

16 年保护性耕作措施对粮草轮作系统 土壤碳库及稳定性的影响

苑广源¹, MUNYAMPIRWA Tito^{2,3}, 毛丽萍¹,
张燕^{2,3}, 杨宪龙^{1,2,3}, 沈禹颖^{1,2,3}

(1.兰州大学草业科学国家级实验教学示范中心,兰州 730000;

2.兰州大学草地农业科技学院,兰州 730000;3.兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室,兰州 730020)

摘要: 土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分,对维持全球碳平衡及气候变化具有重要作用,其变化除了受气候和环境因素的影响外,还受农业耕作措施的影响。为研究长期保护性耕作措施对黄土高原陇东地区玉米(*Zea mays* L.)—小麦(*Triticum aestivum* L.)—箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)轮作系统土壤碳库及碳库变化的影响,利用已进行 16 年传统耕作(T)、传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕(NT)、免耕+秸秆还田(NTS)的保护性耕作定位试验,探究 0—200 cm 土层土壤全碳、有机碳、易氧化有机碳、碳库指数、碳库管理指数、碳库活度指数的变化。结果表明:连续进行 16 年保护性耕作措施能够显著增加 0—5 cm 土层土壤有机碳及易氧化有机碳含量($P < 0.05$),对深层土壤有机碳和易氧化有机碳影响不显著,相比 T、TS、NT、NTS 处理能够使土壤有机碳含量分别升高 59.74%,58.43%,80.56%,使易氧化有机碳含量分别升高 49.80%,49.65%,53.17%。保护性耕作措施对土壤碳库变化的影响随土层深度改变,其中 TS、NT 和 NTS 处理土壤碳库指数在 0—10 cm 土层显著高于 10—20 cm 土层,而土壤碳库活度指数和碳库管理指数在 10—20 cm 土层显著高于 0—10 cm 土层,土壤易氧化有机碳含量是决定土壤碳库活度指数和土壤碳库管理指数变化的主要原因。通过 16 年的长期试验证明,免耕+秸秆还田处理是提升农田表层土壤碳库及稳定性的有效措施,研究结果可为探讨土壤固碳机理、优化黄土高原地区农田管理措施提供理论指导。

关键词: 粮草轮作系统; 保护性耕作措施; 土壤碳库; 碳库稳定性

中图分类号:S344.16

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0252-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.03.035

Effects of Conservational Tillage Measures on Soil Carbon Pool and Stability in a Winter Forage-crop Rotation System on the Loess Plateau of China

YUAN Guangyuan¹, MUNYAMPIRWA Tito^{2,3}, MAO Liping¹,

ZHANG Yan^{2,3}, YANG Xianlong^{1,2,3}, SHEN Yuying^{1,2,3}

(1. National Demonstration Center for Experimental Grassland Science

Education, Lanzhou 730000; 2. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou

University, Lanzhou 730000; 3. State Key of Grassland Agro-Ecosystem, Lanzhou University, Lanzhou 730020)

Abstract: Soil carbon plays an important role in maintaining the productivity and yield stability of crops and regulating global climate change. The changes in soil carbon were affected by lots of factors, such as climate, environment and agricultural management measures. In order to study the effects of long-term conservational tillage measures on soil carbon pool and stability, we collected soils (0—200 cm depths) in farmland after 16 years of traditional tillage (T), traditional tillage + straw (TS), no tillage (NT) and no tillage + straw (NTS) treatments in maize (*Zea mays* L.) — wheat (*Triticum aestivum* L.) — common vetch (*Vicia sativa* L.) rotation system on the Loess Plateau, China. We analyzed the changes in soil organic carbon (SOC), to-

收稿日期:2020-11-01

资助项目:国家自然科学基金项目(31872416);兰州大学 2019 年大学生创新创业项目(20190010005);甘肃省农业厅项目(160230);中央高校基本科研业务费项目—博士后创新项目(lzujbky-2021-k616)

第一作者:苑广源(1999—),女,在读本科生,主要从事栽培草地研究。E-mail:yuangy17@lzu.edu.cn

通信作者:沈禹颖(1965—),女,教授,博导,博士,主要从事草地农业系统研究。E-mail:yy.shen@lzu.edu.cn

tal carbon (TC), readily oxidized organic carbon (AOC) Content and soil carbon pool index (CPI), carbon pool management index (CPMI), and soil carbon pool activity index (AI). We found that 16 years of conservational tillage measures increased soil OC and AOC Content in the 0–5 cm soil depth, but had no effects at 5–200 cm depth. When compared with T treatment, TS, NT and NTS increased soil OC contents by 59.74%, 58.43% and 80.56%, respectively, and increased AOC contents by 49.80%, 49.56%, 53.17%, respectively. The effects of conservational tillage measures on soil carbon stability varied with soil depths, for example, the CPI was significantly higher in 0–10 cm soil depth than that in 10–20 cm soil depth; while the higher AI and CPMI were found in 10–20 cm soil depth. In addition, the AOC and CPI, AI, CPMI were significantly correlated, implying the changes in AOC contents were the main reason for the changes in soil carbon pool stability. The results from this study suggested that no tillage + straw was an effective measure to improve surface soil carbon pool and the stability in farmland.

