

不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系

张英英^{1,2,4}, 蔡立群^{1,2,3}, 武 均^{1,2}, 齐 鹏^{1,2}, 罗珠珠^{1,2,3}, 张仁陟^{1,2,3}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃 武威 733006)

摘 要: 通过设置在陇中黄土高原半干旱雨养农业区 15 年的不同保护性耕作措施长期定位试验, 研究了传统耕作(T)、免耕(NT)、免耕结合秸秆覆盖(NTS)、传统耕作结合秸秆还田(TS)4 种不同耕作措施下不同土层的土壤总有机碳、土壤活性有机碳、土壤微生物量、碳库管理指数和土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶和过氧化物酶等 4 种参与碳循环土壤酶, 并分析了土壤有机碳及其活性碳组分与土壤酶之间的相关关系。结果表明: 0~30 cm 土层, NTS 处理可显著提高土壤有机碳、土壤活性有机碳、土壤微生物量碳及碳库管理指数, 分别较 T 处理增加了 16.3%、28.26%、41.88%、37.04%, NT、TS 处理较 T 处理各指标也均有不同程度提高; 在 0~30 cm 土层, NTS、TS、NT 处理与 T 处理相比, 蔗糖酶分别提高了 33.84%、21.59%、25.15%, 淀粉酶活性分别提高了 20.90%、13.43%、12.69%, 纤维素酶活性分别提高了 39.13%、17.39%、4.34%, 过氧化物酶活性分别提高了 7.81%、2.08%、3.65%; 土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、过氧化物酶与各形态有机碳及碳库管理指数均表现为显著或极显著正相关关系; 蔗糖酶活性增加对有机碳积累作用最显著, 有助于土壤总有机碳、活性有机碳、微生物量碳含量提高, 土壤纤维素酶对土壤总有机碳和活性有机碳含量的增加有促进作用, 过氧化物酶有利于总有机碳的积累。免耕结合秸秆覆盖是适宜该地区农田生态系统健康稳定发展, 减少碳库损失的重要途径。

关键词: 耕作措施; 土壤有机碳; 土壤酶; 活性碳组分

中图分类号: S154.2 **文献标志码:** A

The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu province

ZHANG Ying-ying^{1,2,4}, CAI Li-qun^{1,2,3}, WU Jun^{1,2}, QI-Peng^{1,2}, LUO Zhu-zhu^{1,2,3}, ZHANG Ren-zhi^{1,2,3}

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Faculty of Resource and Environment of Gansu Agri-cultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Gansu Province agricultural water-saving engineering research center, Lanzhou, Gansu 730070, China;
4. Gansu Institute of Agricultural Engineering Technology, Wuwei, Gansu 733006, China)

Abstract: Based on long-term conservation tillage experiments at Dingxi in the rain-fed field of western Loess Plateau in Gansu province, we investigated the effects of four types of tillage methods, including conventional tillage(T), no tillage no stubble retention (NT), no tillage with stubble retention(NTS) conventional tillage with stubble retention (TS), on soil organic carbon, soil labile organic carbon, soil microbial biomass carbon, carbon pool management and four kinds of soil enzymes involved in carbon cycling were invertase, diastase, cellulase and peroxidase. Aanalysis of the relationship between soil organic carbon and labile carbon fractions and soil enzymes showed that compared with T treatment NTS improved soil organic carbon, soil active organic carbon, soil microbial biomass carbon and carbon pool management index, by 16.3%, 28.26%, 41.88%, 37.04%, respectively. Compared with T, NTS, TS, NT improved the

收稿日期: 2016-02-10
基金项目: 国家自然科学基金(31160269, 31571594); “十二五”循环农业科技工程项目(2012BAD14B03); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地开放基金(GSCS-2013-13); 甘肃省高等学校科研项目(2014A-058)
作者简介: 张英英(1991—), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: 495285884@qq.com。
通信作者: 张仁陟(1961—), 男, 甘肃静宁人, 博士生导师, 主要从事保护性耕作、节水农业及恢复生态学方面的研究。E-mail: zhangrz@gsau.edu.cn。

