

有机肥分解及其对土壤有机碳矿化影响的模拟研究

汪张懿¹, 宗良纲^{1*}, 褚慧¹, 谢少华¹, 杨旒¹, 罗敏²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.环境保护部有机食品发展中心, 南京 210042)

摘要:以商品有机肥、油菜饼肥和秸秆堆肥三种不同种类有机肥为供试材料,采用土壤呼吸瓶装置进行实验室培养以模拟土壤施肥效应,测定三种肥料的有机碳分解动态变化量及其对土壤有机碳矿化的影响。结果表明,培养条件下三种有机肥的分解特性差异极大,油菜饼肥与秸秆堆肥在培养前 25 d 分解速率呈现快速升高后又快速下降的变化规律,其中 C/N 最低的油菜饼肥更加明显,而 C/N 最高的商品有机肥分解速率很低;三种有机肥料处理下的土壤有机碳累积矿化量存在极显著性差异($P<0.01$),大小顺序依次为油菜饼肥处理>秸秆堆肥处理>商品有机肥处理;培养结果运用农田土壤有机碳动态模拟模型,获得商品有机肥、油菜饼肥和秸秆堆肥的易分解比 F 分别为 0.22、0.57 和 0.47 及其一级动力学常数 $K_1=0.019$ 、 $K_2=0.97\times10^{-3}$ 、 $K_s=0.80\times10^{-3}(\text{d}^{-1})$;比对实验测定数据与模型模拟数据表明,当商品有机肥与含氮量最高的油菜饼肥混合比例为 2:1 时,就能极显著提高商品有机肥的分解率($P<0.01$);而秸秆堆肥与油菜饼肥 1:1 混合时,亦能极显著提高秸秆堆肥的分解率($P<0.01$)。

关键词:有机肥料;土壤有机碳矿化;有机种植;模型模拟

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0036-07 doi:10.11654/jaes.2013.01.006

A Simulation Study on Decomposition of Organic Fertilizers and Its Effects on Soil Organic Carbon Mineralization

WANG Zhang-yi¹, ZONG Liang-gang^{1*}, CHU Hui¹, XIE Shao-hua¹, YANG Ni¹, LUO Min²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095 China; 2.Organic Food Development Centre, MEP, Nanjing 210042, China)

Abstract: Dynamics of organic carbon in commercial organic fertilizer, rapeseed cake fertilizer, and straw compost under simulated culture conditions were studied in soil respiration bottles and their effects on soil organic carbon mineralization were determined. It was found that the decomposition of three organic fertilizers showed different characteristics at culture conditions. The decomposition rate of rapeseed cake fertilizer and straw compost underwent a rapid increasing stage which was followed by a quick declining during 25 days after they were mixed with soil. Such a trend was more significant in rapeseed cake fertilizer with lower C/N ratio. Nevertheless, the decomposition rate of commercial organic fertilizer which has higher C/N ratio than the others was slower. Total amount of mineralized organic carbon in soil with different fertilizer treatment followed the sequence of rapeseed cake fertilizer > straw compost > commercial organic fertilizer, with statistical significance of $P<0.01$. The data were fitted with the Soil-C model. It was determined that the fractions of readily decomposed components in commercial organic fertilizer, rapeseed cake fertilizer, and straw compost were 0.22, 0.57, and 0.47, respectively. The first order kinetic constants K_1 , K_2 , K_s were determined to be 0.019, 0.97×10^{-3} , and $0.80\times10^{-3}(\text{d}^{-1})$, respectively. The decomposition ratio increased with the increased nitrogen content and the rapeseed cake fertilizer with highest nitrogen content among three fertilizers had the highest decomposition ratio. The comparison between experimental data and model simulation revealed that mixing commercial organic fertilizer with rapeseed cake fertilizer at ratio of 2:1 significantly enhanced its decomposition($P<0.01$). Similar enhancement was also observed when straw compost was mixed with rapeseed cake fertilizer at ratio of 1:1($P<0.01$).

