

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

路文涛^{1,2}, 贾志宽^{1,2*}, 张 鹏^{1,2}, 王 维^{1,2}, 侯贤清^{1,2}, 杨保平^{1,2}, 李永平^{1,3}

(1.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部旱地作物生产与生态重点开放实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.固原市农业科学研究所, 宁夏 固原 756000)

摘 要:在宁南旱区通过研究秸秆还田对土壤活性有机碳及酶活性的影响,旨在为该区作物生产及土壤培肥制度的建立提供参考。在为期3 a 秸秆还田定位试验中,设置了不同秸秆还田量处理,谷子秸秆按3 000 kg·hm⁻²(低L)、6 000 kg·hm⁻²(中M)、9 000 kg·hm⁻²(高H)粉碎还田;玉米秸秆按4 500 kg·hm⁻²(低L)、9 000 kg·hm⁻²(中M)、13 500 kg·hm⁻²(高H)粉碎还田,对照为秸秆不还田,对不同处理条件下的土壤有机碳、土壤酶活性及其相关性进行了分析。结果表明,土壤总有机碳、活性有机碳含量和土壤酶活性均随土层的加深而减少;各处理0~60 cm 土层土壤有机碳含量和酶活性大小为中、高量秸秆还田>低量秸秆还田>秸秆不还田;秸秆还田不仅增加了土壤活性有机碳含量,同时提高了活性有机碳占总有机碳含量的比重。相关性分析表明,运用土壤活性有机碳和碳库管理指数表征土壤酶活性及土壤肥力变化,比土壤有机碳更具灵敏性。在宁南半旱区采用秸秆还田能有效提高土壤活性有机碳含量和土壤酶活性。

关键词:秸秆还田;宁南旱区;活性有机碳;土壤酶活性

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0522-07

Effects of Straw Returning on Soil Labile Organic Carbon and Enzyme Activity in Semi-arid Areas of Southern Ningxia, China

LU Wen-tao^{1,2}, JIA Zhi-kuan^{1,2*}, ZHANG Peng^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, HOU Xian-qing^{1,2}, YANG Bao-ping^{1,2}, LI Yong-ping^{1,3}

(1.The Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Crop Production and Ecology, Minister of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Guyuan Institute of Agricultural Sciences, Guyuan 756000, China)

Abstract: The effects of straw returning treatments on soil labile organic carbon and enzyme activities was studied in semi-arid areas of Southern Ningxia for providing a scientific basis of crop production and soil fertilizing system. The different straw returning treatments were 3 000 kg·hm⁻²(L), 6 000 kg·hm⁻²(M) and 9 000 kg·hm⁻²(H) of millet straw and 4 500 kg·hm⁻²(L), 9 000 kg·hm⁻²(M) and 13 500 kg·hm⁻²(H) of corn straw, the CK had no straw returning. The results of three years field experiment showed that in the third experiment year(2009), soil total organic carbon, labile organic carbon and soil enzyme activities decreased with deeper layer; different straw returning treatments had different effects on the contents of soil organic carbon and enzyme activities of 0~60 cm soil layer, follow the order from high to low: middle and high straw returning treatments>low straw returning treatments>CK; straw returning treatment was not only increased the content of soil labile organic carbon, but also improved the proportion of the labile organic carbon accounting for the total organic carbon content. Correlation analysis revealed that soil labile organic carbon and carbon management index may be a better indicator than soil organic matter used to reflect the changes of soil enzyme activities and soil nutrients. In semi-arid areas of Southern Ningxia, the content of soil labile organic carbon and enzyme activities could be improved efficiently by using of straw returning technology.