soil invertase, diastase, cellulase, peroxidase activities in 0~30 cm depth of soil, invertase activity were increased by 33.84%, 21.59%, 25.15%, diastase activity by 20.90%, 13.43%, 12.69%, cellulase activity by 39.13%, 17.39%, 4.34%, peroxidase activity by 7.81%, 2.08%, 3.65%. Soil invertase, diastase, cellulase, peroxidase and labile organic carbon fractions and carbon pool management index were significantly positive correlation. With the increase in invertase activities, it was benefit to increase the concentration of total organic carbon, soil labile organic carbon and soil microbial biomass carbon, and the invertase played a vital role in the accumulating of soil organic carbon pool, soil cellulase has great effect on soil organic carbon and soil labile organic carbon. Peroxidase favourable for the accumulation of total organic carbon. No tillage with straw cover is suitable for the healthy and stable development of the farmland ecosystem in this region as an important way to reduce losses for carbon pool.

Keywords: tillage methods; soil organic carbon; soil enzymes; soil labile organic carbon fractions

土壤有机碳库是维持土壤生态系统碳平衡、稳定、健康与可持续的关键因素^[1],土壤有机碳库的变化是引起全球气候变化和大气碳库变化的主要原因^[2],而农田土壤碳库作为土壤碳库的核心组成,由于频繁受到人为活动干扰,其活性有机碳及其组分不断处于动态变化当中,提高农田土壤固碳能力和维持土壤碳库平衡,是有效缓解全球气候变化和减少碳损失的重要途径之一^[3]。而土壤酶及其微生物作用参与的生物化学过程使得土壤有机碳形态不断转化是导致土壤活性碳库及功能改变的关键因素,土壤酶参与土壤活性碳库分解转化、影响生物呼吸强度,进而导致物质能量循环转化过程的变化,使得最易分解、矿化的活性碳部分对环境改变非常灵敏迅速做出响应^[4-5];其中土壤活性有机碳直接参与土壤生物化学转化过程直接为微生物提供碳源,土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶等均是参与土壤有机碳循环的重要酶,主要参与植物有机体中淀粉、纤维素、多糖、碳水化合物等的分解,过氧化物酶能氧化有机质,能促进土壤有机物质氧化成酞,研究土壤酶活性将有助于揭示土壤发生和各种土壤代谢过程物质转化和能量流动的实质^[6]。目前,长期过渡的农业生产活动如耕作措施等人为干扰对于土壤碳库及其碳组分形态的转变有巨大影响,使得土壤碳库与大气碳库的平衡遭到严重破坏,对土壤农田生态系统可持续发展造成不利影响^[3,7]。由于过度的耕作措施对耕层土壤干扰的深度和程度不同,使土壤结构发生改变,有机碳形态和酶活性分布也存在很大差异^[8]。针对碳循环的酶类与有机碳及其组分的关系研究主要集中在湿地、林地、山地等不同的土壤类型^[9-13],对于不同耕作措施下的旱作农田土壤参与碳循环的酶类与有机碳组分间关系研究还不够深入。因此,通过研究黄土高原旱作农业地区不同耕作措施下土壤有机碳以及其有机碳组分与土壤酶活性之间的相关关系,试图从生物化学角度阐明土壤

有机碳及活性碳组分周转变化的影响,揭示人为干扰对有机碳及其形态转变的影响,为该地区选择有利于生态环境健康发展的合理耕作模式,对稳定和增加该地区土壤有机碳含量,减少土壤碳的净排放量,保持农田生态系统良好运转有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黄土高原半干旱丘陵沟壑区定西市李家堡镇甘肃农业大学旱农综合实验站,属中温带半干旱区,平均海拔 2 000 m,平均降水量 390.9 mm,年蒸发量 1 531 mm,80% 保证率的降水量为 365 mm,变异系数为 24.3%,试区农田土壤为典型的黄绵土,质地均匀,土性绵软,疏松多孔。

1.2 试验设计

试验始于 2001 年,种植模式为豌豆—小麦轮作,共设 4 个处理,随机区组排列,各处理 3 次重复,小区面积 $20\text{ m} \times 4\text{ m} = 80\text{ m}^2$,处理描述如表 1。供试作物为春小麦“定西 40 号”,播种量 $187.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 20 cm,各处理均施纯 N $105\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (尿素, N46%),纯 P_2O_5 $105\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (过磷酸钙, P_2O_5 14%);前茬供试作物为豌豆“绿农 1 号”,播种量 $180\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 24 cm,各处理均施纯 N $20\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (尿素, N46%), P_2O_5 $105\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (过磷酸钙, P_2O_5 14%),所有肥料均作为基肥播种时同时施入。覆盖处理所用秸秆为前茬作物秸秆,收获后打碾切碎均匀撒布于小区内。