Keywords: organic fertilizer; soil organic carbon mineralization; organic farming; modeling

收稿日期:2012-06-02

基金项目:江苏省科技支撑计划(BE2009313-2);江苏省农业科技自主创新资金(CX(11)3042)

作者简介:汪张懿(1987—),男,硕士研究生,研究方向为环境质量与食品安全。

*通信作者:宗良纲 E-mail:zonglg@njau.edu.cn

农田生态系统中的碳库不仅是全球碳库最重要的组成部分,而且是最活跃的。在全球低碳经济热潮中,农田土壤固碳与温室气体减排已经被国际社会认为能扭转日益增加的大气 CO₂ 浓度的可行途径^[1]。农田土壤的固碳能力和特性与农业生产管理方式直接相关,其中外源有机物的投入就是重要因素。现代农业为追求高产而大量施用化肥农药,导致土壤有机碳库的严重损失^[2],不仅降低土壤肥力,而且会增加温室气体排放量。而有机种植方式之所以能维持土壤有机碳库的稳定,重要原因之一就在于生产过程中不使用人工合成的化肥、农药,通过施用有机肥、秸秆还田等措施培肥土壤,增加外源有机碳的输入,提高土壤碳储量^[3-4]。因此,分析有机种植系统中不同种类有机肥料分解特性及其对土壤固碳特性的影响,就能更好地理解有机种植方式的低碳机理。目前,国内外基于模型方法研究土壤有机碳动态变化正逐渐深入,不仅能模拟土壤有机碳的分解过程,而且可估算不同气候条件和农业管理措施下有机碳的平衡值和预测土壤固碳潜力^[5]。早期的国内外研究中^[6-10],对不同土壤类型、水热条件对植物残体分解的影响等较深入,但针对有机种植方式下不同种类有机肥料的分解特性报道较少。因此,本研究选取有机种植中常用的三种有机肥料,通过实验室土壤培养试验分析有机碳分解动态变化及其对土壤有机碳矿化的影响,并利用农田土壤有机碳动态模型进行拟合和模拟,为预测有机种植方式下的土壤固碳潜力和进行合理的施肥管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自本课题组长期定位研究基地南京普朗克有机农场(北纬 31°35'10",东经 119°03'55")露天种植的菜地,土壤为黄棕壤演变的菜园土(耕作黄土)。供试土壤的采样地块是已经进行 10 年有机种植的蔬菜地。土壤基本性质见表 1。

表 1 供试材料的基本性状
Table 1 Physical and chemical properties of the test materials

供试材料	含水量/%	pH	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	C/N	木质素/g·kg ⁻¹	粘粒含量/(%(<0.002 mm))
风干土样	2.86±0.002	6.56±0.03	16.16±0.19	1.60±0.01	10.1	—	21.39±0.21
商品有机肥	38.12±0.09	7.09±0.02	194.30±0.85	13.81±0.08	14.1	251.2±36.63	—
油菜饼肥	11.76±0.005	5.41±0.02	528.52±3.63	75.18±0.90	7.0	319.8±20.15	—
秸秆堆肥	15.14±0.02	7.87±0.03	343.89±0.39	35.50±0.48	9.7	239.6±14.99	—

1.1.2 供试肥料

供试的有机肥料在符合有机种植肥料投入要求前提下,分别选择了南京明珠有机肥料有限责任公司生产的“地得益”精制商品有机肥,以下简称商品有机肥(SP),江苏省农林科技示范园提供的非转基因品种油菜饼肥,以下简称油菜饼肥(BF)和南京明珠有机肥料有限责任公司提供的芦蒿-稻麦秸秆混合堆肥,以下简称秸秆堆肥(DF)。为尽量使室内培养试验与实际生产条件相近,在实验开始前,将新鲜的商品有机肥和自然风干的油菜饼肥碾碎后,分别过 4 目筛备用;将腐熟后自然风干的秸秆堆肥剪至 0.5~1 cm 长度,与其中的中药材、固体废弃物残渣充分混合后备用。三种供试有机肥料的基本性状参见表 1。

1.2 试验设计方案

培养试验共设置了 3 种单一有机肥处理,4 种不同有机肥的组合处理和 1 组空白对照,各处理重复 3 次。具体处理设置见表 2。

表 2 试验设计方案
Table 2 Experimental design

编号与实验处理代号	有机肥投加量 *
处理一(CK)	无
处理二(SP)	1.50 g 商品有机肥
处理三(BF)	1.50 g 油菜饼肥
处理四(DF)	1.50 g 秸秆堆肥
处理五(1/2SP+1/2BF)	0.75 g 商品有机肥+0.75 g 油菜饼肥
处理六(2/3SP+1/3BF)	1.00 g 商品有机肥+0.50 g 油菜饼肥
处理七(1/2DF+1/2BF)	0.75 g 秸秆堆肥+0.75 g 油菜饼肥
处理八(2/3DF+1/3BF)	1.00 g 秸秆堆肥+0.50 g 油菜饼肥

注:* 有机肥料用量按照实际生产中的施用量换算到 200 g 风干土样中的投加量。

1.3 测定方法

1.3.1 CO₂-C 释放量的测定

根据刘世梁的研究^[14],分别称取过 10 目筛的风干供试土样 200 g 与相应的有机肥料充分混合后,置于容积为 650 mL 的呼吸瓶中。加入 80 mL 的去离子水,

