

连续 14 年保护性耕作对土壤总有机碳 和轻组有机碳的影响

刘 杰¹, 李玲玲¹, 谢军红¹, 邓超超¹, 彭正凯¹,
Yeboah Stephen², Lamptey Shirley¹

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 依托于 2001 年布设在陇中黄土高原半干旱雨养农业区的保护性耕作定位试验, 于 2014 年测定了 5 种保护性耕作(免耕 + 秸秆覆盖 NTS、免耕 NT、传统耕作 + 秸秆翻埋 TS、传统耕作 + 地膜覆盖 TP 和免耕 + 地膜覆盖 NTP)和传统耕作 T 处理下小麦 - 豌豆双序列轮作中表层土壤(0~5、5~10、10~30 cm)总有机碳(SOC)和轻组有机碳(LFOC)在作物生育期前后的变化。结果表明: 土壤总有机碳和轻组有机碳在土壤剖面上均随着土层深度的增加而降低; 相比传统耕作 T, NTS 和 TS 处理能显著提高 0~30 cm 土层中 SOC、LFOC 的含量, 在作物播种前较 T 分别提高了 19.51%、64.58% 和 13.36%、42.08%, 在收获后分别提高了 28.00%、85.37% 和 18.61%、77.82%, 而 SOC、LFOC 含量 NT 和 TP 处理与 T 处理间差异不显著; 从作物播种前至收获后, 各处理下 0~30 cm 土层 SOC 含量均有减小趋势, 其中 NTS 和 TS 处理变化量最小, NT 和 TP 处理加大了作物生育期间 SOC 和 LFOC 的消耗; LFOC 可以灵敏地反应出土壤有机碳的变化。因此, 在该区推行以免耕、秸秆覆盖为主的保护性耕作措施更有利于碳的积累和土壤质量的改善, 促进该区农业的可持续发展。

关键词: 保护性耕作; 土壤总有机碳; 轻组有机碳

中图分类号: S158.3; S153.6⁺2 **文献标志码:** A

Soil total organic carbon and its light fractions in response to 14 years of conservation tillage

LIU Jie¹, LI ling-ling¹, XIE Jun-hong¹, DENG Chao-chao¹,
PENG Zheng-kai¹, Yeboah Stephen², Lamptey Shirley¹

(1. *Gansu Provincial Laboratory of Aridland Crop Sciences / Faculty of Agronomy,*

Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. *College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)*

Abstract: The study was carried out on a long-term field experiment set up in 2001 in Dingxi, which is a typical semiarid rainfed agriculture area on the western Loess Plateau. The objective of the experiment was to determine the effect of conventional and conservation tillage practices on soil organic carbon (SOC) and light fraction organic carbon (LFOC) in surface soil of wheat - pea double sequence rotation system. The experiment was laid out in a randomized complete block design with four replications. Treatments included six types of tillage practices; conventional tillage with no straw (T), no-tillage with no straw mulching (NT), conventional tillage with straw incorporation (TS), no-tillage with straw mulching (NTS), conventional tillage with plastic film mulch (TP), no-tillage with plastic mulching (NTP). The main results were as follows: (1) the soil SOC and LFOC content decreased with increasing soil depth; (2) compared with the conservation tillage, no tillage with stubble incorporated (NTS) and tillage with straw incorporation improved soil SOC and LFOC, it has increased by 19.51%, 13.36% and 64.58%, 42.08% before sowing, increased by 28.00%, 18.

收稿日期: 2016-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(31460337); 陇原青年创新人才扶持计划; 甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放基金(GSCS-2010-03)

作者简介: 刘 杰(1991—), 男, 甘肃甘谷人, 硕士研究生, 研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: 962697153@qq.com。

通信作者: 李玲玲(1977—), 女, 博士, 教授, 研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: lill@gsau.edu.cn。

61% and 85.37%, 77.82% after harvest. However, no-till without straw incorporated (NT) and conventional tillage with plastic film mulch (TP) did not show obvious effect; (3) the SOC content from sowing to harvest exhibited a downward tendency, with the minimum change occurring in NTS and TS; but NT and TP expanded the consumption of SOC during crop growth stage. (4) LFOC was sensitive as an indicator of soil organic carbon.