Keywords: conservational tillage, grain and forage rotation system; conservation tillage measures; soil carbon pool; soil carbon pool stability

我国黄土高原生态环境脆弱,年际降水变异大,农业生产系统稳定性差,产量低而不稳^[1]。传统的顺坡种植、斜坡种植等不合理的耕作措施加剧了作物生产对环境的破坏,使得生态环境持续恶化,限制了该区农业的可持续发展。保护性耕作措施能够减少土壤侵蚀、改善土壤理化性状、提升土壤质量,是保护农田、提升土地生产力、改善农业环境和可持续发展的必然选择^[2-3]。长期保护性耕作显著提高土壤表层和深层有机碳、养分含量,促进土壤水稳性大团聚体形成,提高土壤抗侵蚀性^[4-5]。蔡太义等^[6]在陕西省合阳县进行了10年保护性耕作试验,结果表明,长期免耕能够使土壤有机碳含量升高79.00%。秸秆添加对土壤有机碳、养分、水稳性团聚体分布、土壤有机碳稳定性均具有显著影响^[7]。王碧胜等^[4]在山西省寿阳县进行了16年秸秆还田试验,结果表明,长期秸秆覆盖能够使土壤有机碳含量升高3.00%~22.00%。土壤碳的积累通常受到时间变化的影响,蔡太义等^[6]研究表明,秸秆还田1年土壤有机碳含量升高7.60%,而孙竺鹤等^[1]研究表明,秸秆覆盖几十年后有机碳逐渐呈现稳定趋势。通常短期保护性耕作措施的土壤效应具有偶然性,往往只体现在表层土壤,长期保护性耕作背景下土壤碳库的变化还不深入,并且这种变化是否受到土层深度的影响有待进一步探索。

因此,本文以陇东黄土高原玉米—小麦—箭筈豌豆轮作系统为研究对象,分析了实施16年传统耕作(T)、传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕(NT)、免耕+秸秆还田(NTS)处理下0—200 cm土层土壤全碳、有机碳、易氧化有机碳含量及碳库指数、碳库管理指数、碳库活度指数、碳氮比变化特征,以明确旱作条件下长期保护性耕作对土壤碳库的影响,为探讨土壤固碳机理、优化黄土高原地区农田管理措施、实现农田

土壤固碳减排、肥力提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在甘肃庆阳草地农业生态系统国家野外科学研究观测站进行。位于东经107°51′,北纬35°39′,海拔1 297 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。据2001—2015年气象资料显示,多年平均降水量为548.9 mm,主要集中在7—9月。多年平均气温为9.5℃,1月平均气温为-3.7℃,7月平均气温为22.1℃。该地区是典型的黄土旱作区,土壤类型为黑垆土(FAO)^[8]。供试土壤容重1.4 g/cm³,有机质含量10 g/kg,全氮含量<0.1 g/kg,pH为8.0~8.5,黏粒含量12%~15%,粉粒含量70%,砂粒含量5%~8%。

1.2 试验处理

保护性耕作试验于2001年开始,长期定位观测。试验共设4个耕作处理:传统耕作(T)、传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕(NT)和免耕+秸秆还田(NTS)。传统耕作处理分别于作物收获后和播种前各耕作1次,耕层深度30 cm;免耕处理采用中国农业大学研制的免耕播种机播种,覆盖处理利用残茬覆盖地表的方式。每个处理4个重复,完全区组排列,共计16个小区,每个小区面积为4 m×13 m^[9]。

1.3 粮草轮作序列及田间管理

粮草轮作序列为玉米(*Zea mays* L.)—冬小麦(*Triticum aestivum* L.)—箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)。玉米于首年4月上旬播种(株距38 cm,行距60 cm),9月下旬收获,玉米收获后立即播种小麦(播量187 kg/hm²,行间距15 cm),第2年6月底或7月初收获,随后立即播种箭筈豌豆(行间距25 cm),10月收获,土地休闲,到第3年4月播种玉米,即为1个完整的轮作

体系。玉米和小麦播种时均以磷酸二铵(含氮 18%, P_2O_5 46%)为底肥,玉米拔节期、小麦返青期追施尿素(含氮 46%)300 kg/hm²,箭筈豌豆播种时施用过磷酸钙(含 P_2O_5 26%)63 kg/hm²),定期人工除草。

1.4 样品采集

在小麦收获期,按“S”形取样法,在每个小区利用土钻取 0—5,5—10,10—20,20—30,30—60,60—90,90—120,120—150,150—200 cm 9 个土层的土样,带回实验室风干过 2,0.25 mm 筛,测定土壤全碳、有机碳、易氧化有机碳、全氮含量。

1.5 测定指标与方法

土壤全碳(TC)含量用有机元素分析仪燃烧法^[10]测定(Elementar,德国)。有机碳含量用重铬酸钾外加热法^[10]测定。易氧化有机碳采用 0.02 mol/L $KMnO_4$ +0.1 mol/L $CaCl_2$ 的方法^[11]测定。土壤碳库管理指数计算方法^[12]为:

碳库管理指数(CPMI,%)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100%

碳库指数(CPI,%)=样品有机碳含量(TOC)÷参考土壤有机碳含量(TOC)×100%

碳库活度指数(AI,%)=样品碳库活度(A)÷参考土壤碳库活度(A)×100%

碳库活度(A)=样品活性有机碳含量(AOC)÷非活性有机碳含量(AOC)