1.3 样品采集

于 2015 年 8 月上旬小麦收获后,在各小区利用五点取样法分别采集 0~5、5~10、10~30 cm 各土层土样并混合均匀,一部分新鲜土样过 2 mm 筛后 4℃ 保存,用于测定土壤酶活性和土壤微生物量碳,剩余样品风干后过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用,用于土壤有机碳与土壤活性有机碳的测定。

表 1 试验处理
Table1 1 Brief description of treatments

代码 Code	处理 Treatment	操作方法 Operation
T	传统耕作 Conventional tillage	作物收获后至冻结前三耕两耧,翻耕深度依次为 20、10 cm 和 5 cm。 After harvesting the crops, the fields were tilled 3 times into 20, 10 cm and 5 cm, and leveled 2 times before it freezes.
NT	免耕 No till with no straw	全年不耕作,播种用免耕播种机一次性完成播种和施肥。 No-till for the whole year, no straw cover.
NTS	免耕结合秸秆覆盖 No tillage with stubble retention	耕作、播种同 NT,收获后将当年所有秸秆均匀覆盖于原小区。 The till and sowing methods as NT, but all the straws will cover surface in plot.
TS	传统耕作结合秸秆还田 Conventional tillage with straw incorporated	耕作方式同 T,在第 1 次耕作时将前茬作物秸秆翻埋入土。 The till methods is the same as T, straw from the previous crop will be sent back to the o- riginal plot after threshing and then incorporated into ground.

1.4 测定方法

1.4.1 土壤有机碳及活性碳组分测定 土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法^[14];活性有机碳测定采用 333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法,在 565 nm 下比色测定^[15],土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法^[16],转化系数为 0.38。

1.4.2 土壤碳库指数计算方法 碳库指数及碳库管理指数计算方法如下:碳库指数(CPI) = 土壤有机碳/参考土壤有机碳;碳库活度(A) = 活性碳/非活性有机碳;碳库活度指数(AI) = 碳库活度/参考土壤碳库活度;碳库管理指数(CPMI) = 碳库指数(CPI) × 碳库活度指数(AI) × 100。本文以传统耕作(T)为参考土壤。

1.4.3 土壤酶活性测定 蔗糖酶活性:3,5 - 二硝基水杨酸比色法^[17];淀粉酶活性:3,5 - 二硝基水杨酸比色法^[17];纤维素酶活性:3,5 - 二硝基水杨酸比色法^[17];过氧化物酶活性:邻苯三酚比色法^[17]。本实验测定土壤酶活性所采用土样均为新鲜土,结果均根据含水量换算为干土。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据统计分析均采用 EXCEL2010 和 SPSS19.0,运用 Duncan 法进行显著性检验,选 Pearson 系数进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对土壤有机碳及活性碳组分和碳库管理指数的影响

不同耕作措施下土壤总有机碳及活性碳组分和土壤碳库管理指数随土层变化见表 2,土壤总有机碳在 0~5 cm 土层表现为 NTS 与 TS 显著高于 T 处理,分别较 T 处理增加了 2.59、0.82 g·kg⁻¹;且 NTS 处理显著高于 TS 处理,TS 处理显著高于 NT 与 T 处理,但 NT 与 T 处理间差异不显著,5~10 cm 土层,

NTS 处理显著高于 NT、TS、T 处理,但 NT、TS 与 T 处理间均无显著性差异,10~30 cm 土层表现为 NTS、TS 处理显著高于 NT、T 处理,且 NTS 与 TS 处理,NT 与 T 处理均无显著差异。0~30 cm 土层土壤有机碳含量大小为 NTS>TS>NT>T,分别较 T 处理增加了 16.3%、7.56%、1.91%。