Keywords: conservation tillage; soil organic carbon; light fraction organic carbon

近年来,由于复杂多变的自然条件以及长期不合理的耕作方式导致黄土高原地区水土流失日益严重,使土壤中大量养分流失,耕地质量下降^[1]。土壤有机碳(SOC)作为土壤的重要组成部分,其含量的提高能够改善土壤结构、提高土壤保水保肥能力,促进作物的生长发育^[2]。另外,土壤有机碳含量的变化还与农业可持续发展、全球碳循环、全球气候变化等有着密切的关系^[3]。因此,研究农田土壤中有有机碳及其组分的变化对提高黄土高原地区土壤肥力和农业的可持续发展具有重要意义。

依据不同的分离方法可将土壤有机碳分成不同的组分,如水溶性有机碳(DOC)、可矿化有机碳(MOC)、微生物量有机碳(MBC)、易氧化有机碳(ROOC)、轻组有机碳(LFOC)等。其中轻组有机碳是利用物理分组方法将土壤有机碳分离而来,分离过程几乎不破坏土壤有机碳的原状结构^[4-5],而且轻组有机碳具有很强的生物学活性,在土壤中移动速度较快、不稳定、易分解,易受作物、环境、耕作管理措施等外界因素的影响,能较快地反映出土地利用方式的变化^[6]。因此,轻组有机碳比总有机碳对耕作措施的反应更加敏感,被认为是研究土地利用和耕作措施变化最主要的部分^[7]。

已有研究表明,以少、免耕和秸秆覆盖为核心的保护性耕作技术,能够改善土壤结构,提高土壤肥力和土壤有机碳含量^[8-9]。然而,针对保护性耕作措施下土壤有机碳的研究大多集中在土壤中碳含量的变化方面^[10-11],对于保护性耕作措施下土壤有机碳在作物生长期间的消耗与积累过程以及保护性耕作影响土壤有机碳变化的内在机制研究较少。而土壤有机碳对不同耕作措施的反应可通过土壤有机碳及其活性组分的变化解释其机制^[12]。鉴于此,本试验依托连续进行 14 年的保护性耕作长期定位试验,监测了连续 14 年保护性耕作之后土壤总有机碳(SOC)和轻组有机碳(LFOC)在作物生长期前后的变化,并分析了两者的关系,旨在从轻组组分角度揭示不同保护性耕作措施影响黄绵土土壤有机碳变化的机制以及其积累过程,以期为黄土高原旱地有机碳的管理以及农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设置在陇中黄土高原丘陵沟壑区的定西市安定区李家堡镇。该区属中温带半干旱偏旱区,多年平均日照时数 2 476.6 h,太阳辐射量为 592.9 kJ·cm⁻²;年均气温 6.4℃,变化在 5.8℃~6.8℃之间,≥0℃积温为 2 933.5℃,≥10℃积温为 2 239.1℃,年均无霜期为 140 d;多年平均降水量为 390.9 mm,年际、年内变化率大,80%保证率的降水量为 365 mm,年蒸发量达到 1 531 mm,为降水量的 3~4 倍,变异系数为 24.3%。试验区光照和水分只能满足一年一熟作物的要求,为典型的雨养农业区。试区土壤为黄绵土,土质较绵软,质地较均匀,贮水性能良好,0~200 cm 土壤容重平均为 1.17 g·cm⁻³,平均土壤排水上限为 0.27 cm³·cm⁻³;小麦有效水分下限为 0.10 cm³·cm⁻³,豌豆有效水分下限为 0.16 cm³·cm⁻³。试验开展初期土壤有机质含量为 12.01 g·kg⁻¹,全氮 0.76 g·kg⁻¹,全磷 1.77 g·kg⁻¹。