使土壤水分含量为 $300 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。呼吸瓶为相通的一大一小的锥形瓶,大锥形瓶口连接放有钠石灰的U型管,用于在通气时吸收空气中的水和 CO_2 ;小锥形瓶存放 NaOH 溶液,每次在小锥形瓶中准确移入 20 mL , $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH ,用塑料薄膜密封并扎紧,确保密闭状态。将呼吸瓶放置于无光照恒温培养箱中, 25°C 恒温培养 90 d 。实验过程中定期补充氧气。实验开始的前两周,每日通气2次,两周后每日通气1次,在最后一个半月每2d通气一次,每次均 30 min 。为保证吸收液浓度,在 NaOH 耗尽之前,每隔一定时间(培养前期为 $4\sim 5 \text{ d}$,后期约 10 d),将小锥形瓶中的吸收液用注射器抽出,并换上新的 NaOH 溶液按上述方法继续培养。抽出的吸收液加 10 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BaCl_2 ,摇匀之后以酚酞为指示剂,用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 滴定,中和未消耗的 NaOH ,通过 HCl 消耗量计算 CO_2 的量,进而求出有机C的分解量。

1.3.2 有机肥料木质素的测定^[15-16]

将有机肥料过 60 目筛,在索氏抽提器中放入丙酮抽提过夜后烘干。准确称取 1.000 g ,移入 100 mL 烧杯中,加入质量分数 72% 的浓硫酸 15 mL ,充分搅拌后于 30°C 消化 3 h ,之后转入 1000 mL 大烧杯中,加入 560 mL 去离子水,将其稀释至质量分数为 4% 的硫酸消化液,煮沸 1 h ,冷却后将不溶性残渣用已恒重的玻璃过滤器抽吸过滤,热水洗净, 105°C 恒重干燥后称量。

1.3.3 土壤及有机肥料的基本性质测定

土壤 pH 值、有机碳、全氮、粘粒含量以及有机肥料的 pH 值、有机碳、全氮含量等指标,均采用常规方法测定^[17]。

1.4 模型及参数

本研究采用了黄耀等^[11-13]建立的农田土壤有机碳动态模拟模型。该模型将土壤碳库区分为易分解与难分解两部分,通过大量的实验室培养和大田试验,分别建立了温度、水分、土壤质地、外源有机物对土壤有机碳动态影响的子模型。该模型经多个长期定位试验点的数据验证表明^[25-26],对农田土壤有机碳的动态变化模拟具有普遍适用性。

1.4.1 总模型的积分表达式

$$C_t = C_0 \times \{ F \times [1 - \exp(-K_1 \times \text{TI} \times \text{WI} \times \text{SI} \times t)] + (1 - F) [1 - \exp(-K_2 \times \text{TI} \times \text{WI} \times \text{SI} \times t)] \} \quad (1)$$

$$C_{st} = C_s \times [1 - \exp(-K_s \times \text{TI} \times \text{WI} \times \text{SI} \times t)] \quad (2)$$

式中: C_t 为 t 时刻肥料中有机碳的累积分解量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

C_0 为有机肥料初始有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

C_s 为土壤初始有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

C_{st} 为 t 时刻土壤有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

K_1 、 K_2 、 K_s 分别为有机肥料的易分解组分、难分解组分、土壤原有有机碳分解速率常数, d^{-1} ;

F 为易分解组分比例, %;

t 为有机碳分解天数, d ;

TI 、 WI 、 SI 分别为温度函数、水分函数、质地函数。

1.4.2 子模型

$$\text{TI} = Q_{10}^{(T-10)/10} \quad (3)$$

$$\text{WI} = 0.49 \times \exp(3.88 \times W - 5.4 \times W^2) \quad (4)$$

$$\text{SI} = 1 - 0.265 \times C_{\text{lay}} \quad (5)$$

式中: Q_{10} 为温度系数, $Q_{10}=1.3$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; W 为土壤含水量, %; C_{lay} 为土壤粘粒含量, %。

2 结果与讨论

2.1 不同种类有机肥料分解速率的差异

图1为三种有机肥平均日分解速率随培养时间的变化趋势。可以看出,在 $0\sim 90 \text{ d}$ 的培养期内,三种有机肥料的分解速率差异极大。尤其在 $0\sim 25 \text{ d}$,三种有机肥的分解速率具有极显著性差异 ($P<0.01$),大小顺序依次为油菜饼肥>秸秆堆肥>商品有机肥。