土壤活性有机碳 0~5 cm 土层表现出与有机碳相似的规律变化,NTS、TS 处理显著高于 T 处理,分别较 T 处理增加了 1.71、0.91 g·kg⁻¹;且 NTS 显著高于 NT、TS 处理,NT 与 TS、T 均不显著。5~10 cm 土层表现为 NTS 显著高于 NT、T 处理,分别增加了 0.76、0.71 g·kg⁻¹,但与 TS 处理不显著;TS、NT、T 处理间均无显著差异;10~30 cm 土层不同耕作措施之间均未表现出显著性差异。0~30 cm 土层土壤活性有机碳含量大小为 NTS>TS>NT>T,分别较 T 处理增加了 28.26%、15.54%、4.59%。

不同耕层措施下土壤微生物量碳与土壤活性有机碳变化规律一致。0~5 cm 土层表现为 NTS、TS 处理显著高于 T 处理,分别较 T 处理增加了 99.56、45.86 mg·kg⁻¹;且 NTS 处理显著高于 NT、TS 处理,NT 与 TS、T 处理差异均不显著。5~10 cm 土层表现为 NTS 处理显著高于 NT、T 处理,分别增加了 68.41、57.46 mg·kg⁻¹,但与 TS 处理差异不显著;TS、NT、T 处理间均无显著差异;10~30 cm 土层表现为 NTS 处理显著高于 T 处理,增加了 48.82 mg·kg⁻¹;NT 与 TS、T 处理间无显著差异。0~30 cm 土层微生物量碳含量大小为 NTS>TS>NT>T,分别较 T 处理增加了 41.88%、21.60%、6.99%。

不同耕作措施下,0~5 cm 碳库管理指数较 T 处理均有明显提高,NTS、TS 处理显著高于 T 处理,与 T 处理相比分别增加了 72.9%、43.5%,且 NTS 与 TS 处理、NT 与 TS、T 处理均无显著性差异;5~10 cm 土层表现为 NTS 处理显著高于 NT、T 处理,分别

提高了 30.91%、26.81%,NTS 与 TS、TS 与 NT、T 处理间均未表现出显著性差异。10~30 cm 土层不同耕作措施对碳库管理指数影响均不显著,说明土壤碳库管理指数的变化主要集中在 0~10 cm 土壤表层。0~30 cm 土层碳库管理指数大小为 NTS>TS>

NT>T,分别较 T 处理提高了 37.04%、21.57%、6.56%;3 种不同保护性耕作措施相对于传统耕作,均提高了碳库管理指数,改善了土壤肥力,提高了土壤的综合生产能力。

表 2 不同耕作措施下土壤有机碳及活性碳组分和碳库管理指数的变化

Table 2 The change of composition of soil organic carbon and soil carbon pool management index under different tillage measures					
土层深度/cm Depth	处理 Treatment	总有机碳 Total organic carbon /(g·kg ⁻¹)	活性有机碳 Labile organic carbon /(g·kg ⁻¹)	微生物量碳 Microbial biomass carbon /(mg·kg ⁻¹)	碳库管理指数 Carbon pool management index
0~5	NT	9.44c	3.58bc	178.38bc	122.25bc
	NTS	11.86a	4.84a	260.00a	172.94a
	T	9.27c	3.13c	160.44c	100.00c
	TS	10.09b	4.04b	206.30b	143.50ab
5~10	NT	9.26b	3.36b	167.47b	96.87b
	NTS	10.23a	4.12a	235.88a	126.81a
	T	9.12b	3.41b	178.42b	100.00b
	TS	9.41b	3.66ab	208.05ab	110.39ab
10~30	NT	8.41b	3.09a	180.02ab	100.55a
	NTS	8.84a	3.34a	201.49a	111.36a
	T	8.21b	3.05a	152.67b	100.00a
	TS	9.11a	3.38a	183.37ab	110.82a

注:不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at $P<0.05$ level. The same below.