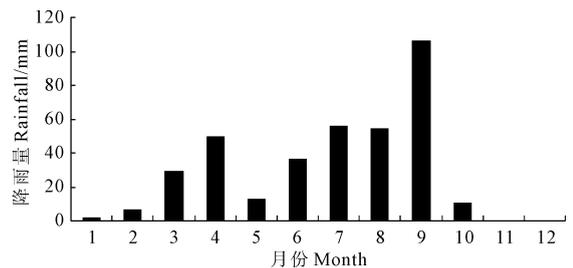


图 1 试验区 2014 年 1—12 月降雨量

Fig.1 Monthly rainfall in 2014 in studied area

1.2 试验设计

本研究依托的长期定位试验始于 2001 年,采用单因素随机区组设计,共设 6 个处理(如表 1),4 个重复,参试作物采取“春小麦-豌豆”双序列轮作,共计 48 个小区,每小区面积为 4 m×20 m。供试春小麦和豌豆品种分别为当地主栽品种“定西 40 号”和“燕农 2 号”。春小麦播种量为 187.5 kg·hm⁻²,行距 20 cm,各处理均施纯 P₂O₅ 105 kg·hm⁻²(过磷酸钙 656.25 kg·hm⁻²),纯 N 105 kg·hm⁻²(尿素 226.29 kg·hm⁻²);豌豆播种量为 180 kg·hm⁻²,行距 20 cm,各处理施纯 N 20 kg·hm⁻²(尿素 43.10 kg·hm⁻²),施纯

P_2O_5 105 kg·hm⁻²(过磷酸钙 656.25 kg·hm⁻²)。春小麦于每年 3 月中旬播种,7 月下旬至 8 月上旬期

间收获;豌豆于 4 月上旬播种,7 月中、下旬收获。各小区田间杂草用 2,4-D 丁酯与草甘膦除去。

表 1 试验处理

Table 1 Description of tillage treatments in the experiment

代码 Code	处理 Treatment	具体操作 Description of operation
T	传统耕作不覆盖 Conventional tillage	前茬作物收获后至土壤冻结前,试验地进行三耕两耨。 The field was ploughed 3 times and harrowed twice after harvest
NTS	秸秆覆盖 + 免耕 No tillage with straw mulching	整个试验期采取完全免耕,免耕播种机一次性完成施肥和播种,收获脱粒后的作物秸秆覆盖在原小区。 No-tillage throughout a year. Sowing and fertilization were performed with seeding-machine at the same time. All the straw of previous crop was returned to and mulched the original plot immediately after threshing.
NT	免耕不覆盖 No tillage	试验整个阶段都免耕,但不覆盖,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种。 No-till throughout the experiment. Sowing and fertilization were performed with seeding-machine at the same time.
TS	传统耕作 + 秸秆翻入 Conventional tillage with straw incorporation	耕作方式同 T(三耕两耨),但随第 1 次耕作将所有前茬作物秸秆翻入土壤。 The field was ploughed and harrowed exactly as T treatment, but with straw incorporated at the first plough. All the straw of the previous crop was returned to the original plot immediately after threshing and then incorporated into soil.
TP	传统耕作 + 地膜覆盖 Conventional tillage with plastic film mulching	耕作方式同 T(三耕两耨),在第二次耨后在地表覆盖塑料薄膜,膜宽 40 cm,间距 20 cm,膜侧种植作物。 The field was ploughed and harrowed exactly as T treatment, but covered with plastic film after the twice harrow. Plastic film was set between crop rows and the covered belt width was 40 cm. Thus, the row spaces between crops were 20 cm.
NTP	免耕 + 覆膜 No tillage with plastic mulching	整个试验阶段采取免耕,覆膜及播种方式同 TP。 No-till throughout the year. The plastic film was laid in October using same machine as for TP treatment.