Keywords: straw returning; semi-arid areas of Southern Ningxia; labile organic carbon; soil enzyme activity

收稿日期:2010-10-16

基金项目:“十一五”国家科技支撑课题“农田集雨保水关键技术研究”(2006BAD29B03);“节水共性技术研究”(2007BAD88B10)

作者简介:路文涛(1986—),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事旱地农业研究。E-mail:040111053@163.com

* 通讯作者:贾志宽 E-mail:zhikuan@tom.com

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,它影响土壤的物理、化学及生物性质,在土壤肥力和植物营养中具有多方面的重要作用^[1]。但土壤有机碳的数量只是一个矿化分解和合成的平衡结果,不能很好地反映转化速率和土壤有机碳质量的变化,活性有机碳与土壤有效养分、土壤的物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,因而成为评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标^[2-3]。土壤酶活性作为衡量土壤质量变化的预警和敏感指标,表征了土壤的综合肥力特征及土壤养分转化进程,它反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向^[4]。土壤活性有机碳和土壤酶活性这两个表征土壤质量和土壤肥力的重要指标,可用来了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势。

秸秆还田技术是当今世界范畴内改善农田生态环境、发展现代农业、旱作农业的重大措施,是节本增效型农业的重要环节,也是促进绿色食品产业和农业可持续发展的有效手段。近年来关于秸秆还田的研究报道较多,主要集中在对土壤物理性状、土壤养分、作物产量及温室气体 CH_4 和 N_2O 的影响等方面^[5-10],对土壤活性有机碳及酶活性的影响虽也时有报道,但多集中于土壤水分条件较好的地区^[11-12],关于半干旱偏旱区秸秆还田对土壤活性有机碳及酶活性的影响尚未见详细报道。为此,于2007—2009年在宁南旱区进行定位试验,通过设置不同秸秆还田量,研究长期秸秆还田条件下对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响,探索适宜当地生产和生态的最适秸秆还田量,为旱农区作物生产及土壤培肥制度的建立提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2007—2009年在宁夏回族自治区彭阳县旱地农业试验区进行。该区海拔1 800 m,地貌类型属黄土高原腹部梁峁丘陵地,土壤质地为黄绵土。该地区年平均降水量430 mm左右,其中70%的降雨集中在7—9月。试验区属典型的温带大陆型气候,年平均气温6~8.5℃,日照时数2 200~2 700 h。境内年蒸发量较大,为650~850 mm,干燥度($\geq 0^\circ\text{C}$ 的蒸发量)为

1.21~1.99,无霜期140~160 d。试验地0~40 cm土层土壤养分状况如表1。

1.2 试验设计

秸秆还田量设4个处理,其中:谷子秸秆按3 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (L)、6 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M)、9 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (H)、0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK)粉碎还田;玉米秸秆按4 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (L)、9 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M)、13 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (H)、0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CK)粉碎还田。每个处理设3次重复,随机区组排列,小区面积为18 m^2 。秸秆被粉碎机打碎成5 cm左右的小段,人工均匀翻埋至不同处理小区25 cm左右深度的土层。

2007年按谷子秸秆还田量于播前进行粉碎还田,4月28日试种玉米,品种为沈单16,密度5.25万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,10月11日收获,玉米收获后按试验设置要求进行玉米秸秆还田;2008年4月28日试种作物为谷子,品种为大同10号,密度30万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,10月17日收获,收获后按谷子秸秆还田量进行粉碎还田;2009年4月22日种玉米,品种为沈单16,密度5.25万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,10月13日收获。2007—2009年施肥水平:以鲁西化工生产的磷酸二氨($\text{N}\geq 17\%$, $\text{P}_2\text{O}_5\geq 45\%$, K_2O 为0)为基肥,播种时一并施入,各处理小区施肥量相同,施用量225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在作物生长期不进行追肥。

1.3 研究方法

1.3.1 采样方法

2009年10月玉米收获后第2 d进行取样。用土钻在各试验小区采集土层深度分别为0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm的土壤作为供试土样。各试验小区随机采集5个样点,同层混合,作为1次重复,每个处理取3次重复,样品采回后,剔除石块和动植物残体等杂质后风干,磨细,过1 mm和0.25 mm筛备用。

1.3.2 测定方法

土壤全量有机碳和土壤酶的测定:土壤全量有机碳采用重铬酸钾外加热法;脲酶采用靛酚蓝比色法^[13];磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法^[14];过氧化氢酶采用重铬酸钾滴定法^[15];蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[14]。

