元素在土壤表层的富集, 而对亚表层土壤影响较小。肖剑英等^[27]研究结果表明, 免耕可以提高农田土壤全氮、全磷、速效磷、速效氮的含量, 而对全钾和速效钾的增加不显著。杨云马等^[28]研究发现, 免耕能够增加麦田土壤速效磷含量, 但是不利于磷素移动, 因此, 增加了磷素在土壤表层的聚集。康轩等^[29]研究结果表明, 免耕有利于提高表层土壤肥力, 土壤中全氮、全磷、全钾含量都有不同程度的提高, 且差异均达到了极显著水平。本研究表明, 免耕处理较传统耕作处理更有利于增加土壤全氮和全磷含量, 且随着土层的加深均有所降低, 与上述研究结果基本一致。

3.2 耕作方式对土壤碳组分的综合影响

土壤有机碳是衡量土壤质量、保证土地可持续利用的物质基础。免耕和种植模式耦合对土壤有机碳含量的变化有着不同的影响。丁晋利^[30]研究表明, 免耕等保护性耕作有利于提高农田表层土壤有机碳储量。本研究表明, 免耕较传统耕作处理能够显著增加土壤有机碳含量, 其中 NT.WRM3 和 NT.WM5 处理较其他处理更有利于提高土壤有机碳含量。魏燕华等^[31]研究也表明, 耕作措施不同能够改变农田土壤有机碳含量的分布, 免耕可以增加农田土壤表层有机碳含量,

降低农田土壤亚表层有机碳含量。李景^[32]的研究也表明,免耕覆盖显著提高 0~20 cm 土层可溶性有机碳的含量。本研究中,土壤可溶性有机碳含量总体表现为免耕高于传统耕作,NT.W1 处理与其他处理相比更有利于增加可溶性有机碳含量。不同耕作措施对土壤颗粒有机碳有不同影响,李位波^[33]研究表明,与传统耕作相比,以免耕为主的保护性耕作均使土壤颗粒有机碳含量增加。孟凡乔等^[34]研究表明,免耕等保护性耕作能够显著增加土壤表层的颗粒有机碳含量。本研究中,免耕较传统耕作更有利于增加土壤表层颗粒有机碳含量,而随着土层的加深颗粒有机碳含量表现出不同的变化规律,NT.WM5 和 NT.WRM3 处理更有利于增加土壤颗粒有机碳含量。黄雅楠等^[35]研究发现,土壤重组有机碳是土壤总有机碳的重要组成部分,免耕与其他耕作方式相比能够显著增加土壤重组有机碳含量,使其在土壤表层富集,本研究结果与之一致,且 NT.WRM3 处理在 2021 年度与其他处理相比显著增加了重组有机碳的含量。大量研究表明,长期免耕耕作有利于增加土壤表层微生物生物量碳,而随土壤深度的增加而降低^[36]。徐阳春等^[37]研究发现,与传统耕作相比,免耕处理土壤微生物生物量碳在 0~5 cm 土层显著增高。本研究也发现,NT.WM5 处理与其他处理相比,更有利于增加 0~5 cm 土层土壤微生物生物量碳含量。

4 结论

1) 与传统耕作相比,免耕增加了 0~5、5~20 cm 土层全氮、全磷、速效磷含量和含水率,而降低了土壤的 pH 和容重。

2) 在不同种植模式之间,免耕小麦/玉米间作(NT.W1/NT.WM.1)处理较其他处理更有利于提高土壤容重、含水率、全氮、全磷和速效磷含量,且随着土层深度的增加,土壤全氮、全磷和速效磷含量逐渐降低。

3) 本研究中,土壤有机碳、可溶性有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量总体表现为免耕处理高于传统耕作处理;免耕处理下,土壤有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量在 0~5、5~20 cm 土层表现为 NT.WM5>NT.WRM3>NT.W1/NT.WM.1, NT.WRM3 处理土壤重组有机碳含量在 0~5、5~20 cm 土层均高于其他处理。

4) 相关性分析表明,有机碳、微生物生物量碳和速效磷呈极显著正相关,容重和有机碳呈极显著负相关。

参考文献:

- [1] 郭梨锦. 免耕与秸秆还田对稻麦种植系统土壤有机碳库与微生物多样性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [2] 周子军, 郭松, 陈琨, 等. 长期秸秆覆盖对免耕稻-麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1148-1159.
- [3] 刘玲玲, 李超, 房焕, 等. 免耕对稻油轮作系统土壤结构的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 412-420.
- [4] 杨玥. 旱地保护性耕作对土壤水肥特征与作物产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [5] 马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J]. 土壤, 2023, 55(1): 205-210.
- [6] 程亮, 贾振东, 黄慧, 等. 花生/玉米间作对花生生长发育的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(6): 30-32.
- [7] 王洪预. 东北春玉米不同种植模式比较研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [8] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 161-167.
- [9] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
- [10] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1275-1285.
- [11] Carvalho J L N, Cerri C E P, Feigl B J, et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado Region of the Brazilian Amazon[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 342-349.
- [12] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(2): 237-245.
- [13] Yang X M, Drury C F, Wander M M, et al. Evaluating the effect of tillage on carbon sequestration using the minimum detectable difference Concept¹[J]. Pedosphere, 2008, 18(4): 421-430.
- [14] Hermle S, Anken T, Leifeld J, et al. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 94-105.
- [15] 薛建福, 赵鑫, Dikgwatthe S B, 等. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6006-6013.
- [16] Guo L J, Zhang Z S, Wang D D, et al. Effects of short-term conservation management practices on soil organic carbon fractions and microbial community composition under a rice-wheat rotation system[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(1): 65-75.
- [17] 田琨, 杨彩红. 免耕对不同麦玉轮作方式土壤真菌群落结构的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 142-148.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.

- [20] 蒋友如, 盛浩, 王翠红, 等. 湘东丘陵区4种林地深层土壤溶解性有机碳的数量和光谱特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(3): 61-67.
- [21] 赵靖静, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 陇中黄土高原不同草田轮作模式土壤碳组分的差异研究[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 58-67.
- [22] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 生态学杂志, 1999, 18(2): 63-66.
- [23] 刘敏, 赵财, 范虹, 等. 长期间作及免耕对土壤物理性状及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(2): 28-35.
- [24] 李友军, 黄明, 吴金芝, 等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 42-45, 101.
- [25] 王筋, 王树楼, 丁玉川等. 旱地玉米免耕整秸秆覆盖土壤养分、结构和生物研究[J]. 山西农业科学, 1994, (3): 17-19.
- [26] 王根林. 不同耕作措施对白浆土 pH 值变化影响[J]. 黑龙江农业科学, 2006(1): 37-38, 44.
- [27] 肖剑英, 张磊, 谢德体, 等. 长期免耕稻田的土壤微生物与肥力关系研究[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(1): 82-85.
- [28] 杨云马, 贾树龙, 孟春香. 免耕麦田土壤速效养分含量动态研究[J]. 河北农业科学, 2005, 9(3): 25-28.
- [29] 康轩, 黄景, 吕巨智, 等. 保护性耕作对土壤养分及有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2339-2343.
- [30] 丁晋利. 保护性耕作农田土壤水碳氮演变特征及模型模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [31] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87-95.
- [32] 李景. 长期耕作对土壤团聚体有机碳及微生物多样性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [33] 李位波. 不同耕作方式下秸秆还田对川中丘陵区土壤理化性质及有机碳组分的影响研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
- [34] 孟凡乔, 况星, 张轩, 等. 土地利用方式和栽培措施对农田土壤不同组分有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2512-2519.
- [35] 黄雅楠, 黄丽, 薛斌, 等. 保护性耕作对水-旱轮作土壤有机碳组分的影响——基于密度分组法[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 109-114.
- [36] Nyamadzawo G, Nyamangara J, Nyamugafata P, et al. Soil microbial biomass and mineralization of aggregate protected carbon in fallow-maize systems under conventional and no-tillage in Central Zimbabwe[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1): 151-157.
- [37] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 83-90.