式中:以传统耕作(T)作为参考土壤,土壤活性碳是易氧化有机碳,非活性有机碳含量等于全碳与活性有机碳含量之差。

1.6 数据分析

首先,进行数据的正态性和同质性测验,然后利用 two-way ANOVA 检验保护性耕作措施和土层深度及交互作用对土壤全碳、有机碳、易氧化有机碳及土壤碳库变化的影响,同时利用 LSD 法进行方差同质性检验。所有的统计分析利用 SPSS 软件(version 20.0,IBM,SPSS,USA)进行,图形的绘制在 Excel 2019 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作措施下土壤全碳的剖面分布

由表 1 和图 1 可知,保护性耕作措施、土层深度及交互作用显著影响土壤全碳的变化($P<0.05$)。传统耕作下,30—60 cm 土层的全碳含量显著低于其他土层($P<0.05$),为 9.71 g/kg。在免耕处理下,60—90,150—200 cm 全碳含量显著高于其他土层,分别为 16.86,16.55 g/kg。在传统耕作+秸秆还田处理下,0—5,60—200 cm 各土层的全碳含量均显著

高于 5—60 cm 各土层($P<0.05$),其中 120—150 cm 的全碳含量是 20—30 cm 的 2.82 倍。免耕+秸秆还田处理下各土层全碳含量差异不显著($P>0.05$)。在 10—20 cm 土层的免耕+秸秆还田、免耕、传统耕作+秸秆还田处理下土壤全碳含量显著低于传统耕作处理($P<0.05$),20—30 cm 土层中免耕+秸秆还田和传统耕作处理全碳含量显著高于传统耕作+秸秆还田处理($P<0.05$)。

2.2 保护性耕作措施下土壤有机碳的剖面分布

由表 1 和图 1 可知,保护性耕作措施能够显著影响土壤有机碳含量的变化($P=0.005$),并受土层深度的影响($P<0.001$)。0—5 cm 土层,免耕+秸秆还田处理下土壤有机碳含量显著高于其他处理,其有机碳含量是传统耕作的 1.80 倍,是传统耕作+秸秆还田处理的 1.13 倍,是免耕处理的 1.14 倍。5—30 cm 土层中各处理之间差异不显著($P>0.05$)。30—60 cm 土层免耕处理的有机碳含量显著高于其他处理,为 1.41 g/kg。60—90 cm 土层传统耕作+秸秆还田处理的有机碳含量显著高于其他处理,是传统耕作的 1.33 倍。120—150 cm 下传统耕作的有机碳含量显著高于其他处理($P<0.05$)。传统耕作下各土层有机碳含量差异不显著($P>0.05$)。免耕处理的 0—5 cm 土层有机碳含量显著高于其他土层($P<0.05$),为 1.68 g/kg;120—150,150—200 cm 土层的有机碳含量显著低于 0—60 cm 各土层。传统耕作+秸秆还田与免耕+秸秆还田处理不同土层有机碳含量变化趋势相近,均为 0—5 cm 土层显著高于其他土层,120—150,150—200 cm 土层有机碳含量显著低于其他土层($P<0.05$)。

表 1 耕作方式和土层深度对各因子影响的两因素方差分析

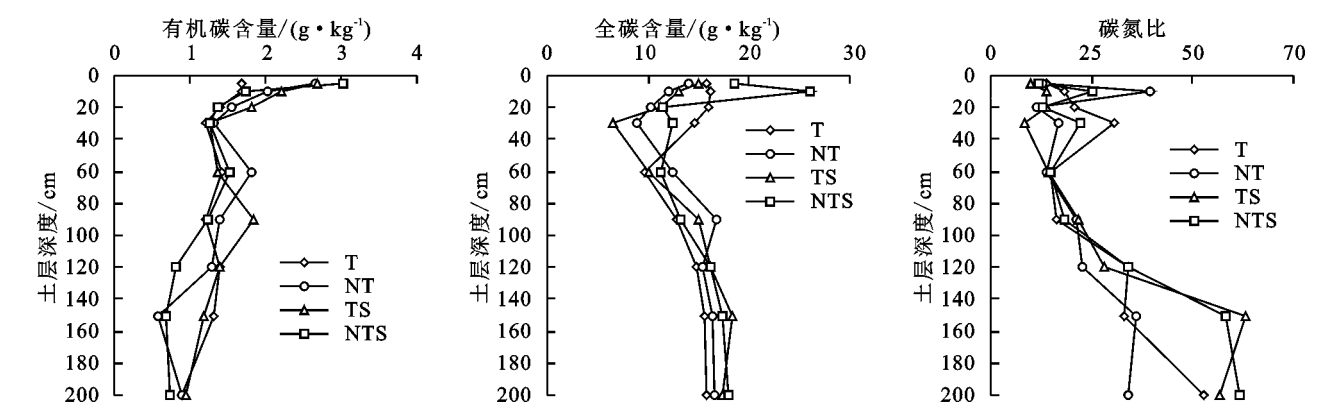
变异来源	处理		土层		处理×土层	
	F	P	F	P	F	P
全碳	2.816	0.043	6.425	<0.001	1.795	0.023
有机碳	4.605	0.005	30.447	<0.001	2.367	0.001
易氧化有机碳	9.408	<0.001	9.219	0.001	1.367	0.254
碳库指数	14.752	<0.001	13.497	<0.001	10.509	<0.001
碳库活度指数	7.293	0.002	10.98	<0.001	1.564	0.186
碳库管理指数	8.353	<0.001	18.358	<0.001	6.379	<0.001
碳氮比	2.174	0.095	36.451	<0.001	3.342	<0.001

