

秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响

张 鹏^{1,2}, 李 涵^{1,2}, 贾志宽^{1,2*}, 王 维^{1,2}, 路文涛^{1,2}, 张 惠^{1,2}, 杨宝平^{1,2}

(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)

摘 要:为了探明秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳及土壤碳矿化的影响,为该区作物生产及土壤培肥制度的建立提供参考,通过 4 a(2007—2010 年)秸秆还田定位试验,设置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,对不同处理条件下土壤有机碳、土壤碳矿化速率、累积矿化量及其与不同形态碳素之间的相关性进行了分析。结果表明,土壤总有机碳、活性有机碳含量均随土层的加深而减少;各处理 0~60 cm 土层土壤有机碳和活性有机碳含量分别比 CK 显著提高了 24.2%、20.8%、9.5%和 50.3%、46.6%、34.8%($P<0.05$);秸秆还田不仅增加了土壤活性有机碳含量,同时也显著提高了 0~20 cm 土层活性有机碳占总有机碳含量的比重,提高幅度达 21.1%~23.1%($P<0.05$);土壤碳矿化速率和累积矿化量在 0~60 cm 各土层内随着秸秆还田量的增加大小顺序均为高量秸秆还田>中量秸秆还田>低量秸秆还田>秸秆不还田,各秸秆还田处理较 CK 差异显著($P<0.05$)。相关性分析表明,土壤碳累积矿化量与不同形态碳素之间均存在极显著相关性。因此,在宁南半干旱区采用秸秆还田对提高土壤有机碳含量和碳矿化具有明显作用。

关键词:秸秆还田;宁南旱区;土壤有机碳;土壤碳矿化

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2518-08

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

ZHANG Peng^{1,2}, LI Han^{1,2}, JIA Zhi-kuan^{1,2*}, WANG Wei^{1,2}, LU Wen-tao^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, YANG Bao-ping^{1,2}

(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)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the effects of straw returning systems on soil organic carbon and carbon mineralization of millet or corn under different straw returning supplies. In order to provide a basic theoretical to establish the fertilization system and crop management for semi-arid areas of southern Ningxia, we studied the effects of straw returning, taking no straw returning as the control, on soil organic carbon, mineralization rate, mineralization amount and the correlation with different kinds of soil carbon under different straw returning treatments [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] for four years(2007—2010). After the millet harvest(2010), the results of four years field experiment showed that soil total organic carbon and labile organic carbon decreased with deeper layer; compared with CK, with the reduction of straw returning in 0~60 cm soil layer, the soil organic carbon increased 24.2%, 20.8%, 9.5% ($P<0.05$), and soil labile organic carbon increased 50.3%, 46.6%, 34.8% ($P<0.05$); straw returning treatment improved the proportion of the labile organic carbon, which accounts for 21.1%~23.1% ($P<0.05$) of the total organic carbon content in 0~20 cm soil layer. Different straw returning treatments had different effects on

收稿日期:2011-05-17

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

作者简介:张 鹏(1987—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事旱地节水农业研究。E-mail:pengzhang121@hotmail.com

* 通讯作者:贾志宽 E-mail:zhikuan@tom.com

the contents of soil carbon mineralization rate and mineralization amount of 0~60 cm soil layer, follow the order from high to low H>M>L>CK; the straw returning had significant difference with CK. The soil carbon mineralization amount had extremely significant correlation with other kinds of soil carbon. The content of soil organic carbon and carbon mineralization could be improved efficiently by using of straw returning technology in semi-arid areas of Southern Ningxia.

Keywords: straw returning; semi-arid areas of southern Ningxia; soil organic carbon; carbon mineralization

农作物秸秆是世界上数量最多的一种农业生产副产品,中国是农业大国,也是秸秆资源最丰富的国家之一,据联合国环境规划署报道,中国每年农作物秸秆资源量占全世界总量的 30%,这使得秸秆在中国农村生活构成中占有重要地位^[1]。我国很多地区作物秸秆仅作为燃料或就地焚烧,不仅污染环境,危害健康,更是对资源的一种极大浪费。因此,就地取材,秸秆直接还田,变废为宝,是充分利用秸秆资源的有效途径^[2-3]。秸秆还田作为秸秆利用的一种重要方式,可有效补充和平衡土壤养分、改良土壤,是高产田建设的基本措施之一,对于优化农田生态环境,促进作物的增产具有重要的意义^[4]。