本试验于 2014 年 3 月中旬作物播种前进行第一次土壤取样,于同年 7 月下旬豌豆、小麦收获后进行第二次取样;取样深度为 0~5、5~10、10~30 cm,每个样为三点采集混合而成,经风干处理后过 2 mm 筛,所有土壤样品在常温下保存于密封袋中。

1.3 土壤总有机碳(SOC)和轻组有机碳(LFOC)的测定

SOC 采用 $K_2Cr_2O_7 - H_2SO_4$ 氧化外加热法测定^[13]。LFOC 采用 Gregorich 和 Ellert 所描述的方法分离提取^[14],然后用 vario MICRO cube 元素分析仪测定有机碳含量。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 耕作措施对小麦-豌豆轮作系统 0~30 cm 土层土壤总有机碳(SOC)含量的影响

2.1.1 耕作措施对小麦地 0~30 cm 土层总有机碳含量的影响 由表 2 可以看出,在播种前,小麦地中各处理 0~30 cm 土层内 SOC 平均含量变化范围为 7.31~8.75 g·kg⁻¹,变化趋势为 NTS > TS > NTP >

NT > TP > T,在 0~30 cm 土壤剖面上表现为 0~5 cm > 5~10 cm > 10~30 cm。在 0~5、5~10 cm 土层中,NTS 和 TS 处理下 SOC 含量显著高于 T 处理,分别较 T 提高了 28.99% 和 17.63%、24.46% 和 16.18%,TP 和 NT 处理下 SOC 含量略高于 T 处理,但与 T 之间差异不显著。10~30 cm 土层中各处理 SOC 含量均没有显著差异。在小麦收获后,0~5、5~10、10~30 cm 土层中,NTS 和 TS 处理下 SOC 含量较 T 分别提高了 37.44%、28.82%、25.20% 和 22.52%、18.85%、17.09%,TP、NT 处理与 T 处理之间差异不显著。

从小麦播种前至收获后,各处理 0~30 cm 土层中 SOC 含量较播种前均有所减小,传统耕作 T 处理减少的量最大,较播种前降低了 9.20%,NT 和 TP 处理降低了 8.22% 和 7.38%,NTS 处理下 SOC 含量减少的量最小,较播种前降低了 2.89%。

2.1.2 耕作措施对豌豆地 0~30 cm 土层总有机碳含量的影响 由表 3 可知,在播种前,豌豆地各处理 0~30 cm 土层 SOC 平均含量变化范围为 7.42~8.86 g·kg⁻¹,表现为 NTS > TS > NTP > TP > NT > T,其中 NTS 和 TS 处理下 SOC 平均含量较 T 分别提高了 19.31% 和 12.82%,在 0~30 cm 土壤剖面上随着

土层深度的加深而逐层递减。在 0~5、5~10、10~30 cm 土层中,均有 NTS 处理下 SOC 含量显著高于 T 处理,分别较 T 提高了 31.88%、18.87%、16.09%, NT、TP 处理下 SOC 含量与 T 处理差异不显著。收获后,各处理 0~30 cm 土层 SOC 平均含量变化趋势与播种前一致。在 0~5、5~10、10~30 cm 土层土壤

中,NTS 和 TS 处理下 SOC 含量均显著高于传统耕作 T,而 NT 和 TP 处理 SOC 含量与 T 处理之间差异不显著。

经过一个生育期后,NT 处理下 SOC 含量较播种前减少的量最大,降低了 8.05%,NTS 和 TS 处理下 SOC 含量变化的量小于其他处理。

表 2 小麦—豌豆轮作序列下 0~30 cm 土层土壤有机碳含量/(g·kg⁻¹)

Table 2 The content of total organic carbon in the soil layer of 0~30 cm in the wheat-pea crop rotation sequence