2.3 保护性耕作措施下土壤易氧化有机碳的变化

由表 1 和图 2 可知,土壤易氧化有机碳受保护性耕作措施、土壤深度的直接影响显著($P<0.001$)。0—5 cm 土层,免耕+秸秆还田处理的易氧化有机碳含量显著高于免耕处理($P<0.05$),是免耕处理的 3.05 倍。在 5—10 cm 土层免耕+秸秆还田处理下的易氧化有机碳含量显著高于其他处理($P<0.05$),是传统耕作处理的

2.40 倍,是免耕处理的 2.98 倍,是传统耕作+秸秆还田处理的 5.65 倍。在 10—20 cm 土层,免耕+秸秆还田处理、传统耕作+秸秆还田处理、传统耕作处理的易氧化有机碳含量均显著高于免耕处理($P<0.05$)。传统耕

作、免耕处理、免耕+秸秆还田处理下易氧化有机碳含量不受土层深度变化的影响($P>0.05$)。传统耕作+秸秆还田处理,10—20 cm 土层的易氧化有机碳含量显著高于 5—10,0—5 cm 土层($P<0.05$)。



注:不同大写字母表示相同处理不同土层深度间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同土层不同耕作方式间显著差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同处理下土壤全碳和有机碳含量及碳氮比值的剖面分布

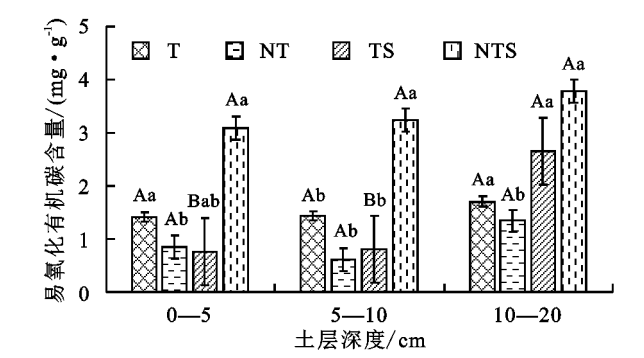


图 2 保护性耕作措施下土壤易氧化有机碳含量的变化

2.4 保护性耕作措施下土壤碳库指数、活度指数、碳库管理指数的变化

由表 1 和图 3 可知,土壤碳库指数受到保护性耕作措施、土层深度的直接或者间接作用的影响($P<0.05$)。其中 0—5 cm 土层各处理下的碳库指数均大于 1,免耕+秸秆还田处理的碳库指数最高,传统耕作处理分别是传统耕作+秸秆还田处理、免耕处理和免耕+秸秆还田处理的 62.60%,63.12%,55.38%。在 5—10 cm 土层免耕处理和传统耕作+秸秆还田处理的碳库指数均大于 1,分别为 120.50%和 132.10%,免耕+秸秆还田处理的碳库指数显著低于其他处理($P<0.05$)。在 10—20 cm 土层,免耕+秸秆还田的碳库指数显著低于其他处理($P<0.05$),为 97.80%。传统耕作和传统耕作+秸秆还田碳库指数在不同土层之间差异不显著,而免耕处理下,0—5 cm 土层的碳库指数显著高于 5—10 cm 土层($P<0.05$),在免耕+秸秆还田处理下,0—5 cm 土层的碳库指数显著高于 5—10,10—20 cm 土层($P<0.05$)。

由表 1 和图 3 可知,碳库活度指数受保护性耕作措施和土层深度的直接影响显著($P<0.05$)。在 0—

5 cm 土层,免耕+秸秆还田处理下碳库活度指数显著高于免耕处理和传统耕作+秸秆还田处理($P<0.05$),分别是传统耕作处理、免耕处理、传统耕作+秸秆还田处理的 2.17,3.18,4.04 倍。在 5—10 cm 土层,免耕+秸秆还田处理的碳库活度指数为 255.72%,显著高于传统耕作处理、免耕处理、传统耕作+秸秆还田处理($P<0.05$)。在 10—20 cm 土层,免耕+秸秆还田处理的碳库活度指数显著高于传统耕作处理和免耕处理($P<0.05$)。传统耕作、传统耕作+秸秆还田、免耕+秸秆还田处理碳库活度指数在不同土层之间差异不显著,而传统耕作+秸秆还田处理下,10—20 cm 土层的碳库活度指数显著高于 5—10,0—5 cm 土层,分别为 5—10,0—5 cm 土层的 5.24,4.14 倍。

由表 1 和图 3 可知,土壤碳库管理指数受到保护性耕作措施、土层深度的直接或者间接作用的影响($P<0.001$)。0—5 cm 土层免耕+秸秆还田处理的碳库管理指数为 216.90%,显著高于传统耕作处理、传统耕作+秸秆还田处理以及免耕处理($P<0.05$)。在 5—10 cm 土层,免耕+秸秆还田处理和传统耕作处理的碳库管理指数显著高于免耕处理和传统耕作+秸秆还田处理($P<0.05$)。传统耕作、传统耕作+秸秆还田、免耕+秸秆还田处理碳库活度指数在不同土层之间差异不显著,而传统耕作+秸秆还田处理下的 10—20 cm 土层的碳库指数显著高于 0—10 cm 土层($P<0.05$)。

2.5 保护性耕作措施下土壤碳氮比变化

土壤碳氮比不受保护性耕作措施的直接影响,但土层深度和保护性耕作措施的交互作用显著影响其变化($P<0.001$,表 1)。由图 1 可知,保护性耕作措施显著影响 0—5 cm 土层土壤碳氮比值(C/N),传