表1 试验地0~40 cm土层土壤养分状况

Table 1 Nutrient status of 0~40 cm soil layer

土层 Soil layer/cm	有机碳 Organic matter/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 Hydro-N/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 Available P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 Available K/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~20	8.95	44.42	6.15	136.26	0.59	0.53	6.85
20~40	8.37	34.07	3.04	88.34	0.42	0.50	5.92

土壤活性有机碳测定及碳库管理指数(CMI)计算:采用 33、167、333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化法分别测定土壤样品中高活性有机碳、中活性有机碳和活性有机碳含量。以对照处理土壤为参照。碳库指数及碳库管理指数等相关指标参照徐明岗等^[16]的方法计算。CMI 计算方法为:

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量(g·kg⁻¹)/参考土壤总有机碳含量(g·kg⁻¹);土壤碳的不稳定性,即碳库活度(L)=样本中的活性有机碳(LOC)/样本中的非活性有机碳(NLOC);碳损失及其对稳定性的影响用活度指数(LI)表示:LI=样本的不稳定性(L)/对照的不稳定性(L0);基于以上参数可以得到:CMI=CPI×LI×100

1.3.3 数据分析

采用 Excel 和 DPS7.05 软件处理分析数据,采用 SPSS17.0 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田量对土壤有机碳和碳库管理指数的影响

不同秸秆还田量对宁南旱作农田土壤 3 种不同程度的活性有机碳、总有机碳及碳库管理指数影响的测定结果列于表 2。可以看出,土壤中 3 种不同程度

的活性有机碳和总有机碳含量在层次上具有明显的规律性,均表现为随着土层深度的增加而减少;秸秆还田的处理效果受土层深度变化的影响比较明显,在 0~20 cm 土层,各指标上秸秆还田处理较 CK 均呈显著性差异(P<0.05),随着土层加深至 40~60 cm,秸秆还田处理较 CK 在土壤总有机碳含量上存在显著差异(P<0.05),其他指标均无显著性差异。

土壤总有机碳(TOC)和碳库管理指数(CMI)受秸秆还田的影响显著,尤其在 0~20 cm 土层,随秸秆还田量由高到低,TOC 和 CMI 分别较 CK 显著提高 6.96%、22.97%、12.41%(P<0.05) 和 35.61%、45.45%、35.45%(P<0.05);在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层也表现出相同的趋势。秸秆还田对土壤活性有机碳(LOC)的影响也很明显,在 0~20 cm 土层,随秸秆还田量由高到低,LOC 含量分别较 CK 显著提高 29.30%、40.76%和 30.57%(P<0.05);秸秆还田处理活性有机碳占总有机碳含量比重为 20.85%~22.02%,显著高于CK处理(18.21%),说明秸秆还田不仅增加了土壤活性有机碳含量,同时也增加了其占总有机碳含量的比重;与活性有机碳相比,高活性有机碳(HLOC)和中活性有机碳(MLOC)含量相对较低,0~20 cm 土层 HLOC 和 MLOC 含量随秸秆还田量由高到低,分别较 CK 显著

表 2 不同秸秆还田量处理下土壤有机碳和碳库管理指数的变化
Table 2 The change of organic matter and soil carbon pool management index in soils treated with different straw returning

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatments	高活性有机碳 Highly labile organic carbon (HLOC)/g·kg ⁻¹	中活性有机碳 Mid-labile organic carbon(MLOC)/ g·kg ⁻¹	活性有机碳 Labile organic carbon(LOC)/ g·kg ⁻¹	总有机碳 Total organic carbon(TOC)/ g·kg ⁻¹	碳库管 理指数 CMI
0~20	H	0.30a	0.68a	2.03b	9.22bc	135.61a
	M	0.28ab	0.69a	2.21a	10.61a	145.45a
	L	0.23bc	0.61b	2.05b	9.69b	135.45a
	CK	0.19c	0.48c	1.57c	8.62c	100.00b
20~40	H	0.21ab	0.33ab	1.43a	8.89a	124.25a
	M	0.25a	0.35a	1.39a	9.13a	119.54ab
	L	0.19b	0.30bc	1.21b	8.09b	103.74ab
	CK	0.17b	0.28c	1.16b	7.52b	100.00b
40~60	H	0.10a	0.23a	0.98a	8.07b	105.42a
	M	0.11a	0.24a	1.01a	8.79a	107.84a
	L	0.08a	0.21a	0.95a	7.10b	103.65a
	CK	0.09a	0.21a	0.91a	6.50c	100.00a
平均 Average	H	0.20a	0.41a	1.48a	8.73b	123.69a
	M	0.21a	0.43a	1.54a	9.51a	127.21a
	L	0.17ab	0.37ab	1.40a	8.29b	117.23ab
	CK	0.15b	0.32b	1.21b	7.55c	100.34b