处理 Treatment	播前 Before sowing				收后 After harvest			
	0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm	平均 Mean	0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm	平均 Mean
T	7.65 ± 0.26d	7.33 ± 0.22c	7.22 ± 0.82a	7.31	7.15 ± 0.34c	6.92 ± 0.34c	6.44 ± 0.21c	6.64
NTS	9.86 ± 0.43a	9.12 ± 0.35a	8.38 ± 0.48a	8.75	9.82 ± 0.49a	8.91 ± 0.14a	8.06 ± 0.42a	8.50
NT	8.22 ± 0.24bcd	7.94 ± 0.16bc	7.77 ± 0.19a	7.87	7.91 ± 0.16bc	7.47 ± 0.18bc	7.00 ± 0.11bc	7.23
TS	8.99 ± 0.36ab	8.51 ± 0.41ab	8.11 ± 0.31a	8.33	8.76 ± 0.30b	8.22 ± 0.26ab	7.54 ± 0.35ab	7.86
TP	7.93 ± 0.41cd	7.80 ± 0.22bc	7.64 ± 0.20a	7.71	7.33 ± 0.32c	7.12 ± 0.21c	7.10 ± 0.24bc	7.14
NTP	8.71 ± 0.27bc	8.65 ± 0.29ab	7.81 ± 0.24a	8.10	8.29 ± 0.18b	7.99 ± 0.36b	7.52 ± 0.10ab	7.73

注:不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著,下同。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

表 3 豌豆—小麦轮作序列下 0~30 cm 土层土壤有机碳含量(g·kg⁻¹)

Table 3 The content of total organic carbon in the soil layer of 0~30 cm in the pea-wheat crop rotation sequence

处理 Treatment	播前 Before sowing				收后 After harvest			
	0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm	平均 Mean	0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm	平均 Mean
T	7.72 ± 0.19c	7.64 ± 0.20b	7.29 ± 0.31b	7.42	7.41 ± 0.13c	7.24 ± 0.13c	6.68 ± 0.18c	6.89
NTS	10.19 ± 0.38a	9.08 ± 0.38a	8.47 ± 0.31a	8.86	9.17 ± 0.34a	9.02 ± 0.15a	8.68 ± 0.19a	8.82
NT	8.24 ± 0.66bc	7.83 ± 0.43b	7.58 ± 0.40ab	7.73	8.19 ± 0.40bc	7.27 ± 0.24c	6.80 ± 0.28c	7.11
TS	9.05 ± 0.51b	8.49 ± 0.21ab	8.18 ± 0.25ab	8.37	8.82 ± 0.25ab	8.53 ± 0.57ab	7.95 ± 0.32ab	8.19
TP	8.37 ± 0.16bc	8.06 ± 0.15b	7.74 ± 0.32ab	7.90	7.82 ± 0.35c	7.67 ± 0.20c	7.50 ± 0.52bc	7.58
NTP	8.42 ± 0.32bc	8.26 ± 0.28ab	7.99 ± 0.38ab	8.11	8.22 ± 0.11bc	7.86 ± 0.14bc	7.58 ± 0.15bc	7.73

综合两种轮作模式下不同耕作措施在作物播种前与收获后对 0~30 cm 土层 SOC 含量的影响可知,相对于传统耕作 T,保护性耕作 NTS 和 TS 处理能够提高 0~30 cm 土层中 SOC 含量,且能减少作物生育期间 0~30 cm 土层土壤有机碳的消耗,而 NT 和 TP 处理加大了作物生育期间 SOC 的消耗。

2.2 耕作措施对小麦—豌豆轮作系统 0~30 cm 土层中轻组有机碳(LFOC)含量的影响

2.2.1 耕作措施对小麦地 0~30 cm 土层中轻组有机碳含量的影响 由表 4 可以看出,在播种前,小麦地中各处理 0~30 cm 平均 LFOC 含量变化范围为 0.72~1.48 g·kg⁻¹,其含量相对较小,变化趋势为 NTS > TS > NT > T > NTP > TP,在 0~30 cm 土层土壤剖面上随着土层深度的加深而递减。在 0~5、5~10 cm 土层内,NTS 处理下 LFOC 含量显著高于 T 处理,分别较 T 高出 1.29 g·kg⁻¹和 0.77 g·kg⁻¹;在 10