统耕作+秸秆还田处理下 C/N 显著低于其他处理 ($P<0.05$), 是传统耕作的 68.50%, 是免耕+秸秆还田处理的 81.50%, 是免耕处理的 74.90%。在 5—10 cm 土层, 免耕处理和免耕+秸秆还田处理的 C/N 显著高于传统耕作+秸秆还田处理 ($P<0.05$)。在 10—20 cm 土层下, 传统耕作处理的 C/N 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 为 20.82。在 20—30 cm 土层, 免耕处理的 C/N 显著高于传统耕作+秸秆还田处理 ($P<0.05$), 是传统耕作+秸秆还田的 1.20 倍。更深土层中各处理之间差异不显著。

在传统耕作处理下 10—20, 20—30, 90—120, 120—150, 150—200 cm 土层的 C/N 均显著高于 0—5, 30—60 cm 土层 ($P<0.05$)。免耕处理下各土层间 C/N 差异不显著; 传统耕作+秸秆还田和免耕+秸秆还田处理下各土层的 C/N 趋势类似, 都是 120—150, 150—200 cm 土层显著高于其他土层 ($P<0.05$)。

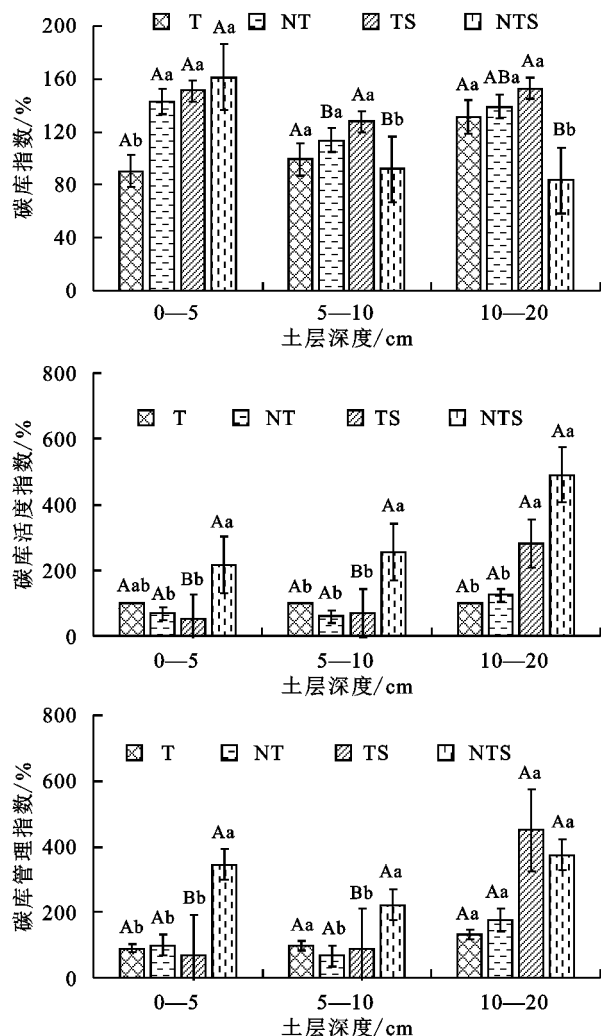


图 3 土壤碳库指数、碳库活性指数、碳库管理指数的变化

3 讨论

3.1 粮草轮作系统土壤全碳和有机碳对保护性耕作措施的响应

土壤碳是有机物长期输入和矿化分解平衡的结果,

是土壤最重要的组成部分, 是评价土壤质量和土壤肥力的核心因子^[13]。本研究表明, 粮草轮作系统进行保护性耕作措施能够固持碳, 免耕+秸秆还田、免耕、传统耕作+秸秆还田处理相比传统耕作能够使土壤全碳分别增加 76.35%, 119.27%, 91.23%, 使土壤有机碳分别增加 132.45%, 69.97%, 133.80%, 这与国内外研究一致。赵如浪等^[14]研究表明, 免耕秸秆覆盖有利于土壤总有机碳的积累, 有利于土壤肥力的培育和提升, 与传统耕作处理相比, 保护性耕作处理下土壤有机质含量呈上升趋势, 其中, 土壤耕作层 (0—20 cm) 增加明显, 而传统耕作处理呈下降趋势。这可能是因为秸秆添加增加土壤有机物质的输入, 有机物质的腐殖化作用是土壤有机碳输入的主要途径, 而免耕降低对土壤的机械扰动, 降低土壤有机质的矿化损失, 进而促进土壤有机碳的积累^[15]。此外, 外源氮输入的增加也促进土壤碳矿化, 进而促进土壤碳的积累。粮草轮作系统豆科植物的固氮作用促进土壤有机碳的积累, 本研究中土壤有机碳和全氮具有显著相关关系 ($OC=12.412 \times TN+0.5745, R^2=0.4349, P<0.001$)。王喜明^[15]研究表明, 藏北高寒草甸土壤添加氮源后, 土壤有机碳矿化释放的碳最多为 1 183.89 kg/hm², 是无氮添加处理的 1.03 倍^[15]。