图1中, C/N 最低的油菜饼肥的分解过程呈现明显的3个阶段。在培养开始的前 5 d ,分解速率快速增加,迅速达到峰值;随后 ($6\sim 25 \text{ d}$) 分解速率快速下降,但分解速率仍然较快;最后 ($26\sim 90 \text{ d}$) 分解速率变化缓慢,逐渐趋于稳定。数据分析表明,在 $0\sim 25 \text{ d}$,油菜饼肥的分解速率极显著高于 $26\sim 90 \text{ d}$ 的分解速率 ($P<0.01$)。秸秆堆肥在 $0\sim 25 \text{ d}$ 的培养期内也表现出相似的分解变化规律,而在 $26\sim 90 \text{ d}$ 内的日分解速率无显著差异 ($P>0.05$)。这一结果与早期对各种植物残体^[13] (如小麦、水稻的根系和地上部分) 在土壤中的分解变

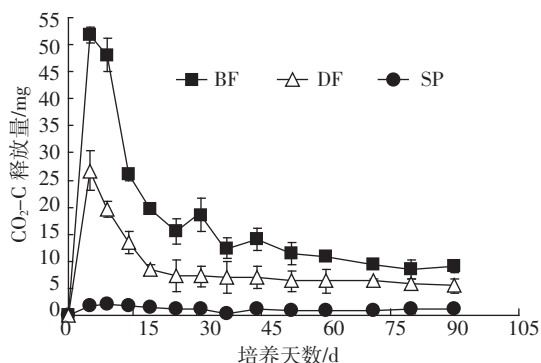


图1 培养条件下不同肥料有机碳的分解速率动态变化

Figure 1 Decomposition rate changes of organic carbon in different kinds of organic fertilizers at culture condition

化规律一致。植物中有机碳可分为易分解与难分解两大类组分:易分解部分包括糖类、淀粉等,难分解部分包括木质素等^[10]。油菜饼肥与秸秆堆肥都属于植物源材料,加入土壤后易分解组分可为土壤微生物提供大量的养分,其活性增强,分解速率在 3~5 d 内达到高峰;随着易分解组分的殆尽,难分解组分能提供给微生物能量的物质较少,释放缓慢,其活性降低,导致培养后期有机碳分解缓慢,甚至不同有机肥料之间的分解速率也趋于接近。C/N 最高的商品有机肥在整个培养期内,虽然 0~25 d 的日均 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放量高于 26~90 d,但总体上分解缓慢,分解速率变化不甚明显。商品有机肥的分解变化规律不同于油菜饼肥和秸秆堆肥可能原因在于:商品有机肥的氮含量最低且成分复杂,除了秸秆、菜饼以外,还有动物粪便、鱼粉、骨粉、有机固体废弃物等,经微生物菌种发酵腐熟后,性质较为稳定;其中含有一些非植物性成分,微生物对此类物质的分解效率不同于植物性成分。因此,表现出较为缓慢的分解特性。

2.2 不同有机肥处理对土壤有机碳矿化影响的差异

有机肥施入土壤后,受土壤微生物、温度和水分等条件的影响而发生有机质的机械粉碎、分解、合成等作用,最后成为土壤有机质的重要组成部分。在土壤有机质矿化过程中,养分得到释放,供植物吸收利用。一般认为,矿化过程中易分解部分需要 2~3 个月,而难分解部分则需要 1~2 年甚至更长时间^[12]。因此,施加不同种类有机肥料后,土壤有机碳的矿化过程存在差异。

表 3 分别列出了在三种有机肥料处理方式下,三个相等的时间段内,土壤有机碳的累积矿化量和矿化率。可以看出,在 0~90 d 的各培养时段内,三种肥料处理之间土壤有机碳累积矿化量均有极显著性差异 ($P<0.01$),其中油菜饼肥处理>秸秆堆肥处理>商品有机肥处理。这与三种有机肥料的 C/N 高低和分解速率

大小一致,说明外源有机物分解的快慢,直接影响到土壤有机碳矿化量的高低。

在培养前期(0~30 d),三种处理方式下土壤有机碳累积矿化量均极显著 ($P<0.01$) 高于培养中期和(31~60 d)和后期(61~90 d)。它们分别占各自 90 d 土壤有机碳累积矿化总量的 54.56%、58.45% 和 54.19%,可见土壤有机碳的矿化主要集中在第一个月。另外,三种处理方式下,各自在培养中期和后期的土壤有机碳累积矿化量均无显著差异 ($P>0.05$),说明随着时间的延长,外源有机碳和土壤原有有机碳矿化速率逐渐降低,土壤有机碳的矿化量变化很小。