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Different small letters indicate significant difference at P<0.05 level.

提高 57.89%、47.37%、21.05% ($P<0.05$) 和 41.67%、43.75%、27.08% ($P<0.05$), HLOC 和 MLOC 含量占 TOC 含量的比重也分别由 2.20% 和 5.57% 提高到 2.37%~3.25% 和 6.30%~7.38%。总之, 实施秸秆还田的处理尤其是 H、M 处理, 其总有机碳含量和 3 种活性有机碳含量均较 CK 得到显著提升, 碳库管理指数明显提高, 说明秸秆还田不仅提高了土壤有机碳数量, 而且改善了土壤有机碳质量, 提高了土壤的综合生产力。

2.2 秸秆还田量对土壤酶活性的影响

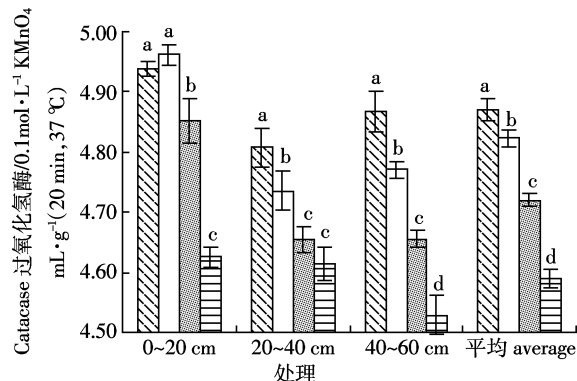
过氧化氢酶在一定程度上表征了土壤生物氧化过程的强弱和土壤微生物活动的强度^[17], 在有机质氧化和腐殖质形成过程中起着重要作用。由图 1 可知, 经过 3 a 秸秆还田, 在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土层, 各秸秆还田处理土壤过氧化氢酶活性均高于 CK。随秸秆还田量由高到低, 0~60 cm 土层土壤过氧化氢酶活性分别较 CK 显著提高 6.12%、5.08% 和 2.83% ($P<0.05$), 可见土壤过氧化氢酶活性随着秸秆还田量的增加而提高。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 各处理间土壤过氧化氢酶活性未全部达到显著性差

异; 而在 40~60 cm 土层, 随秸秆还田量由高到低, 土壤过氧化氢酶活性分别较 CK 显著提高 7.43%、5.31% 和 2.76%, 且各处理间差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。说明随着土层深度的增加, 秸秆还田量的差异对土壤过氧化氢酶活性强弱的影响体现得更为明显。

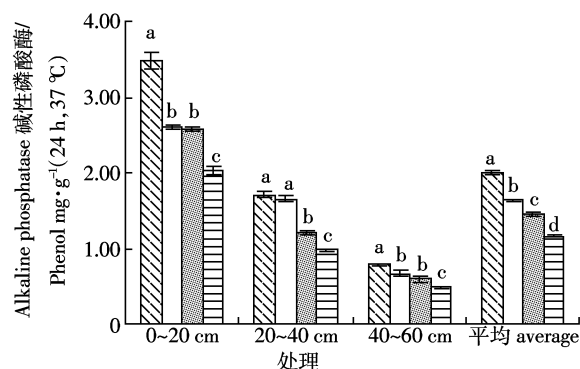
土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶作为 3 种不同水解酶参与高分子有机化合物的水解反应, 对于丰富土壤中被植物和微生物利用的可溶性营养物质有重要作用。由图 1 可知, 3 种水解酶活性在 0~20 cm 土层均明显高于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层。经过 3 a 秸秆还田处理, 0~60 cm 土层 3 种水解酶活性均得到显著提高, 随秸秆还田量由高到低, 土壤脲酶活性分别较 CK 显著提高 22.93%、21.07% 和 10.98% ($P<0.05$); 碱性磷酸酶活性分别显著提高 71.84%、41.09% 和 25.57% ($P<0.05$); 蔗糖酶活性分别显著提高 70.66%、79.42% 和 38.32% ($P<0.05$)。