土壤全碳和有机碳含量的变化受到土层深度的影响, 在整个土壤剖面呈现逐渐降低的趋势。传统耕作处理下, 60—90 cm 土层的全碳含量显著高于其他土层, 30—60 cm 的全碳含量最低。免耕处理下, 150—200 cm 全碳含量显著高于其他土层, 20—30 cm 全碳含量最低。传统耕作+秸秆还田处理下 120—150 cm 土层全碳含量最高, 20—30 cm 土层全碳含量最低; 免耕+秸秆还田处理下 150—200 cm 土层全碳含量最高, 0—5 cm 土层最低。土壤碳的剖面分布受凋落物量、淋溶作用、植物根系分布及微生物活动等多种因素的影响^[16]。保护性耕作下, 聚集在土壤表层的大量微生物高效分解作物残体, 使营养元素更多地进入土壤^[17]。目前, 保护性耕作的应用^[18]表明, 在干旱和半干旱地区可使土壤腐殖质含量增加, 同时加速土壤中腐殖酸的溶解度和凝聚度, 提高土壤肥力和作物产量。免耕处理下全碳含量最大值对应的土层深度比传统耕作的深, 其原因可能是免耕促进根系伸长, 提高深层根系数量和土壤固碳能力, 从而提高土壤碳含量, 已有研究^[19]表明, 免耕覆盖明显促进了冬小麦根系生长。本研究中传统耕作+秸秆还田处理下全碳含量在更深层 (120—150 cm) 土壤中累积, 而传统耕作在 60—90 cm 土层累积, 可能

是秸秆覆盖使得沉积物粗细程度不同,从而影响土壤孔隙率,使土壤、水分和空气三相比发生变化,造成土壤碳氮等营养元素的富集和迁移^[19]。

3.2 粮草轮作系统土壤易氧化有机碳对保护性耕作措施的响应

土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快、易矿化分解,在土壤中移动快、易受植物和土壤微生物影响、活性较高的那部分有机碳,易氧化有机碳指标可以表征活性有机碳^[19]。本研究表明,保护性耕作可以显著提高土壤易氧化有机碳含量,其中免耕+秸秆还田处理的易氧化有机碳含量均显著高于其他处理($P<0.05$)。本研究结果与王桂林等^[19]的结果较为一致,保护性耕作以免耕+秸秆还田措施的提升效果最为明显。张岳芳等^[20]研究表明,与常规耕作相比,少免耕、常规耕作+秸秆还田、少免耕+秸秆还田处理显著提高0—5,5—10 cm土层土壤活性有机碳含量。主要原因是秸秆中的活性成分不仅能提高土壤有机质活性,而且能更新土壤有机质,促进原有有机质活性。另外,由于传统翻耕的频繁作业使土壤团聚体破碎,土壤干湿交替使生物有效碳库裸露出来,活性有机碳矿化速率加快,土壤有机质迅速降解,从而增加了易氧化有机碳的流失,免耕减少作业次数,可以避免易氧化有机碳的流失^[21]。

3.3 保护性耕作对粮草轮作系统土壤碳氮比的影响

土壤物理、化学和生物学过程在一定程度上受土壤碳、氮的演变调控,碳氮比(C/N)可衡量土壤碳、氮平衡状况,是评价土壤质量敏感性的指标之一,同时也是影响土壤碳氮循环和变化过程的重要因素。本研究表明,保护性耕作措施显著影响0—10 cm土层的C/N,免耕+秸秆还田处理的C/N显著高于其他处理,与王少博等^[22]的研究结果一致。土壤碳氮比是有机碳、氮输入与输出长期平衡的结果,并与输入的有机物质的组分、氮肥的施用、土壤的性状和土地利用方式等有关。首先,施入的禾本科作物茎秆的碳氮比达到(60~100):1,是保护性耕作提高碳氮比值的原因之一;其次,秸秆添加和免耕的秸秆残留作为有机质输入提高土壤碳含量,从而使碳氮比增加^[6]。土层深度也显著影响土壤的C/N($P<0.001$),本研究表明,120—200 cm土层的C/N均显著高于表层,表明深层土壤有机质稳定,分解速率低,土壤碳含量也高,这与上文研究结果一致。秸秆还田处理下土壤碳氮比较低,说明秸秆还田提高土壤微生物多样性,有利于土壤微生物活动,能够加速土壤有机质的分解,提高土壤碳氮的矿化能力。但是本研究中秸秆覆

盖的处理下土壤碳含量高,可能是因为秸秆输入的过程中,即使土壤微生物活动增强,有机质的分解速率加剧,但是秸秆的输入速率显著大于分解速率,因此土壤碳呈现积累的趋势。

3.4 保护性耕作对粮草轮作系统土壤碳库指数、碳库活度指数、碳库管理指数的影响

土壤碳库指数、碳库活度指数、碳库管理指数是表征土壤碳动态及稳定性的指标,较土壤有机碳含量更能快速、准确地反映不同管理措施对土壤碳库的影响,是目前国内外用来评价土壤质量的重要指标^[5]。本研究表明,土壤碳库指数、碳库活度指数、碳库管理指数受到保护性耕作措施的显著影响,并随土层深度变化($P<0.05$,表2),其中免耕+秸秆还田处理对其影响最显著。这与杨晶等^[9]、王桂林等^[19]的研究结果相似,秸秆还田+免耕的碳库管理指数显著增加。保护性耕作下,土壤受到扰动的概率减小,矿化程度减弱,从而碳库活度升高。吕瑞珍等^[23]研究表明,有秸秆覆盖的耕作方式在各个土层碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数各项指标含量均高于对照,说明秸秆覆盖能够增加土壤有机碳含量,促进土壤培肥。本研究中土壤有机碳和土壤碳库指数、碳库活度指数之间具有相关关系($P<0.01$,图4),说明保护性耕作措施能够增加土壤有机碳含量,进而促进提升土壤碳库稳定性。免耕主要是通过增加土壤有机碳含量提高土壤碳库管理指数,而传统耕作+秸秆还田、免耕+秸秆还田主要是通过增加土壤有机碳含量以及改善土壤有机碳活度来增加土壤碳库管理指数^[9]。