2.3 有机种植农田土壤有机碳模拟模型的参数确定

要定量分析有机种植中不同种类有机肥及土壤原有有机碳的分解动态变化,预测土壤固碳潜力,需借助一个可靠的模型来进行模拟。鉴于国外经典的 CENTURY^[18-19]、DNDC^[20]和 Roth C^[21]等模型分室复杂、输入参数多、变量参数难以获取等局限性,本研究选取了分室较为简单、环境影响因子更易获取的农田土壤有机碳动态模拟模型。该模型在常规种植方式下已得到广泛应用。由于有机种植系统中投入肥料种类和数量的不同,土壤微生物特性发生改变,土壤有机碳动态变化规律会存在差异。因此,需要对模型中的相关参数数值进行调节。

农田土壤有机碳动态模拟模型中共有 4 个需要设定的参数,分别是 F 、 K_1 、 K_2 和 K_s 。施入土壤的有机肥料可成为土壤有机碳库的重要组成部分,其有机碳分解量的大小,直接影响到土壤有机碳库的动态平衡。而确定有机肥料的易分解比 F 是量化描述有机肥料在施入土壤后分解的关键。已有大量研究证实,外源有机物料的初始全氮含量与木质素含量决定其 F 值大小。早在上世纪 90 年代,Parton 等^[22-23]就提出,有机物料的易分解比例 F 满足 $F=0.99-0.018L/N$ 。而根据沈雨^[13]的实验室培养测定结果,植物残体的

表 3 不同处理方式下各时间段内土壤有机碳累积矿化量与矿化率

Table 3 Organic carbon mineralization ratio and total amount of mineralized organic carbon in soil with different fertilizer treatment in each incubation periods

处理方式	培养时段							
	0~30 d		31~60 d		61~90 d		0~90 d	
	矿化量/mg	矿化率/%	矿化量/mg	矿化率/%	矿化量/mg	矿化率/%	矿化量/mg	矿化率/%
商品有机肥	141.74±11.63aA	4.31	67.02±9.73aA	2.04	50.92±9.95aA	1.55	259.68±12.78aA	7.90
油菜饼肥	365.31±15.03cC	9.51	143.91±14.06cC	3.75	115.62±14.31cC	3.01	624.84±15.22cC	16.27
秸秆堆肥	240.66±12.24bB	6.73	113.35±13.01bB	3.17	90.36±11.86bB	2.52	444.37±12.49bB	12.42

注:同一列中不同大、小写字母分别表示具有极显著 ($P<0.01$) 和显著性 ($P<0.05$) 差异。

$\text{CO}_2\text{-C}$ 矿化率 $F(C)$ 满足方程:

$$F(C) = 100 + 0.974N - 0.364L$$

式中: N 为肥料初始全氮含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

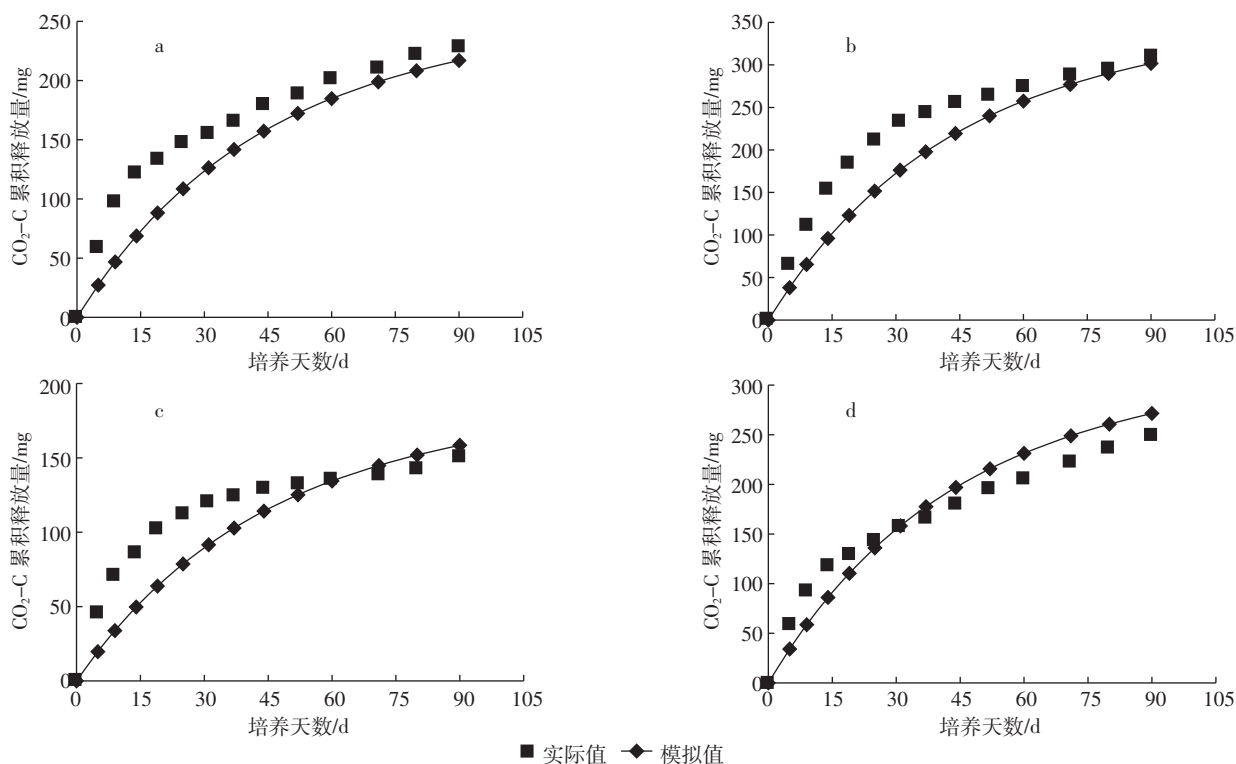
L 为肥料初始木质素含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