2.2 不同耕作措施对土壤酶活性的影响

不同耕作措施下,4 种参与碳循环的土壤酶随土层的变化呈现出相似的变化规律,NTS、NT 处理下 4 种酶活性均随土层的加深酶活性降低,TS、T 处理下除蔗糖酶随土层加深表现为先增后减外,其他 3 种酶随土层加深而酶活性降低。不同耕作措施下土壤酶变化主要体现在 0~10、10~30 cm 土层,各处理土壤酶活性均没有显著性差异。0~5 cm 土层土壤蔗糖酶表现为 NTS、NT、TS 处理均显著高于 T 处理,分别较 T 处理提高了 60.46%、46.42%、35.86%,且 NTS 处理显著高于 NT 与 TS 处理;5~10 cm 土层 NTS、NT、TS 处理均显著高于 T 处理,分别提高了 22.03%、13.23%、20.80%;土壤淀粉酶表现为 0~5 cm 土层 NTS、NT 处理显著高于 T 处理,分别提高了 30.67%、19.63%,且 NTS 与 NT 处理、TS 与 T 处理均无显著差异;5~10 cm 土层不同处理间差异不显著。纤维素酶在 0~5、5~10 cm 土层表现为 NTS 处理显著高于 NT、T 处理,且 NT、TS、T 处理间差异不显著,NTS 较 T 处理在 0~5、5~10 cm 分别提高了 55.56%、30.77%;过氧化物酶在 0~5 cm 表现为 NTS 显著高于 T 处理,且 NTS、TS、NT 处理与 TS、NT、T 处理之间差异均不显著,NTS 较 T 处理相比过

氧化物酶提高了 11.40%;且 5~10 cm 土层各处理均无显著性差异。经过 15 年的 3 种不同保护性耕作措施处理,在 0~30 cm 土层,土壤酶活性较传统耕作均不同程度有所提高,NTS、TS、NT 处理与 T 处理相比,蔗糖酶分别提高了 33.84%、21.59%、25.15%;淀粉酶活性分别提高了 20.90%、13.43%、12.69%;纤维素酶活性分别提高了 39.13%、17.39%、4.34%;过氧化物酶活性分别提高了 7.81%、2.08%、3.65%。

2.3 土壤有机碳及其活性组分与土壤酶活性的相关性分析

对土壤总有机碳及其活性有机碳、微生物量碳、碳库管理指数与 4 种参与碳循环酶活性进行相关分析结果表明(表 3),土壤总有机碳与活性有机碳、微生物量碳、碳库管理指数呈现极显著正相关关系,与土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、过氧化物酶 4 种参与碳循环的酶也均呈现极显著正相关关系;土壤活性有机碳、土壤微生物量碳与土壤碳库管理指数与本研究涉及的参与碳循环的 4 种酶呈现显著或极显著正相关,土壤碳库管理指数与土壤活性有机碳的相关性高于与总有机碳的相关性,说明活性有机碳组分与总有机碳密切相关又不同于总有机碳,是