有机质是土壤的重要组成部分,它不仅直接或间接地决定着土壤的水、肥、气、热条件,还决定着土壤生物化学过程及物质的吸收与释放。土壤有机质数量及其品质决定于进入到土壤中的有机物料数量和种类,还与有机质进入土壤后的分解和积累过程密切相关^[5]。土壤有机碳矿化是土壤生物通过自身活动、分解和利用土壤中活性有机组分来完成自身代谢,同时释放出 CO₂ 的过程,直接关系到土壤中养分的释放与供应及温室气体的形成等^[6]。土壤有机碳的矿化速率与土壤有机碳的稳定性、微生物数量和活性相关^[6]。在有机质的转化过程中,有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤中养分元素的释放与供应以及土壤质量的保持^[7]。目前,已有一些研究者探讨了不同土地利用方式、有机物输入等对土壤活性有机碳和碳矿化速率的影响^[8],指出易矿化的土壤活性有机碳主要来自于新鲜凋落物的分解、根系分泌物以及土壤腐殖质^[9]。Fugen 等^[10-12]的研究表明,土壤碳矿化速率与土壤中生物活性较高、稳定性较差、易矿化的那部分活性有机碳密切相关,且土壤温度和土层对有机

碳矿化影响较大^[13]。劳秀荣等^[5,14]发现,秸秆直接还田对改善土壤的理化性状有明显效果,能显著增加土壤有机质积累,提高土壤养分,增强土壤蓄水能力和田间水的利用效率,显著提高作物经济产量。许多研究均表明^[1,15],秸秆还田是提高资源利用率、节本增效、提高耕地基础地力和发展有机可持续农业不可替代的有效途径,在农业生态中具有重要地位。

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 CH₄ 和 N₂O 的影响等方面^[16-18],关于半干旱偏旱区秸秆还田对土壤有机碳含量尤其是土壤碳矿化的影响鲜见详细报道。为此,于 2007—2010 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有机碳含量及土壤碳矿化的影响,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—2010 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。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 6.1 ℃,年平均日照时数 2 518.2 h。境内年蒸发量较大,为 1 753.2 mm,干燥度(≥0 ℃的蒸发量)为 1.21~1.99 mm,无霜期 140~160 d,土壤质地为黄绵土。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,谷子秸秆按 3 000 kg·hm⁻²(L)、6 000 kg·hm⁻²(M)、9 000 kg·hm⁻²(H)、0 kg·

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/g·kg ⁻¹	碱解氮 Hydro-N/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·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

hm⁻²(CK)粉碎还田;玉米秸秆按 4 500 kg·hm⁻²(L)、9 000 kg·hm⁻²(M)、13 500 kg·hm⁻²(H)、0 kg·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 m²。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·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·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·hm⁻²,10 月 13 日收获,收获后按玉米秸秆还田量进行粉碎还田;2010 年 4 月 21 日种谷子,品种和密度同 2008 年一致,10 月 23 日收获。2007—2010 年施肥水平:以鲁西化工生产的磷酸二铵(N≥17%,P₂O₅≥45%,K₂O 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 kg·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

2010 年 10 月谷子收获后第 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、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

土壤全量有机碳测定:采用重铬酸钾外加热法;

土壤活性有机碳测定及 CMI 计算:采用 33、167 mmol·L⁻¹ 和 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(CMI)等相关指标参照徐明岗等^[9]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即活度指数(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碳库管理指数 CMI=CPI×

LI×100

土壤矿化碳的测定:采用室内恒温培养、碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。将田间取回的鲜土(<2 mm)加入适量蒸馏水混后匀,在(28±1)℃的恒温培养箱内预培养 2 周以恢复土壤微生物活性。然后,分别称取相当于风干土 50 g 土样各 3 份,置于 1 000 mL 培养瓶中(图 1),调节水分达到田间持水量的 75%。将盛有 25 mL 0.01 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的 50 mL 吸收瓶小心置于培养瓶内,将培养瓶加盖密封,在 25℃的恒温培养箱内培养,在第 2、7、14、21、28、35、42、49 d 取出吸收瓶,将其中的溶液完全洗入三角瓶中,加入 1 mol·L⁻¹ BaCl₂ 溶液 2 mL 及 2 滴酚酞指示剂,用硫酸滴定至白色,根据 CO₂ 的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量^[20]。