研究中测定了三种肥料的全氮及木质素含量,并计算出各自的 $F(C)$, 其中 $F(C_{\text{SP}}) = 0.22$ 、 $F(C_{\text{BF}}) = 0.57$ 、 $F(C_{\text{DF}}) = 0.47$ 。将 $F(C)$ 分别作为三种肥料的易分解比 F 。利用公式(1)、(3)、(4)和(5), 采用非线性回归的方法确定参数 $K_1 = 0.019 \text{ d}^{-1}$ 、 $K_2 = 0.97 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ (决定系数 $R^2 = 0.9079$); 并运用相同方法, 利用公式(2)、(3)、(4)和(5)计算出 $K_s = 0.80 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ (决定系数 $R^2 = 0.7874$)。 K_1 、 K_2 的值与刘世梁的研究相近, K_s 的值则较其研究中所获数据偏高。可能原因在于: 首先, 刘世梁的研究中的供试土壤为水稻土, 其有机碳是在淹水条件下厌氧呼吸, 分解要低于好氧呼吸条件下的菜园土; 其次, 有机种植较常规种植的土壤容重小, 养分含量高, 微生物活性强, 分解速率更快, 因此一级动力学常数较大。

2.4 不同混施比例对有机肥分解特性的影响

有机种植方式主要靠施用有机肥和合理的农业

管理措施来满足作物的养分需求。有机肥料与化肥相比, 其养分释放速率慢, 因此有可能影响作物产量^[24]; 对于生长周期长的作物, 单靠施用基肥就可能会造成生长后期养分供应不足, 而对生长期短的作物, 往往存在养分供应强度低的问题。上文的培养实验结果表明, 若基肥为油菜饼肥, 则需要在一个左右追肥一次为宜。以商品有机肥为基肥, 若在作物生长前期, 配施一些分解较快的有机肥料, 会更有利于作物的生长, 而配施的有机肥料是否会对原有基肥的分解造成影响, 这是值得研究的问题。因此, 本研究将三种有机肥料中 C/N 最低、分解速率最快的油菜饼肥与其他两种肥料按表 2 中处理五至处理八的方式混合, 在实验室控制条件下, 测定分解过程中的肥料混合处理下 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积释放量。同时, 用农田土壤有机碳动态模拟模型, 即公式(1), 计算出相同培养条件、相同质量的单一肥料 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积释放量, 再将两种有机肥料的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积释放量之和与测定值比较, 若实际测定 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积释放量显著高于模型模拟值, 则说明该比例混施, 油菜饼肥中的氮含量能显著提高另一种有机肥的分解。



a 为商品有机肥和油菜饼肥 1:1 混合; b 为秸秆堆肥和油菜饼肥 1:1 混合;
c 为商品有机肥和油菜饼肥 2:1 混合; d 为秸秆堆肥和油菜饼肥 2:1 混合

图 2 不同混施比例对有机肥分解的影响

Figure 2 Effects on decomposition of organic fertilizer with different mixed ratios