土壤碳库指数、碳库活度指数、碳库管理指数在不同土层差异显著($P<0.05$,表2)。免耕处理下,10—20 cm土层的碳库管理指数显著高于0—5,5—10 cm土层($P<0.05$)。传统耕作+秸秆还田处理下的10—20 cm土层的碳库指数显著高于5—10 cm土层,5—10 cm土层的碳库管理指数显著高于0—5 cm土层($P<0.05$)。张岳芳等^[20]研究表明,与常规耕作相比,少免耕、常规耕作+秸秆还田、少免耕+秸秆还田处理显著提高0—5,5—10 cm土层土壤碳库管理指数,常规耕作+秸秆还田处理还有利于提高10—20 cm土层土壤碳库管理指数,与本研究结果略有不同。不同耕作措施下土壤活性有机碳含量影响土壤碳库活度指数和碳库管理指数^[24]。本研究中10—20 cm的易氧化有机碳含量高于表层土壤(图2),从而导致10—20 cm土层土壤的碳库管理指数和活度指数显著高于0—10 cm土层($P<0.001$,图4)。

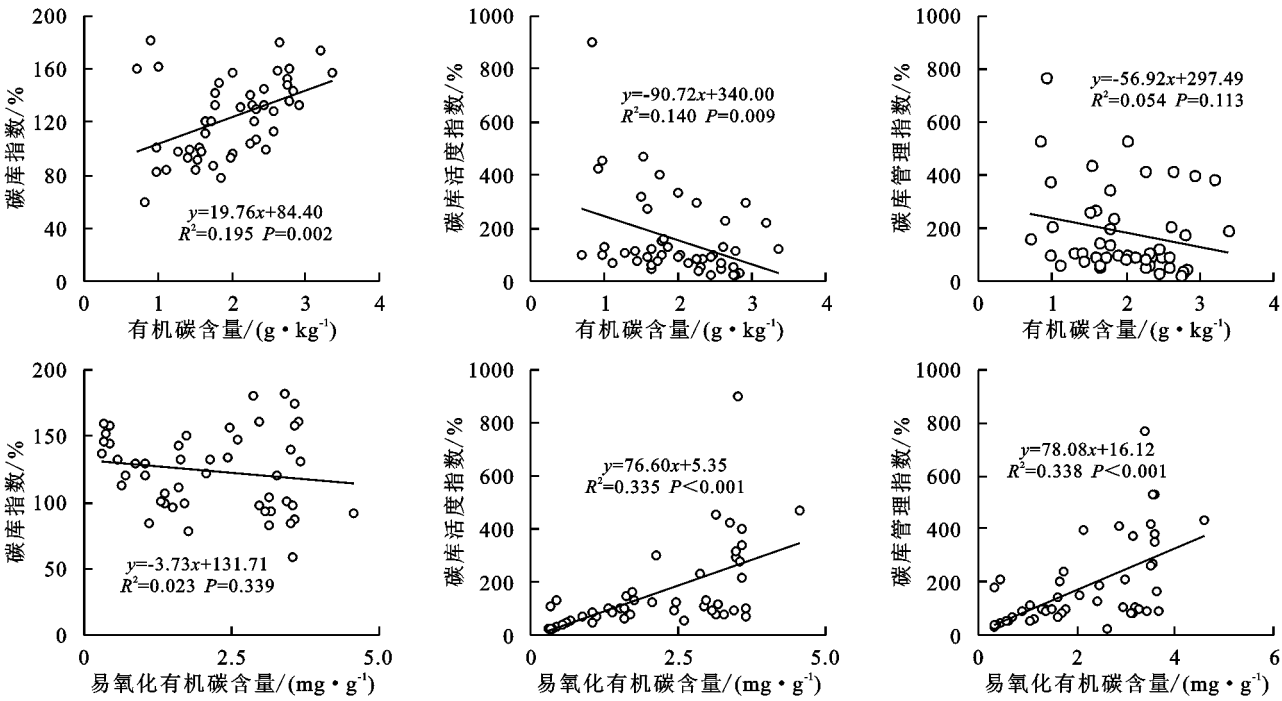


图 4 土壤有机碳、易氧化有机碳含量与碳库指数、碳库活度指数、碳库管理指数的相关性关系

4 结论

连续进行 16 年保护性耕作能够显著提高 0—5 cm 土层土壤有机碳及易氧化有机碳含量,对深层土壤有机碳和易氧化有机碳影响不显著,其中免耕+秸秆还田(NTS)措施对土壤有机碳、全碳、易氧化有机碳的影响最显著。保护性耕作对土壤碳库变化的影响受到土层深度的影响,其中传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕(NT)和免耕+秸秆还田(NTS)土壤碳库指数在 0—10 cm 土层显著高于 10—20 cm 土层,而土壤碳库活度指数和碳库管理指数在 10—20 cm 土层显著高于 0—10 cm 土层,土壤易氧化有机碳含量是决定土壤碳库活度指数和土壤碳库管理指数变化的主要原因。通过 16 年的长期试验证明,免耕+秸秆还田处理是提升农田土壤表层碳库及稳定性的有效措施,对于提高农田肥力以及实现农田生产可持续发展具有重要意义。

参考文献:

[1] 孙竺鹤,徐香茹,裴久渤,等.秸秆添加量对棕壤有机碳固定与周转的影响[J].沈阳农业大学学报,2019,50(5): 536-542.