~30 cm 土层内,则与 T 处理差异不显著。TP 处理下 LFOC 含量在不同土层中均低于 T 处理。

在小麦收获后,各处理下 0~30 cm 土层平均 LFOC 含量变化范围为 0.56~1.00 g·kg⁻¹,变化趋势为 TS > NTS > NTP > NT > T > TP。在 0~5、5~10 cm 土层内,NTS 和 TS 处理 LFOC 含量显著高于 T 处理,分别较 T 处理提高了 1.64 g·kg⁻¹和 0.88、0.52 g·kg⁻¹和 0.59 g·kg⁻¹,在 10~30 cm 土层内 NTS 和 TS 处理与 T 处理之间没有显著差异。而 TP 处理在各个土层中均与 T 处理之间没有显著差异。从小麦播种前至收获后,NTP 处理下 0~30 cm 土层 LFOC 含量有所增加,其余处理均降低。

2.2.2 耕作措施对豌豆地 0~30 cm 土层中轻组有机碳的影响 由表 5 可看出,豌豆地土壤 LFOC 含量在土壤剖面上的变化趋势与小麦地一致,表现为随着土层的加深而逐渐减少。在播种前,0~30 cm

土层内 LFOC 平均含量变化范围为 0.65 ~ 1.02 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 TS 处理下最大, NTS 处理次之, T 和 TP 处理最小, TS、NTS 处理下 LFOC 平均含量比 T 处理分别提高了 58.40%、53.64%。在 5 ~ 10 cm 土层中 NTS 和 TS 处理下 LFOC 含量显著高于 T 处理, 但在 0 ~ 5、10 ~ 30 cm 土层中各个处理之间均没有显著差

异。收获后, 0 ~ 30 cm 土层内 LFOC 平均含量 NTS 处理下最高, T 处理最低; 在 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 30 cm 土层内 NTS 处理下 LFOC 含量显著高于 T 处理, 分别较 T 提高了 94.56%、108.73%, TP 和 NT 处理与 T 处理之间差异不显著。同年豌豆播种前至收获后, 各处理下 0 ~ 30 cm 土层 LFOC 含量均有所下降。

表 4 小麦—豌豆轮作序列下 0 ~ 30 cm 土层轻组有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$

Table 4 The content of light fraction organic carbon in the soil layer of 0 ~ 30 cm in the wheat - pea crop rotation sequence

处理 Treatment	播前 Before sowing				收后 After harvest			
	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	平均 Mean	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	平均 Mean
T	1.01 ± 0.07b	0.96 ± 0.05b	0.77 ± 0.02ab	0.84	0.86 ± 0.05c	0.74 ± 0.12b	0.46 ± 0.06ab	0.57
NTS	2.30 ± 0.52a	1.72 ± 0.30a	1.21 ± 0.33a	1.48	2.50 ± 0.16a	1.26 ± 0.12a	0.54 ± 0.13a	0.99
NT	1.04 ± 0.16b	0.96 ± 0.35b	0.82 ± 0.08ab	0.88	1.69 ± 0.30b	0.98 ± 0.13ab	0.46 ± 0.07ab	0.75
TS	1.43 ± 0.07b	1.20 ± 0.27ab	0.93 ± 0.15ab	1.06	1.74 ± 0.04b	1.33 ± 0.13a	0.74 ± 0.07ab	1.00
TP	0.86 ± 0.07b	0.78 ± 0.12b	0.67 ± 0.05b	0.72	0.85 ± 0.12c	0.78 ± 0.14b	0.43 ± 0.08b	0.56
NTP	1.05 ± 0.15b	0.79 ± 0.10b	0.67 ± 0.04b	0.75	1.71 ± 0.31b	1.02 ± 0.17ab	0.67 ± 0.06ab	0.90

表 5 豌豆—小麦轮作序列下 0 ~ 30 cm 土层轻组有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$

Table 5 The content of light fraction organic carbon in the soil layer of 0 ~ 30 cm in the pea - wheat crop rotation sequence