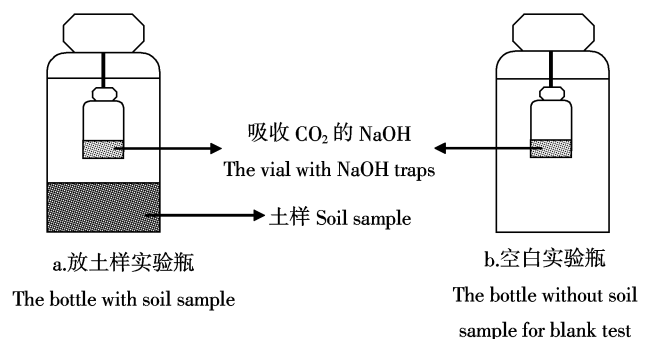


图 1 吸收 CO₂ 的培养瓶示意图

Figure 1 The diagram of bottles for absorbing CO₂ released by mineralization of SOC

1.3.3 数据分析

采用 Excel 2003 进行数据处理、绘制图表,SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析和相关性分析,不同处理之间多重比较采用 Duncan 新复极差方法,然后经过 *t* 检验(*P*<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量对土壤有机碳和碳库管理指数的影响

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(表 2)。

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,随着秸秆还田量由高到低,TOC 和 CMI 分别较 CK 显著提高 24.2%、20.8%、9.5% ($P<0.05$) 和 57.4%、53.4%、42.0% ($P<0.05$);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)的影响较明显,在 0~20 cm 土层,随秸秆还田量由高到低,较 CK 显著提高 50.3%、46.6% 和 34.8% ($P<0.05$); 秸秆还田处理活性有机碳占总有机碳含量比重为 21.8%~22.2%,显著高于 CK 处理(18.0%),说明秸秆还田不仅增加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 显著提高 76.2%、61.9%、33.3% ($P<0.01$) 和 54.9%、51.0%、35.3% ($P<0.05$),HLOC 和 MLOC 含量占 TOC 含量的比重也分别由 2.4% 和 5.7% 提高到了 2.9%~3.3% 和 7.1%~7.1%。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 不同秸秆还田量对土壤碳矿化的影响

土壤有机碳的矿化过程是在微生物的参与下进行的,受温度、水分、土壤等诸多因素的影响。本文从土壤有机碳矿化速率和矿化量两个方面对不同秸秆还田处理下宁南旱区土壤有机碳矿化的影响进行了分析。

2.2.1 不同秸秆还田量对土壤有机碳矿化速率的影响

2010 年谷子收获后,0~60 cm 各土层土壤有机碳矿化速率变化趋势一致,呈现出比较明显的两个阶段:第一阶段为 0~14 d 左右,即在培养前期,CO₂ 产生速率先升高而后迅速下降,变化幅度较大,此过程持续时间短但分解量大;第二阶段为 14 d 至培养结束,CO₂ 产生速率缓慢,且随培养时间的延长不同秸秆还田量处理土壤的 CO₂ 产生速率基本接近,此过程分解量较小但持续时间长(图 2)。

不同土层土壤有机碳矿化速率差异较大,在整个培养期间,0~60 cm 土层内各处理 CO₂ 产生速率均随土层的加深而降低,下降幅度达 60.5%~523.9% ($P<0.01$)。同一土层各处理土壤 CO₂ 产生速率均随着秸秆还田量的增加而升高,这在培养初期(0~14 d)表现尤为明显,在培养第 7 d,0~60 cm 土层各秸秆还田处理较 CK 极显著提高了 41.8%、28.3% 和 15.1% ($P<0.01$),其中 H、M 处理均较 L 处理差异显著 ($P<0.05$),其余处理间均无明显差异。总体来说,不同秸