2.3 土壤酶活性与土壤有机碳的相关性分析

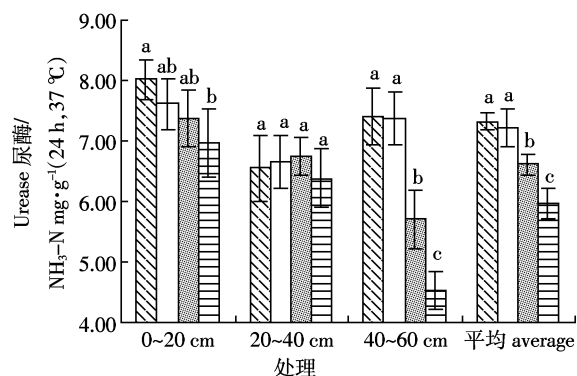
有研究表明, 绝大多数土壤酶活性与土壤有机碳含量呈显著正相关, 在很大程度上影响着土壤肥力水



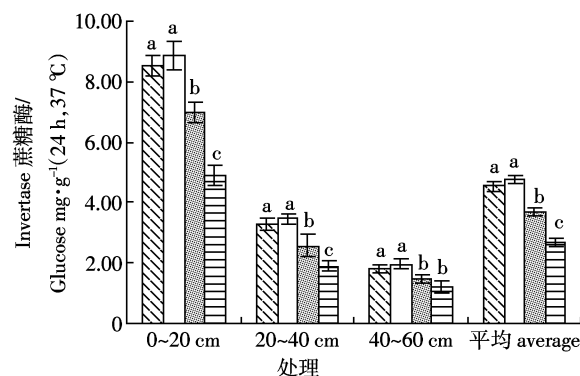
(a) 过氧化氢酶 Catalase



(b) 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase



(c) 脲酶 Urease



(d) 蔗糖酶 Invertase

■ 高 H □ 中 M ■ 低 L □ CK

图 1 不同秸秆还田量处理下土壤酶活性的变化

Figure 1 The change of enzyme activity in soils treated with different straw returning

平^[3,18]。对土壤 3 种不同程度的活性有机碳、总有机碳、碳库管理指数(*CFI*)与土壤酶活性及作物产量进行相关分析结果表明(表 3),3 种活性有机碳之间极显著相关,且与总有机碳呈极显著相关;*CFI* 与 3 种活性有机碳的相关性均高于它与总有机碳的相关性。这说明活性有机碳既区别于总有机碳又与总有机碳紧密相关,是土壤总有机碳的一部分。土壤酶活性之间的相关分析表明,除过氧化氢酶与碱性磷酸酶之间无显著相关性外,其余土壤酶之间的相关性均达到显著水平。说明土壤酶在进行酶促反应时,不仅具有自身专一性,还存在着一些共性,可在总体水平上反映土壤肥力水平的高低。

作物产量与中活性有机碳及 *CFI* 极显著相关,与高活性有机碳、活性有机碳显著相关,而与总有机碳相关性不显著,说明活性有机碳和 *CFI* 更能准确反映土壤肥力和土壤质量的变化,是描述土壤质量和评价土壤管理的良好指标;土壤总有机碳和活性有机碳与脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶显著(或极显著)相关,而与碱性磷酸酶无显著相关性。活性有机碳与土壤酶活性的相关性普遍高于总有机碳与土壤酶之间的相关性,表明活性有机碳对土壤酶活性的影响更为显著。