[2] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.

[3] 李舟.基于多尺度分析的黄土高原保护性耕作系统下作物产量、土壤碳库与经济效益研究[D].兰州:兰州大学,2018.

[4] 王碧胜.长期保护性耕作土壤团聚体有机碳转化过程及机制[D].北京:中国农业科学院,2019.

[5] 陈俊佳,陈志彪,陈志强,等.不同水土保持措施对闽西紫色土速效养分及可蚀性的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):47-52.

[6] 蔡太义,黄耀威,黄会娟,等.不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J].生态学杂志,2011,30(9):1962-1968.

[7] Mishra U, Ussiri D, Lal R. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in corn belt of Ohio USA [J].Soil and Tillage Research,2010,107(2):88-96.

[8] 罗彩云,沈禹颖,南志标,等.水土保持耕作下陇东玉米—小麦—大豆轮作系统产量、土壤易氧化有机碳动态[J].水土保持学报,2005,19(4):84-88.

[9] 杨晶,沈禹颖,南志标,等.保护性耕作对黄土高原玉米—小麦—大豆轮作系统产量及表层土壤碳管理指数的影响[J].草业学报,2010,19(1):75-82.

[10] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys [J].Soil Science, 2001,166(1):61-67.

[11] Weil R, Islam K, Stine M, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use [J].American Journal of Alternative Agriculture,2003,18:3-17.

[12] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.

[13] 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.

对稻穗不同部位氮含量分布的影响[J].南方农业学报, 2018,49(10):46-51.

[6] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等.氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6): 1279-1286.

[7] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J].中国水稻科学,2018,32(4):387-397.

[8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社, 1999:39-42.

[9] 王寅,冯国忠,张天山,等.控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J].中国农业科学,2016,49(3):518-528.

[10] 王鑫,姚尧,徐梦洁,等.宜兴市稻田表层土壤生物固氮量的空间分异特征[J].土壤,2020,52(3):618-624.

[11] 谢祖彬,张燕辉,王慧.稻田生物固氮研究进展及方向[J].土壤学报,2020,57(3):540-546.

[12] 黄思怡,田昌,谢桂先,等.控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J].植物营养与肥料学报, 2019,25(12):2102-2112.

[13] 彭术,张文钊,侯海军,等.氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J].生态学杂志,2019,38(1): 153-160.

[14] 张敏,姚元林,曾科,等.配施有机肥减少太湖地区稻田土壤硝态氮淋失的机理研究[J].土壤,2020,52(4): 766-772.

[15] 朱启东,鲁艳红,廖育林,等.施氮量对双季稻产量及氮磷钾吸收利用的影响[J].水土保持学报,2019,33(2): 183-188.

[16] 田昌.湖南双季稻田控释尿素减施条件下氮素收支持征研究:以潮沙泥为例[D].长沙:湖南农业大学,2019.

[17] 钟雪梅,黄铁平,彭建伟,等.机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J].中国水稻科学,2019,33(5):436-446.

[18] 鲁艳红,聂军,廖育林,等.氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):95-104.

[19] 朱芸,廖世鹏,刘煜,等.长江流域油一稻与麦一稻轮作体系周年养分收支差异[J].植物营养与肥料学报, 2019,25(1):64-73.

[20] 王淳.双季稻连作体系氮素循环特征[D].北京:中国农业科学院,2012.

[21] 侯红乾,冀建华,刘益仁,等.缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J].土壤,2018,50(1):43-50.

[22] 王敬国,林杉,李保国,等.氮循环与中国农业氮管理[J].中国农业科学,2016,49(3):503-517.

[23] 颜晓元,夏龙龙,遆超普.面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J].中国科学院院刊,2018,32(2):177-183.

(上接第 258 页)

[14] 赵如浪,刘鹏涛,冯佰利,等.黄土高原春玉米保护性耕作农田土壤养分时空动态变化研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):69-74.

[15] 王喜明.碳、氮添加对藏北高寒草甸土壤碳、氮矿化及氮素转化速率的影响[D].兰州:兰州大学,2014.

[16] 丁越岩,杨劼,宋炳煜,等.不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J].草业学报,2012,21(2):18-25.

[17] Aziz I, Mahmood T, Islam K R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality[J].Soil and Tillage Research, 2013,131(7):28-35.

[18] 乔丹丹.生物质炭配施秸秆和有机肥对黄褐土团聚体和有机碳组分的影响[D].郑州:河南农业大学,2018.

[19] 王桂林,曹鹏,刘章勇.保护性耕作对土壤养分及碳库管理指数的影响[J].环境科学与技术,2012,35(8):71-73,162.

[20] 张岳芳,孙国峰,周炜,等.保护性耕作对南方稻麦两熟高产农田土壤碳库特性的影响[J].西南农业学报, 2015,28(3):1155-1160.

[21] 杨敏芳,朱利群,韩新忠,等.不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1387-1393.

[22] 王少博,曹亚倩,冯倩倩,等.保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):792-804.

[23] 吕瑞珍,熊瑛,李友军,等.保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):206-209,217.

[24] 张琦,王淑兰,王浩,等.深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J].中国农业科学,2020,53(14):2840-2851.