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	0.37a	0.79a	2.42a	11.1a	157.4a
	M	0.34ab	0.77a	2.36b	10.8a	153.43ab
	L	0.28b	0.69b	2.17b	9.79b	141.96b
	CK	0.21c	0.51c	1.61c	8.94c	100c
20~40	H	0.26a	0.42a	1.52a	9.42a	133.52a
	M	0.26a	0.38ab	1.47a	9.24a	129.01ab
	L	0.22b	0.33b	1.3b	8.54b	112.74b
	CK	0.17c	0.27c	1.15b	7.75c	100c
40~60	H	0.12a	0.27a	1.09a	8.76a	116.83a
	M	0.12a	0.26a	1.05a	8.91a	112.11a
	L	0.1a	0.23ab	1.01a	7.24b	109.82a
	CK	0.08a	0.2b	0.92a	6.56c	100b
平均 Average	H	0.25a	0.49a	1.68a	9.76a	138.77a
	M	0.24a	0.47a	1.63a	9.65a	134.23a
	L	0.2ab	0.42ab	1.49b	8.52b	124.01b
	CK	0.15b	0.32b	1.23c	7.75c	100c

注:同列不同土层不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level with the same soil layer in the same column.

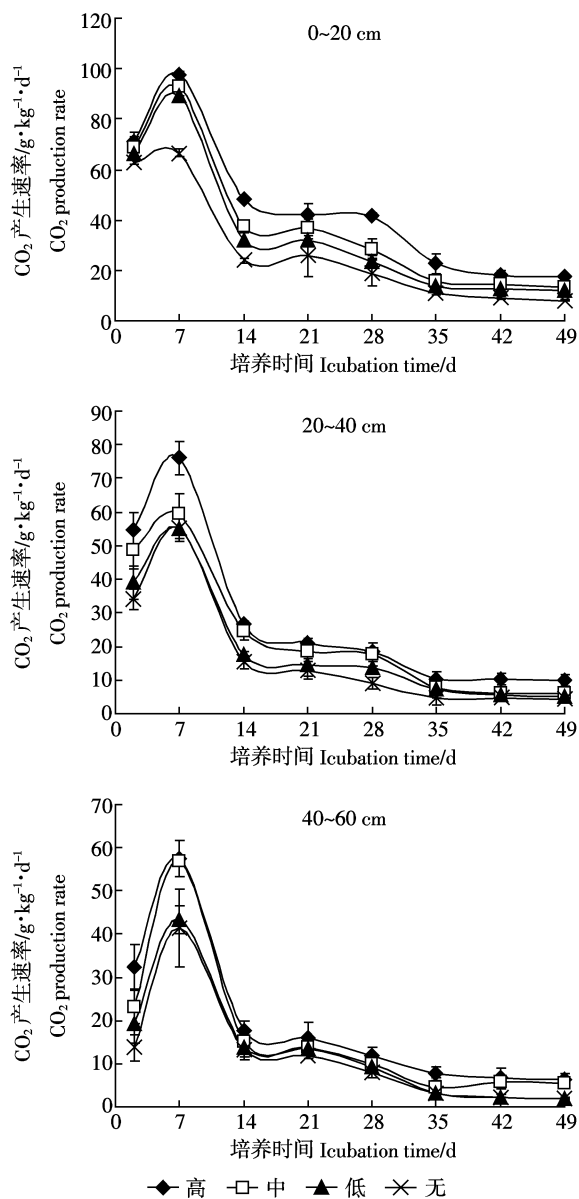
图2 不同秸秆还田量处理土壤 CO₂ 产生速率的动态变化

Figure 2 Dynamics of CO₂ production rate under different straw returning treatment