处理 Treatment	播前 Before sowing				收后 After harvest			
	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	平均 Mean	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	平均 Mean
T	0.81 ± 0.14a	0.73 ± 0.15b	0.58 ± 0.02a	0.65	0.96 ± 0.01ab	0.52 ± 0.01b	0.28 ± 0.04b	0.44
NTS	1.47 ± 0.65a	1.11 ± 0.03a	0.84 ± 0.09a	0.99	1.81 ± 0.26a	1.02 ± 0.14a	0.59 ± 0.05a	0.87
NT	0.95 ± 0.06a	0.87 ± 0.11ab	0.65 ± 0.03a	0.74	1.29 ± 0.61ab	0.58 ± 0.15b	0.45 ± 0.21ab	0.61
TS	1.05 ± 0.07a	1.07 ± 0.10a	1.00 ± 0.25a	1.02	1.52 ± 0.05ab	0.93 ± 0.23ab	0.57 ± 0.07ab	0.78
TP	0.73 ± 0.06a	0.79 ± 0.12ab	0.60 ± 0.03a	0.65	0.94 ± 0.11b	0.63 ± 0.08ab	0.31 ± 0.04ab	0.47
NTP	1.02 ± 0.18a	0.82 ± 0.07ab	0.66 ± 0.11a	0.75	1.11 ± 0.11ab	0.67 ± 0.10ab	0.41 ± 0.08ab	0.57

由此可见, 在两种轮作模式下, 0 ~ 30 cm 土层 LFOC 含量在土壤剖面上的变化依旧是随着土层的加深而逐渐减小。作物播种前与收获后土壤轻组有机碳对不同耕作措施的反应基本一致。相对于传统耕作 T, 保护性耕作 NTS 和 TS 处理有利于提高土壤中 LFOC 含量, 而 TP 处理下 LFOC 含量与 T 之间没有差异, 甚至小于 T 处理。从播前至收后, 两种轮作模式下 LFOC 的变化各有不同, 没有明显规律。

2.3 土壤总有机碳和轻组有机碳之间的相关性分析

由图 2 可以看出, 土壤总有机碳与轻组有机碳之间呈极显著正相关, 且存在线性关系。这一方面说明土壤轻组有机碳的含量在很大程度上依赖总有机碳的含量; 另一方面, 说明轻组有机碳在指示耕作措施影响土壤碳库变化方面较总有机碳更为灵敏。

3 结论与讨论

土壤有机碳对土壤的物理性质、化学性质、生物学性质都十分重要, 被认为是评价土壤质量最重要

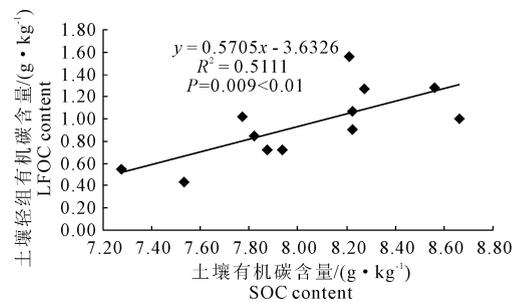


图 2 土壤轻组有机碳与总有机碳的相关性

Fig.2 The correlation of soil organic carbon and light fraction organic carbon

的指标之一, 其含量的变化不仅可以引起土壤肥力和持水能力的变化, 还可引起大气中 CO_2 浓度较大的波动, 进而影响全球气候的变化。关于耕作措施影响土壤有机碳动态变化的研究表明, 长期耕作的土壤其表层、亚表层中的有机碳储量较自然植被土壤减少^[15]。而免耕改善了土壤结构, 使土壤团聚体数量和稳定性增加, 减少了有机碳的降解^[16]。另

外,免耕还具有一定程度的土壤培肥作用^[17]。West^[18]等的研究发现免耕代替传统耕作后,土壤有机碳储存量平均每年增加 $57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。秸秆本身含有大量的碳,还田分解后加强了土壤微生物的活动,同时释放出无机碳、氮,形成土壤有机质^[19-20]。