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤有机碳的影响

3.1.1 秸秆还田对土壤总有机碳的影响

秸秆还田可以提高土壤有机物质的输入量,减少土壤有机碳的矿化分解,增加土壤有机碳含量^[19-20],从

而使农业土壤成为大气 CO₂ 的“汇”。但秸秆还田对土壤有机碳的具体增幅是多少,是不是还田量越多对有机碳的累积就越多?由于土壤有机碳容易受到土壤质地、气候、生物量以及采样时间等因素的影响,导致目前的各种研究报道结果不一。洪春来等^[21]研究表明,在稻-麦轮作体系中,秸秆全量还田 2 a 后,有机碳由原来的 4.23% 上升到 4.53%,年均上升 0.30%,而对照不还田下降 0.14%;钟杭等^[22]研究认为,稻麦秸秆连续 2 a 还田,全量还田与半量还田的有机碳含量较对照分别提高 7.09% 和 5.87%。也有秸秆还田后土壤有机碳并未增加的例子,如张振江^[23]报道,在 CK 区土壤有机碳平均每年减少 0.45 g·kg⁻¹,单施秸秆区平均每年减少 0.12 g·kg⁻¹。本研究认为,经过 3 a 的秸秆还田试验,土壤有机碳含量明显提高,尤其在 0~20 cm 土层,随秸秆还田量由高到低,TOC 含量分别较 CK 显著提高 6.96%、22.97% 和 12.41% ($P<0.05$)。高量秸秆还田较中量秸秆还田在提高土壤有机碳含量方面并没有体现出优势,这可能由于秸秆还田量过高,导致土壤 C/N 失衡,从而影响还田秸秆的腐解效果。

3.1.2 秸秆还田对土壤活性有机碳的影响

土壤活性有机碳是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳,它在指示土壤质量和土壤肥力的变化时比总有机碳更灵敏,能够更准确、更实际地反映土壤肥力和土壤物理性质的变化。关于短期内秸秆还田能否提高土壤活性有机碳的说法不一。有人认为^[16]秸秆还田对提高土壤总有机碳有作用,但并不能增加土壤中活性有机碳和高活性有机碳含量;秸秆还田 5 a

表 3 土壤有机碳与酶活性及作物产量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between organic carbon and enzyme activity and crop yield

指标 Factors	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Invertase	高活性有 机碳 HLOC	中活性有机碳 MLOC	活性有机碳 LOC	总有机碳 TOC	碳库管理 指数 <i>CFI</i>	作物产量 Crop yield
脲酶 Urease	1									
碱性磷酸酶 Phosphatase	0.795*	1								
过氧化氢酶 Catalase	0.897**	0.589	1							
蔗糖酶 Invertase	0.878**	0.898**	0.829*	1						
高活性有机碳 HLOC	0.860**	0.546	0.961**	0.833*	1					
中活性有机碳 MLOC	0.864**	0.591	0.989**	0.859**	0.973**	1				
活性有机碳 LOC	0.863**	0.644	0.952**	0.896**	0.979**	0.970**	1			
总有机碳 TOC	0.785*	0.579	0.818*	0.848**	0.922**	0.869**	0.895**	1		
碳库管理指数 <i>CFI</i>	0.808*	0.462	0.966**	0.762*	0.973**	0.966**	0.965**	0.819*	1	
作物产量 Crop yield	0.763*	0.311	0.898**	0.559	0.812*	0.863**	0.742*	0.630	0.844**	1

注: * 在 0.05 水平上相关性显著($n=8$); ** 在 0.01 水平上相关性显著($n=8$)。

Note: * Correlation is significant at the 0.05 level($n=8$); ** Correlation is significant at the 0.01 level($n=8$)

后,土壤活性有机碳和 *CMI* 均下降。也有人认为^[12,24]秸秆还田能够增加土壤中的活性有机碳组分,同时明显改善有机碳质量。本研究结果表明,秸秆还田能显著增加 0~20 cm 土层 LOC 含量,随秸秆还田量由高到低,LOC 含量分别较 CK 显著提高 29.30%、40.76%和 30.57% ($P<0.05$)。这与陈尚洪、李琳^[12,24]的研究是一致的,而与徐明岗^[19]的研究结果不太一致。这可能与土壤质地和种植制度不同有关。