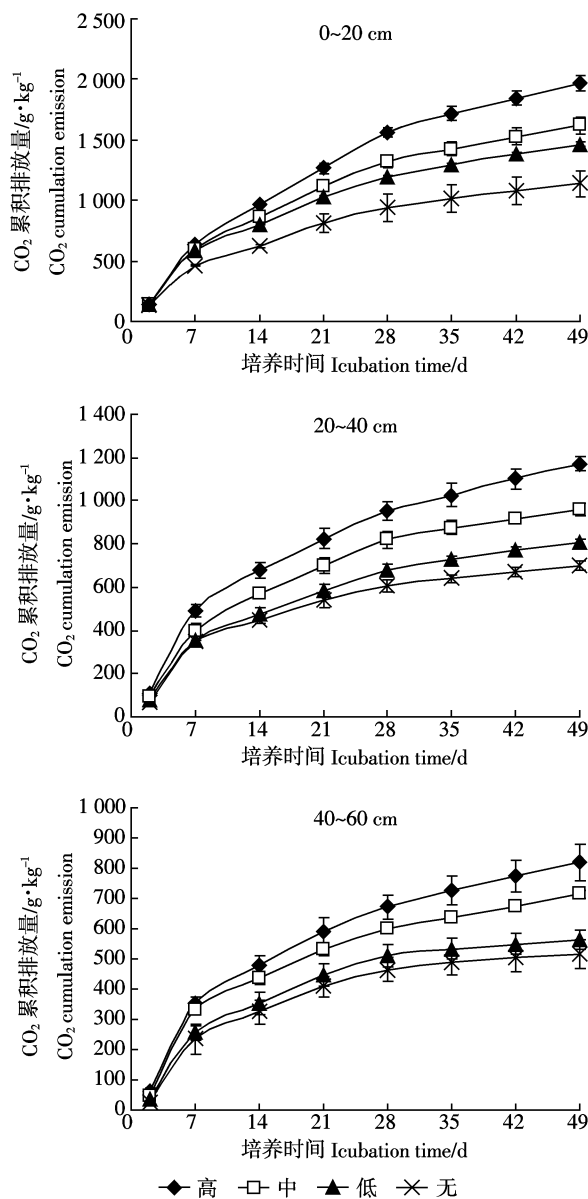
图3 不同秸秆还田量处理土壤 CO₂ 的累积排放量

Figure 3 CO₂ cumulative emission amounts under different straw returning treatment

秆还田处理土壤有机碳矿化速率即土壤 CO₂ 产生速率随培养时间延长而变化,两者的数量关系符合指数函数,相关方程为:

$$y = 57.223e^{-0.0449x} (R^2 = 0.9076, n = 8)$$

式中: y 为秸秆还田处理土壤有机碳矿化速率即 CO₂ 产生速率($\text{CO}_2, \text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), x 为培养天数(d)。

2.2.2 不同秸秆还田量对土壤有机碳矿化量的影响

如图3所示,总体来看,因受矿化速率的影响,各土层各处理有机碳累计矿化量呈前期增长迅速,后期增长缓慢的趋势。在培养49 d后,0~60 cm各土层不同秸秆还田量处理土壤 CO₂ 的累积排放总量大小顺序均

为 $H > M > L > CK$, 各秸秆还田处理较 CK 显著增加了 68.0%、40.0%和 20.3% ($P < 0.05$),但随着土层的加深,各处理 CO₂ 累积排放量逐渐减小,在 40~60 cm, H 处理的 CO₂ 累积排放量从 0~20 cm 的 $1968.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $818.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅达 140.5%,其余各处理下降幅度分别为 126.9%、160.1%和 197.9% ($P < 0.01$)。对培养期间 CO₂ 累积排放量曲线进行拟合可发现,土壤对数曲线模型 $[y = 299.35 \ln(x) - 150.24]$ 能很好地描述不同处理累积矿化量的变化趋势,且相关性较好 ($R^2 = 0.9922$)。

2.3 土壤有机碳矿化量与不同碳形态之间的相关性

分析培养过程中土壤 CO₂ 累积排放量与不同碳

形态之间的相关性发现(表 3),3 种活性有机碳、土壤总有机碳及 *CMi* 均与 CO_2 累积排放量存在极显著相关性,说明各种有机碳与有机碳矿化关系密切。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;*CMi* 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连,是土壤总有机碳的一部分。

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^[21-22],从而使农业土壤成为大气 CO_2 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^[23]和钟杭等^[24]的研究表明,秸秆全量还田可显著提高土壤有机碳含量;也有秸秆还田后土壤有机碳并未增加的例子,张振江^[25]报道,CK 土壤有机碳平均每年减少 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,单施秸秆平均每年减少 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究认为经过 4 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,各秸秆还田处理 TOC 含量较 CK 显著提高。H 处理较 M 处理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 比失衡,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,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是否能提高土壤活性有机碳的说法不一,有人认为^[19]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。也有人认为^[26-27]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,各处理 LOC 含量均较 CK 提高显著。这与陈尚洪、李琳^[26-27]的研究是一致的,而与徐明岗^[19]的研究结果不太一致,可能与土壤质地和种植制度不同有关。