本试验研究表明,两种轮作系统下,免耕秸秆覆盖 NTS 和传统耕作 + 秸秆翻入 TS 处理均能显著提高土壤总有机碳含量,且各个土层中 NTS 处理下土壤 SOC 含量均高于 TS 处理;在播种前,小麦地中 NTS 和 TS 处理下 0~30 cm 土层内 SOC 和 LFOC 平均含量较 T 处理分别提高了 19.71% 和 13.91%、75.52% 和 25.76%;豌豆地中 NTS 和 TS 处理下 0~30 cm 土层内 SOC 和 LFOC 平均含量较 T 处理分别提高了 19.31% 和 12.82%、53.64% 和 58.40%。收获后,小麦地中 NTS 和 TS 处理下 0~30 cm 土层内 SOC 和 LFOC 平均含量较 T 处理分别提高了 28.03% 和 18.37%、72.35% 和 75.79%;豌豆地中 NTS 和 TS 处理下 0~30 cm 土层内 SOC 和 LFOC 平均含量较 T 处理分别提高了 27.96% 和 18.86%、98.39% 和 79.84%。以上结果说明,在陇中黄土高原地区,免耕秸秆覆盖和秸秆翻埋有利于土壤中总有机碳和轻组有机碳的积累,且免耕秸秆覆盖较秸秆翻埋更加有效。另外,土壤轻组有机碳的含量在很大程度上依赖总有机碳的含量,且轻组有机碳在指示耕作措施影响土壤碳库的变化上较总有机碳更为灵敏。TP 和 NT 处理下, SOC 和 LFOC 含量略高于 T 处理,但差异不显著,这表明单纯的免耕不能提高土壤有机碳含量。而地膜覆盖提高了地温,加速了有机质的矿化^[21]。这与前人的研究结果一致^[22-23]。在作物生育期间,保护性耕作 NTS 和 TS 处理下土壤 SOC 损耗的量最小,TP 和 NT 则加大了土壤有机碳的损耗。但是,不同处理下轻组有机碳在生育期前后的变化在两种轮作序列中表现不一,没有明显的变化规律。因此,在该区采用以免耕、秸秆覆盖为主要技术环节的保护性耕作有利于提高土壤肥力,其中免耕和秸秆覆盖结合效果最佳。

参考文献:

[1] 郭清毅,黄高宝.保护性耕作对旱地麦—豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):165-169.

[2] 曹丽花,赵世伟.土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(3):177-182.

[3] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究

进展[J].地球科学进展,2005,20(1):99-105.

- [4] 吴建国,张小全.土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J].林业科学,2002,38(4):19-29.
- [5] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[C]//Advances in soil science. New York: Springer, 1992:1-90.
- [6] 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.
- [7] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol[J]. Soil and Tillage Research, 2003,70(2):107-119.
- [8] Gan Y T, Huang G B. Unique conservation tillage practices in Northwest China. No-till farming systems[J]. World Association of Soil and Water Conservation (WASWC), 2008, (3):429-444.
- [9] Huang G B, Zhang R Z, Li G D, et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. Field Crops Research, 2008,107(1):43-55.
- [10] 王新建,张仁陟,毕冬梅,等.保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):115-121.
- [11] 蔡立群,齐鹏,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对麦—豆轮作土壤有机碳库的影响[J].中国生态农业学报,2009,7(1):1-6.
- [12] Tan Z, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice [J]. Soil and Tillage Research, 2007,92(1):53-59.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:30-38.
- [14] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(6):1799-1806.
- [15] 张金波,宋长春.土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J].生态环境,2003,12(4):500-504.
- [16] 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):89-96.
- [17] 孙利军,张仁陟,黄高宝.保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):207-211.
- [18] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(6):1930-1946.
- [19] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等.土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J].生态学报,2003,23(4):787-796.
- [20] 罗珠珠,黄高宝,张仁陟,等.长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤肥力质量的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):458-464.
- [21] 黄高宝,李玲玲,张仁陟,等.免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):1-4,19.
- [22] 罗珠珠,黄高宝,辛平,等.陇中旱地不同保护性耕作方式表土层土壤结构和有机碳含量比较分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):53-58.
- [23] 宋秋华,李凤民,王俊,等.覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响[J].生态学报,2002,22(12):2125-2132.