图 2-a 和图 2-b 分别是商品有机肥和油菜饼肥、秸秆堆肥和油菜饼肥 1:1 混合施用,测定值与模拟值的比较结果。从图 2-a 可看出,在培养周期内,各时段的实际测定值均极显著高于模型模拟值($P<0.01$),表明商品有机肥与油菜饼肥 1:1 混合能极显著提高商品有机肥的分解率。在图 2-b 中,培养前 60 d 各时段的实际值均远高于模拟值,而在培养后期(61~90 d),两组数值逐渐接近,但实际值仍略高于模拟值。数据检验结果表明,秸秆堆肥和油菜饼肥 1:1 混合施用亦能极显著提高秸秆堆肥的分解率($P<0.01$)。

图 2-c 和图 2-d 分别是商品有机肥和油菜饼肥、秸秆堆肥和油菜饼肥 2:1 混合施用,测定值与模拟值的比较结果。图 2-c 的结果表明,培养前期,CO₂-C 的实际累积释放量明显高于模拟累积释放量。而随着培养时间的延长,两者差距逐步缩小,并趋于接近。统计结果表明,两组数据之间仍具有极显著差异($P<0.01$),因此可以认为,当商品有机肥和油菜饼肥 2:1 混合施用能极显著提高商品有机肥的分解率。而从图 2-d 可以发现,实际值较模拟值呈现先高后低的趋势,数据检验结果表明,两组数据之间无显著性差异($P>0.05$),说明当秸秆堆肥和油菜饼肥 2:1 混合施用,油菜饼肥中的氮含量不足以显著促进秸秆堆肥的分解。

3 结论

(1)不同有机肥的分解特性差异极大,其中 C/N 较低的油菜饼肥和秸秆堆肥其分解速率动态呈现施入初期明显的快升快降特点,而 C/N 较高的商品有机肥分解速率低而且变化平缓。三种肥料的有机碳分解速率为油菜饼肥>秸秆堆肥>商品有机肥。土壤有机碳矿化率的高低与有机肥的分解速率呈显著正相关($P<0.05$)。不同处理方式下土壤有机碳累积矿化量均是培养前期(0~30 d)极显著($P<0.01$)高于培养中期(31~60 d)和培养后期(61~90 d)。而各处理土壤有机碳累积矿化量在培养中期和后期均无显著差异($P>0.05$)。

(2)实验室控制条件下的土壤培养结果,利用农田土壤有机碳模拟模型可以很好地模拟有机种植的土壤有机碳动态变化。模型的动力学参数 K_1 、 K_2 、 K_s 分别确定为 0.019、 0.97×10^{-3} 、 $0.80\times 10^{-3}(\text{d}^{-1})$;三种有机肥料的易分解比 $F(\text{SP})$ 、 $F(\text{BF})$ 和 $F(\text{DF})$ 分别为 0.22、0.57 和 0.47。

(3)培养实验结果表明,商品有机肥与氮含量最

高、分解最快的油菜饼肥混合比例达 2:1 时,就能极显著提高商品有机肥的分解率($P<0.01$);而秸秆堆肥与油菜饼肥 2:1 混合时对秸秆堆肥的分解无显著影响($P>0.05$),但当秸秆堆肥与油菜饼肥比例为 1:1 时,也能极显著提高秸秆堆肥的分解率($P<0.01$)。因此,在有机农业生产中,可根据不同基肥种类,按比例配施养分高、分解快的有机肥料以促进基肥的分解,以满足作物生长对养分的需求。

参考文献:

- [1] 潘根兴. 农业土壤固碳与缓解气候变化[J]. 国际学术动态, 2009(6): 25-27.
PAN Gen-xing. Soil carbon sequestration in agriculture and climate change mitigation[J]. *International Academic Development*, 2009(6): 25-27.
- [2] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患: 中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345-350.
LI Chang-sheng. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U. S [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 345-350.
- [3] 刘月仙, 吴文良, 蔡新颜. 有机农业发展的低碳机理分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 441-446.
LIU Yue-xian, WU Wen-liang, CAI Xin-yan. Analysis of potentials of greenhouse gas emissions reduction and soil carbon sequestration in organic agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 441-446.
- [4] 欧阳喜辉, 周绪宝, 王 宇. 有机农业对土壤固碳和生物多样性的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(11): 224-230.
OUYANG Xi-hui, ZHOU Xu-bao, WANG Yu. Progress in functions of organic agriculture in soil carbon sequestration and biodiversity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(11): 224-230.
- [5] 邓祥征, 赵永宏, 战金艳, 等. 农田碳汇估算模型与应用研究评述[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17649-17652, 17691.
DENG Xiang-zheng, ZHAO Yong-hong, ZHAN Jin-yan, et al. Research review on the estimation models and the applications of cropland carbon sequestration[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(35): 17649-17652, 17691.
- [6] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. *Geoderma*, 1997(81): 153-225.
- [7] Bjørn M Petersen, Jørgen Berntsen, Søren Hansen, et al. CN-SIM—a model for the turnover of soil organic matter I.: Long-term carbon and radiocarbon development[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005(37): 359-374.
- [8] Bjørn M Petersen, Lars S Jensen, Søren Hansen, et al. CN-SIM—a model for the turnover of soil organic matter II.: Long-term carbon and radiocarbon development[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005(37): 375-393.
- [9] HUANG Yao, YU Yong-qiang, ZHANG Wen, et al. Agro-C: A biogeo-