3.2 秸秆还田对土壤碳矿化的影响

有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤中养分元素的释放与供应以及土壤质量的保持^[7]。此过程是在微生物的参与下进行的,受诸多因素的影响。很多研究结果表明^[28-29],作物秸秆作为外源有机物质,由易分解成分(如糖类、淀粉、脂肪等)和难分解成分(如木质素、多酚等)组成。长期秸秆还田后秸秆分解会增加土壤中碳源,改变土壤理化性质,增加土壤微生物数量^[30],促进土壤有机质积累,提高土壤矿质养分的生物有效性^[31],从而对土壤有机碳矿化产生重要影响。

本研究结果显示,在培养前 7 d 各土层各处理 CO_2 产生速率较快,土壤累积矿化量的变化趋势同矿化速率一致,在培养初期(前 14 d)各土层各处理土壤累积矿化量均达到总矿化量的 49.2%~64.2%,第 28 d 时占到了总矿化量的 79.1%~90.1%,这与史学军等^[32]的研究结果一致。这主要是因为前期土壤中易分解组分快速分解,大量养分迅速释放,促进了微生物活性,所以土壤中碳的矿化速率和矿化量增长迅速,但随着培养时间的延长,土壤中易分解组分被微生物利用完后,开始转向较难分解的组分,矿化速率随之减缓,碳分解量随之下降^[33]。随着土层的加深, CO_2 产生速率和矿化碳总量均呈下降趋势,各处理累积矿化量下降幅

表 3 土壤 CO_2 累积排放量与不同碳形态之间的相关关系

Table 3 Relationships between CO_2 cumulative emission amounts and different soil carbon fractions

指标 Factors	CO_2 累积排放量 CO ₂ cumulative emission amounts	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>CMi</i>
高活性有机碳(HLOC)	0.93**	1				
中活性有机碳(MLOC)	0.98**	0.91**	1			
活性有机碳(LOC)	0.98**	0.94**	0.96**	1		
总有机碳(TOC)	0.93**	0.90**	0.88**	0.89**	1	
碳库管理指数 <i>CMi</i>	0.87**	0.85**	0.87**	0.89**	0.84**	1

注:* 在 0.05 水平上相关性显著($n=12$);** 在 0.01 水平上相关性显著($n=12$)。

Note: * Correlation is significant at the 0.05 level($n=12$); ** Correlation is significant at the 0.01 level($n=12$).

度达 54.6%~61.6%,这与前人的结论相似^[13,34]。可能因为土壤表层有机碳含量较高、活性有机碳所占比例较高所致^[35]。同一土层内,随秸秆还田量的增加,矿化速率和累积矿化量的顺序均为 H>M>L>CK,各秸秆还田处理较 CK 差异显著($P<0.05$)。主要可能是因为秸秆还田后,为土壤中储存了大量易分解的糖类和蛋白质等有机物质为微生物提供较多的养分,导致微生物活动剧烈。

王清奎等^[36]研究表明,土壤有机碳矿化受活性有机碳组分初始含量的影响,土壤有机碳中活性较高的那部分易被微生物分解利用,是潜在的可矿化有机碳;龚伟等^[37]对川南地区人工天然常绿阔叶林研究也发现,土壤有机碳矿化与土壤有机碳、微生物量碳含量密切相关。这与本研究结果一致,说明 3 种活性有机碳、土壤总有机碳含量及 CMI 与有机碳矿化累积量之间密切相关。

4 结论

本文综合探讨了不同秸秆还田量条件下对土壤有机碳含量和碳矿化的影响,并分析了二者之间的相关性,得出以下结论:

(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 土层提高明显。

(2) 秸秆还田对土壤碳矿化具有重要影响,显著提高了 0~60 cm 土层土壤碳矿化速率和累积矿化量($P<0.05$),提高程度因秸秆还田量的多少而异。

(3) 相关性分析表明,3 种活性有机碳、土壤总有机碳含量及 CMI 均与 CO₂ 累积排放量存在极显著相关关系。

(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,中量秸秆还田在提高土壤有机碳含量和碳矿化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。

参考文献:

- [1] 张晓文, 赵改宾, 杨仁全, 等. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增 1): 107-109.
ZHANG Xiao-wen, ZHAO Gai-bin, YANG Ren-quan, et al. Comprehensive utilization of agricultural straws in recycle economy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(Suppl 1): 107-109.
- [2] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 111-151.
SHEN Shan-min. Chinese soil fertility[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998: 111-151.
- [3] 杨玉爱. 我国有机肥料研究及展望[J]. 土壤学报, 1996(33): 414-420.
- [4] 王 娇, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对有机肥矿化及土壤活性有机质含量影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 37-41.
WANG Jiao, ZHANG Yu-long, ZHANG Yu-ling, et al. Effects of different irrigation patterns on mineralization of organic manure carbon and contents of soil labile organic matter[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1): 37-41.
- [5] 秀秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-51.
LAO Xiu-rong, WU Zi-yi, GAO Yan-chun. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(2): 49-51.
- [6] 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 & Tillage Research*, 2009, 102(1): 151-157.
- [7] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.
LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [8] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 530-538.
WU Jian-guo, ZHANG Xiao-quan, XU De-ying. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan mountain forest zone[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 530-538.
- [9] 焦 坤, 李忠佩. 土壤溶解有机质的含量动态及转化特征的研究进展[J]. 土壤, 2005, 37(6): 593-601.
JIAO Kun, LI Zhong-pei. Advances in research on concentration and transformation of dissolved organic matter in soils[J]. *Soils*, 2005, 37(6): 593-601.
- [10] Fugen D, Alan L W, Frank M H. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 72: 1445-1453.
- [11] ZHAO Man-xing, ZHOU Jian-bin, Kalbitz K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south loess plateau in China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44: 158-165.
- [12] 陈 涛, 郝晓军, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1494-1500.
CHEN Tao, HAO Xiao-jun, DU Li-jun, et al. Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1494-1500.
- [13] 艾 丽, 吴建国, 朱 高, 等. 祁连山中部高山草甸土壤有机碳矿化及其影响因素研究[J]. 草业学报, 2007, 10: 22-33.
AI Li, WU Jian-guo, ZHU Gao, et al. The mineralization of alpine meadow soil organic carbon and factors influencing it in the Qilian Mountain[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 10: 22-33.
- [14] Kasperbauer M J. Cotton seedling root growth responses to light reflected to the shoots from straw-covered versus bare soil[J]. *Crop Science*, 1999, 1: 164-167.
- [15] 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.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw re-

- turning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):522-528.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李振高, 骆永明, 籐应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:360-362.
- LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. The methods for studying soil and environmental microbial biomass[M]. Beijing: Science Press, 2008:360-362.
- [21] 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 & Tillage Research*, 1999, 50:105-114.
- [22] Smith P, Powlson D S. Considering manure and carbon sequestration[J]. *Science*, 2000, 287:428-429.
- [23] 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.
- [24] 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, et al. 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.
- [25] 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.
- [26] 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 Zhong-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.
- [27] 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.
- [28] 沙涛, 程立忠, 王国华, 等. 秸秆还田对植烟土壤中微生物结构和数量的影响[J]. 中国烟草科学, 2000(3):40-42.
- SHA Tao, CHENG Li-zhong, WANG Guo-hua, et al. Effects of applying crop straw on the microbial composition and quantity in tobacco cultivated soil[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2000(3):40-42.
- [29] 蔡晓布, 钱成, 张元, 等. 西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3):463-468.
- CAI Xiao-bu, QIAN Cheng, ZHANG Yuan, et al. Microbial characteristics of straw-amended degraded soils in central Tibet and its effect on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3):463-468.
- [30] Li Yi-qing, XU Ming, Sun O J, et al. Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:2111-2114.
- [31] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):48-51.
- LIU Shi-ping, NIE Xin-tao, ZHANG Hong-cheng, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering*, 2006, 22(7):48-51.
- [32] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(6):1833-1836.
- SHI Xue-jun, PAN Jian-jun, CHEN Jin-ying, et al. Effects of different types of litters on soil organic carbon mineralization[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(6):1833-1836.
- [33] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6):1013-1019.
- ZHANG Wei, WANG Zi-fang, WANG Hui, et al. Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6):1013-1019.
- [34] Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:327-335.
- [35] Updegraff K, Pastor J, Bridgman S, et al. Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(1):151-163.
- [36] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6):1203-1207.
- WANG Qing-kui, WANG Si-long, YU Xiao-jun, et al. Effects of Cunninghamia lanceolata-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6):1203-1207.
- [37] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对土壤的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(4):112-119.
- GONG Wei, HU Ting-xing, WANG Jing-yan, et al. Impacts of litter on soil in the natural evergreen broadleaved forests after artificial regeneration in southern Sichuan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4):112-119.