3.2 秸秆还田对土壤酶活性的影响

土壤酶作为一个敏感指标,能够反映土壤质量在时间序列或各种不同条件下的变化,其活性会随着施肥种类、管理与耕作方式、作物种类、土壤水分和环境条件的变化而受到影响。关于秸秆还田对土壤酶活性的影响,大部分研究认为秸秆还田可以提高土壤酶活性^[25-26],也有秸秆还田对土壤酶活性影响不明显的报道^[27]。本研究认为,经过 3 a 秸秆还田,更新和增加了土壤有机质,改良了土壤结构,促进了土壤微粒的团聚作用,增强了通气与水分的渗透性和保水能力,改善了土壤微生物环境,使得土壤微生物数量增加^[28],土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性得到显著提高;0~20 cm 土层土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性显著高于 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,这与贾伟等^[25]和高明等^[29]研究认为土壤酶活性存在表层富集效应的结论一致。土壤酶活性存在表层富集效应的原因可能是:表层土壤能较好地与外界进行物质与能量交换,利于微生物的繁殖;随着土壤层次的加深,土壤熟化程度、肥力水平及土壤营养元素状况等趋向不利于微生物的活动与繁殖,导致了酶活性降低^[30]。

4 结论

本文综合探讨了不同秸秆还田量条件下对土壤活性有机碳和酶活性的影响,并分析了二者之间的相关性,结论如下:

(1) 秸秆还田能有效提高土壤有机碳含量和碳库管理指数。尤其在 0~20 cm 土层,随秸秆还田由高到低,土壤总有机碳含量分别较 CK 显著提高 6.96%、22.97%、12.41% ($P<0.05$); 土壤活性有机碳含量分别较 CK 显著提高 29.30%、40.76%和 30.57% ($P<0.05$); *CMI* 分别较 CK 显著提高 35.61%、45.45%、35.45% ($P<0.05$)。

(2) 秸秆还田显著提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性,提高程度因秸秆还田量的

多少而异。

(3) 相关性分析表明,土壤活性有机碳及碳库管理指数与土壤酶活性、作物产量间相关性高于总有机碳与其相关性,说明土壤活性有机碳的不同组分和 *CMI* 更能反映土壤质量和土壤肥力状况,是评价土壤管理的良好指标。

(4) 还田秸秆的腐解效果受多种因素的综合制约,在目前研究的基础上,中高量秸秆还田在提高土壤有机碳含量和土壤酶活性方面都体现出了显著优势。因此,本试验区的最适秸秆还田量为 9 000 kg·hm⁻² 左右。

不同处理措施对作物的生长和环境的影响具有累积效应,同一处理经过多年保持后更能反映其实际效果。秸秆还田措施的综合效应,有待于更进一步深入长期的研究。总之,在宁南旱区实施秸秆还田的保护性农业措施,既有利于培肥地力,提高作物产量,也可以改善农田生态系统循环,减少水土流失,保护生态环境,促进当地农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 82-293.
LU Xin. Soil fertilizer science[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2002: 82-293.
- [2] Lefroy R D B, Lisle L. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 48: 1049-1058.
- [3] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soil*, 2007, 44(1): 93-101.
- [4] 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.
JIANG Yong, LIANG Wen-jun, WEN Da-zhong. Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 347-351.
- [5] Chen Hua-Lin, Zhou Jiang-Min, Xiao Bao-Hua. Characterization of dissolved organic matter derived from rice straw at different stages of decay[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(5): 915-922.
- [6] Sunita Gaiind, Lata Nain. Chemical and biological properties of wheat soil in response to paddy straw incorporation and its biodegradation by fungal inoculants[J]. *Biodegradation*, 2007, 18(4): 495-503.
- [7] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 41-44.
LV Mei-rong, LI Zeng-jia, ZHANG Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 41-44.
- [8] 赵鹏, 陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer

- on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6):1014-1018.
- [9] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:359-367.
- [10] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国, 等. FACE 处理的小麦秸秆还田对稻田 CH_4 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1550-1555.
CHEN Chun-mei, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, et al. Effects of amendment of wheat straw produced under FACE condition on soil CH_4 emission in paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1550-1555.
- [11] 周仕栋, 谢祖彬, 朱建国, 等. FACE 条件下休闲和秸秆还田对稻麦轮作农田麦季土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2):243-248.
ZHOU Shi-dong, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, et al. Response of soil enzyme activity to elevated atmospheric pCO_2 at fallow and straw amendments in wheat season of a rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Soils*, 2010, 42(2):243-248.
- [12] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4):806-809.
CHEN Shang-hong, ZHU Zong-lin, LIU Ding-hui, et al. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4):806-809.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:274-328.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986:274-328.
- [14] 赵兰波, 姜 岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3):138-141.
ZHAO Lan-bo, JIANG Yan. Discussion on measurements of soil phosphates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986, 17(3):138-141.
- [15] 严昶升. 土壤肥力研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
YAN Chang-sheng. Soil fertility and its research method[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [16] 徐明岗, 于 荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):723-729.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):723-729.
- [17] 陈华癸, 樊庆笙. 微生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
CHEN Hua-kui, FAN Qing-sheng. Microbiology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1980.
- [18] Acosta-Martinez V, Zobeck T M, Gill T E, et al. Enzyme activities microbial community structure in semiarid agricultural soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(4):216-227.
- [19] Joseph O D, Schjonning P, Sibbesen E, et al. Aggregation and organic matter fractions of three nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 50:105-114.
- [20] Smith P, Powlson D S. Considering manure and carbon sequestration [J]. *Science*, 2000, 287:428-429.
- [21] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(6):627-633.
HONG Chun-lai, WEI You-zhang, HUANG Jin-fa, et al. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2003, 29(6):627-633.
- [22] 钟 杭, 朱海平, 黄锦法. 稻麦等秸秆全量还田对作物产量和土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2002, 14(6):344-347.
ZHONG Hang, ZHU Hai-ping, HUANG Jin-fa. Effects of total wheat and rice straw application on the crop yield and the soil properties[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2002, 14(6):344-347.
- [23] 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.
ZHANG Zhen-jiang. Effects of Long-term wheat straw returning directly on crop yield and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(4):154-155.
- [24] 李 琳, 伍芬琳, 张海林, 等. 双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):248-253.
LI Lin, WU Fen-lin, ZHANG Hai-lin, et al. Organic carbon and carbon pool management index in soil under conservation tillage in two-crop paddy field area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):248-253.
- [25] 贾 伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(2):138-142.
JIA Wei, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effects of long-term returning corn stalks to the field combined with applying fertilizer in autumn on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(2):138-142.
- [26] 陶 军, 张树杰, 焦加国, 等. 蚯蚓对秸秆还田土壤细菌生理菌群数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1306-1311.
TAO Jun, ZHANG Shu-jie, JIAO Jia-guo, et al. Effects of earthworm on number of soil bacterial physiological groups and enzyme activity in a maize residue amended wheat agro-ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5):1306-1311.
- [27] 郑 勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥力学报, 2008, 14(2):316-321.
ZHENG Yong, GAO Yong-sheng, ZHANG Li-mei, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2):316-321.
- [28] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1):18-28.
CHEN En-feng, ZHOU Li-kai, WU Guan-yun. Performances of soil microaggregates instoring and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1):18-28.
- [29] 高 明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7):1177-1181.
GAO Ming, ZHOU Bao-tong, WEI Chao-fu, et al. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7):1177-1181.
- [30] 杜社妮, 梁银丽, 徐福利, 等. 施肥对日光温室土壤微生物与酶活性变化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4):68-71.
DU She-ni, LIANG Yin-li, XU Fu-li, et al. Effect of fertilization on soil microorganisms and enzyme activity under greenhouse condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4):68-71.