土壤总有机碳的一部分。土壤酶活性相关性分析表明 4 种土壤酶活性均呈现极显著正相关关系。这说明在参与整个碳循环生物化学过程中进行酶促反应

时,土壤酶不仅发挥自身的专一性,而且各种酶间通过相互协调,在一定程度上可能会激发和诱导其他酶活性^[18],共同促进植物所需营养元素的转化。

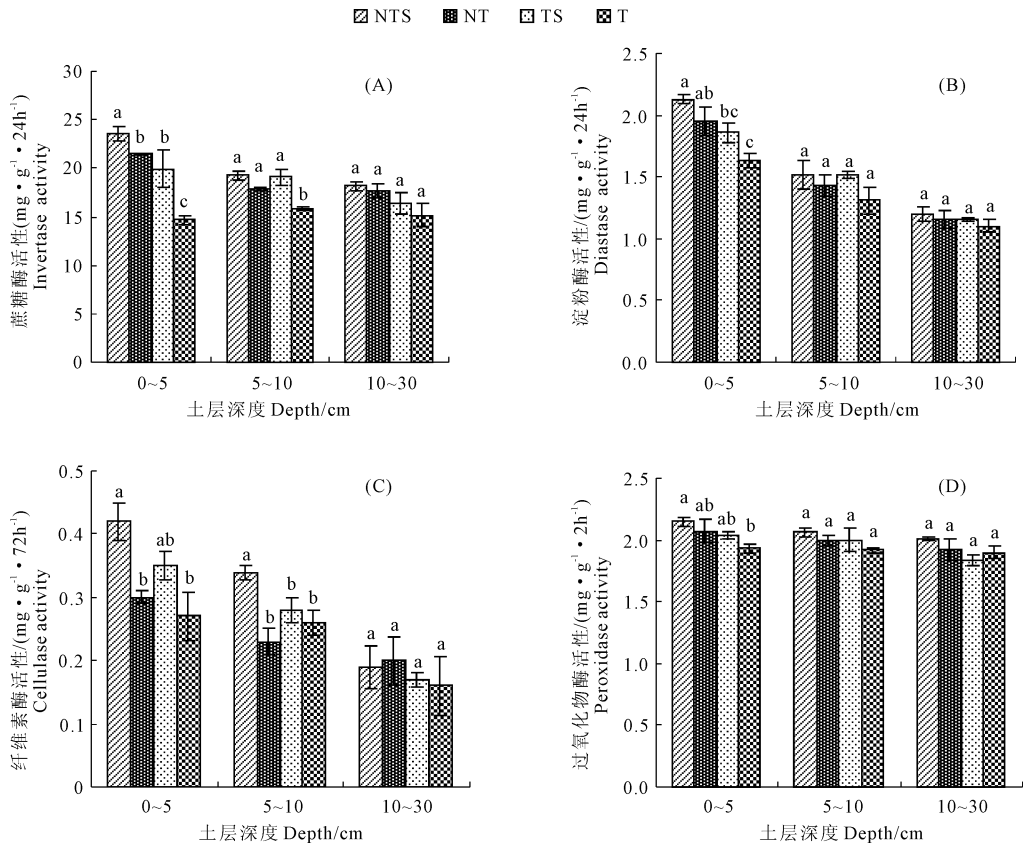


图 1 不同耕作措施下土壤酶活性的变化

Fig.1 The variation of soil enzymes under different tillage measures

表 3 土壤有机碳及其活性碳组分与土壤酶活性相关关系

Table 3 The correlation coefficients between soil organic carbon fractions and enzymatic activities

指标 Index	总有机碳 Total organic carbon	活性有机碳 Labile organic carbon	微生物量碳 Microbial biomass carbon	碳库管理指数 Carbon pool management index	蔗糖酶 Invertase	淀粉酶 Diastase	纤维素酶 Cellulase
活性有机碳 Labile organic carbon	0.856 **						
微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.714 **	0.680 **					
碳库管理指数 Carbon pool management index	0.772 **	0.931 **	0.595 **				
蔗糖酶 Invertase	0.746 **	0.821 **	0.604 **	0.795 **			
淀粉酶 Diastase	0.791 **	0.634 **	0.425 **	0.642 **	0.622 **		
纤维素酶 Cellulase	0.805 **	0.706 **	0.499 **	0.622 **	0.598 **	0.786 **	
过氧化物酶 Peroxidase	0.610 **	0.381 *	0.485 **	0.342 *	0.472 **	0.529 **	0.489 **

注: ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$); * 表示显著相关 ($P < 0.05$) ($n = 36$)。

Note: ** indicate highly significant correlation ($P < 0.01$); * indicate significant correlation ($P < 0.05$) ($n = 36$).

以不同耕作措施下的土壤蔗糖酶活性 (X_1)、淀粉酶活性 (X_2)、纤维素酶活性 (X_3)、过氧化物酶活性 (X_4)作为自变量,土壤有机碳 (Y)、土壤活性有机

碳 (Y_1)、土壤微生物量碳 (Y_2)分别作为因变量进行逐步回归分析,结果可得,蔗糖酶活性、纤维素酶活性、过氧化物酶活性的提高有助于土壤总有机碳含

量增加,土壤蔗糖酶与纤维素酶有利于活性有机碳的积累,而蔗糖酶活性提高有利于微生物量碳含量提高(表 4)。进一步分析发现,蔗糖酶活性对土壤

有机碳及其活性碳组分影响最大,纤维素酶次之,说明土壤酶活性对土壤活性有机碳库的周转具有重要作用。

表 4 土壤酶活性与土壤有机碳及活性组分的回归分析

Table 4 Analysis of relationships between composition of soil organic carbon and enzyme activities by stepwise regression equation				
指标 Index	回归方程 Linear regression equation	决定系数 Adjust R square	F 值 F value	显著性水平 Signification
总有机碳 Total organic carbon	$Y = 0.126X_1 + 5.441X_3 + 1.579X_4 + 2.576$	0.766	39.116	<0.01
活性有机碳 Labile organic carbon	$Y_1 = 0.131X_1 + 2.19X_3 + 0.635$	0.731	48.462	<0.01
微生物量碳 Microbial biomass carbon	$Y_2 = 8.27X_1 + 44.829$	0.346	19.512	<0.01