- physical model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009(149):106-129.
- [10] Jenkinson D S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil[J]. *Philos Trans R Soc B*, 1990(329):361-368.
- [11] 黄 耀, 刘世梁, 宗良纲, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5):532-536.
HUANG Yao, LIU Shi-liang, ZONG Liang-gang, et al. Model establishment for simulation soil organic carbon dynamics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(5):532-536.
- [12] 刘世梁, 黄 耀, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的检验与应用[J]. 中国农业科学, 2001, 34(6):644-648.
LIU Shi-liang, HUANG Yao, SHEN Qi-rong, et al. Validation and application of a soil organic carbon model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(6):644-648.
- [13] 沈 雨. 基于模型和 GIS 的江苏省农田土壤有机碳变化研究[D]. 南京:南京农业大学, 2003:7-16.
SHEN Yu. Simulation and prediction of soil organic carbon dynamics in Jiangsu Province based on model and GIS techniques[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003:7-16.
- [14] 刘世梁. 农田土壤有机碳模型动态模拟研究[D]. 南京:南京农业大学, 2000:7-10.
LIU Shi-liang. Modeling soil organic carbon dynamics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2000:7-10.
- [15] 熊素敏, 左秀凤, 朱永义. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. 粮食与饲料工业, 2005(8):40-41.
XIONG Su-min, ZUO Xiu-feng, ZHU Yong-yi. Determination of cellulose, hemicellulose and lignin in rice hull[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2005(8):40-41.
- [16] Romualdo S, Ronald D. Comparison of the acetyl bromide spectrophotometric method with other analytical lignin methods for determining lignin concentration in forage samples[J]. *J Agric Food Chem*, 2004(52):3713-3720.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [18] 高崇升, 杨国亭, 王建国, 等. CENTURY 模型在农田生态系统中的应用及其参数确定[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(1):50-52.
GAO Chong-sheng, YANG Guo-ting, WANG Jian-guo, et al. CENTURY model's application in farmland ecosystem and its parameters determination[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2006, 22(1):50-52.
- [19] GAO Chong-sheng, WANG Jian-guo, ZHANG Xing-yi, et al. The evolution of organic carbon in Chinese mollisol under different farming systems: validation and prediction by using century model[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(12):1490-1496.
- [20] 王立刚, 邱建军, 马永良, 等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6):15-19.
WANG Li-gang, QIU Jian-jun, MA Yong-liang, et al. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6):15-19.
- [21] 王金洲, 卢昌艾, 张金涛, 等. RothC 模型模拟华北潮土区的土壤有机碳动态[J]. 中国土壤及肥料, 2010(6):16-21.
WANG Jin-zhou, LU Chang-ai, ZHANG Jin-tao, et al. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics of fluvo-aquic soil in Northern China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6):16-21.
- [22] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in grasslands[J]. *Soil Science Society of America*, 1987, 51(5):1173-1179.
- [23] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Observation and modeling of biomass and organic dynamics for the grassland bounce worldwide[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993(7):785-809.
- [24] 王大鹏, 吴文良, 顾松东, 等. 中国有机农业发展中的问题探讨[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊. 1):250-255.
WANG Da-peng, WU Wen-liang, GU Song-dong, et al. Problems in development of organic farming in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(Suppl 1):250-255.
- [25] 于永强, 黄 耀, 张 稳. 华东地区农田土壤有机碳动态模拟研究:模型的验证与灵敏度分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(6):83-88.
YU Yong-qiang, HUANG Yao, ZHANG Wen. Modeling farmland soil organic carbon dynamics in Eastern China: Model validation and sensitivity analysis[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(6):83-88.
- [26] 于永强, 黄 耀, 张 稳, 等. 华东地区农田土壤有机碳时空格局动态模拟研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1):97-100.
YU Yong-qiang, HUANG Yao, ZHANG Wen, et al. Modeling farmland soil organic carbon dynamics in Eastern China: Spatio-temporal pattern[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(1):97-100.