3 结论与讨论

不同耕作措施下,0~5 cm 和 5~10 cm 土层土壤总有机碳、活性有机碳、土壤微生物量碳及碳库管理指数均为免耕结合秸秆覆盖显著高于传统耕作,秸秆还田在 0~5 cm 土层显著高于传统耕作,5~10 cm 土层均高于传统耕作,但未达显著水平,0~10 cm 土层免耕高于传统耕作,未达显著水平。10~30 cm 土层免耕结合秸秆覆盖与秸秆还田下土壤总有机碳高于传统耕作,免耕结合秸秆覆盖微生物量碳显著高于传统耕作外,不同耕作措施间无显著性差异。不同耕作措施对土壤有机碳及其有机碳组分的影响主要体现在 0~10 cm 土层,对 10~30 cm 土层影响较小,与前人研究结果一致^[19-21],但也有报道长期秸秆还田并未显著提高土壤有机碳含量^[22],这可能是土壤类型、气候条件不同所引起。不同耕作措施下土壤总有机碳变化说明传统耕作使得表层土壤结构遭到破坏,加速了土壤有机碳的矿化速率^[7],使潜在生物有效碳库在没有外界有机物供给下不断暴露在空气中,加速了有机碳库损失^[20]。土壤有机碳库在复杂的外部与内部环境的综合作用下处于不断累积和分解的动态变化过程,而土壤微生物量碳与土壤活性有机碳作为土壤碳组分中最活跃的部分,与土壤总有机碳相比,对其响应更为敏感^[4,23],免耕可使土壤保持良好的结构,并有效减缓土壤有机质矿化速率,有利于土壤有机质的积累,为微生物提供了良好的水、热条件和活动空间,而秸秆覆盖或秸秆还田为微生物提供了大量可被利用的营养物质,有利于微生物加快生长繁殖速率,使得土壤微生物量碳含量明显提高。传统耕作下,土壤因频繁扰动,改变了土壤表层良好的结构,不断使得表土暴露在空气中,促进了土壤水分蒸散,加之缺乏外源有机物料的补充,继而极大程度地影响了土壤微生物生存、繁殖及其活动所需的营养与水、热条件,使得土

壤活性有机碳与土壤微生物量碳含量均少于免耕结合秸秆覆盖、免耕或秸秆还田处理。秸秆覆盖或秸秆还田处理下,0~30 cm 土层因有秸秆作为外源有机物质为土壤提供大量营养物质,使得碳库管理指数较传统耕作相比,均显著提高,尤其对 0~10 cm 土层作用更加明显。免耕不覆盖处理对 0~5 cm 表层作用明显,但对 5~10 cm 和 10~30 cm 土层土壤碳库管理指数作用不明显,说明仅仅免耕而无秸秆覆盖对提高土壤有机碳库管理指数是有局限性、不可持续发展的,这与蔡立群等研究结果相似^[19]。因此,秸秆覆盖或秸秆还田能够提高土壤碳库管理指数,对提高土壤肥力、增加土壤碳库、减少碳库损失及该区农田土壤碳库平衡的保持意义重大。

与传统耕作相比较,免耕覆盖与不覆盖以及传统耕作+秸秆还田均可提高本研究中所测定的 4 种参与碳循环的土壤酶活性,且对于提升表层土壤酶活性的作用更为明显。秸秆覆盖或还田处理,能保持土壤水分和维持土壤表层适宜的温度,提高土壤保水性能和缓冲能力,改善土壤表层理化性质^[24],为土壤酶各种生物化学反应过程创造了良好的环境,在一定程度上激发了酶活性^[25];土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶均能促进有机碳的分解转化,其产物不仅有可供动植物直接利用的小分子有机物,还为土壤微生物提供了大量可被利用的有机质和有效能源^[25],进而促进真菌的生长和植物根系的密集^[7],甚至能形成新的微生物功能群^[26],加之微生物、作物根系、土壤酶的分泌物不断增加,从而促进土壤酶活性显著提高。

通过有机碳及其活性碳组分及碳库管理指数与酶活性的相关关系研究,进一步从生物化学角度阐明了土壤有机碳转化与土壤酶间的相互作用,说明土壤有机碳及其活性碳组分对本研究所测定的 4 种参与土壤碳循环的酶活性变化响应灵敏,酶活性提高有助于有效碳库量提高,进而影响土壤有机碳矿

化速率。有机碳及其活性碳组分与土壤酶之间进行逐步回归表明,土壤蔗糖酶增多,能促进土壤总有机碳、活性有机碳、土壤微生物量碳含量的增加,说明蔗糖酶在土壤有机碳及其活性组分转化过程中发挥了举足轻重的作用,这与万忠梅等^[11-12]的研究结果一致。土壤纤维素酶有助于土壤总有机碳与活性有机碳含量的增加,土壤过氧化物酶主要是促进土壤总有机碳的增加,土壤蔗糖酶、纤维素酶的作用能将土壤中蔗糖和纤维素等碳水化合物分解为较简单的单糖,其为土壤活性有机碳主要的组成部分。而过氧化物酶能氧化土壤有机质,对土壤活性有机碳转变为稳定的腐殖质具有重要作用。土壤有机碳库的变化一直处于一种动态变化中,经过 15 年的不同保护性耕作措施试验,结果表明免耕结合秸秆覆盖、免耕、秸秆还田措施均能够提高土壤有机碳及其活性碳组分含量和提高土壤酶活性,但其生物化学过程及其转变过程是个复杂的过程,受气候、温度、水分等因素影响的综合效应,还有待进一步进行长期更加深入地研究。总之,在陇中黄土高原实施的免耕结合秸秆覆盖是适应该地区农田生态系统健康发展的最佳耕作模式。不同保护性耕作措施,能够改善该区的农业生态环境,保证农业生态系统良好的运转,提高土壤肥力,稳定农业生产发展,对生态环境的保护具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] Mosierar. Soil processes and global change[J]. Biology and Fertility, 1998,27(3):221-22.

[2] 潘根兴.中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J].气候变化研究进展,2008,4(5):282-285.

[3] 张旭博,孙楠,徐明岗,等.全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J].中国农业科学,2014,47(23):4648-4657.

[4] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of eco - enzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003,35(4):549-563.

[5] 姜勇,梁文举,闻大中.免耕对农田土壤生物学特性的影响[J].土壤通报,2004,35(3):347-351.

[6] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1989.

[7] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.

[8] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.

[9] 万忠梅,宋长春,杨桂生,等.三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系[J].环境科学学报,2009,29(2):406-412.

[10] 贾曼莉,郭宏,李会科.渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J].环境科学,2014,35(7):2777-2783.

[11] 万忠梅,宋长春.小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系[J].湿地科学,2008,6(02):249-257.

[12] 沈芳芳,袁颖红,樊后保,等.氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J].生态学报,2012,32(2):517-527.

[13] 马瑞萍,安韶山,党廷辉,等.黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J].土壤学报,2014,51(1):105-113.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2007.

[15] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agriculture research,1995,46(7):1459-1466.

[16] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008.

[17] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986.

[18] 熊明彪,雷孝章,田应兵,等.长期施肥对紫色土酶活性的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(4):60-63,99.

[19] 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,2009,17(1):1-6.

[20] 王晶,张仁陟,李爱宗.耕作方式对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):7-12.

[21] 宋明伟,李爱宗,蔡立群,等.耕作方式对土壤有机碳库的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):622-626.

[22] 张振江.长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响[J].土壤通报,1998,29(4):154-155.

[23] 刘敏英.植茶年限对土壤团聚体组成及其有机碳组分影响[D].雅安:四川农业大学,2012.

[24] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等.几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J].中国生态农业学报,2013,(1):61-69.

[25] 孙建,刘苗,李立军,等.免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响[J].生态学报,2009,29(10):5508-5513.

[26] Riffaldi R, Saviozzi A, LeviMinzi R, et al. Biochemical properties of a Mediterranean soil as affected by long-term crop management systems[J]. Soil & Tillage Research, 2002,67:109-114.