

外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响

曲晓晶^{1,2}, 吴景贵¹, 李建明¹, 胡娟¹, 张乐乐²

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林市农业科学院, 吉林 吉林 132101)

摘要: 为了阐释外源有机碳在土壤有机碳运转中的作用机制, 以黑土为供试材料, 进行了5年的室外培养试验, 并结合室内全土及颗粒组分单独矿化培养试验, 研究了不同外源有机碳对黑土有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)含量及其矿化特征的影响。试验包括单施化肥、牛粪配施化肥、鸡粪配施化肥、秸秆配施化肥和树叶配施化肥5个处理。结果表明: (1) 单施化肥黑土SOC的损失主要来源于POC的损失, 外源有机碳有利于SOC和POC的累积, 与对照相比, 禽畜粪便处理的SOC和POC平均增加幅度分别为16.6%和27.8%, 植物残体处理的SOC和POC平均增加幅度分别为27.0%和46.4%; (2) 一级动力学方程能较好地描述SOC和POC的矿化动态($R^2 > 0.9$), 且POC比SOC易矿化, POC的60 d累积矿化量是SOC的3倍以上; (3) 禽畜粪便处理和植物残体处理的POC平均矿化率分别为31.5%和29.8%, 禽畜粪便处理的POC更易矿化; (4) 外源有机碳有效降低了黑土有机碳的矿化, 尤其是牛粪, 其SOC矿化率为1.9%, 比对照低了3.4%, 其POC矿化率为24.8%, 比对照低17.4%; (5) 外源有机碳在黑土中的碳累积能力表现为树叶>秸秆>牛粪>鸡粪。

关键词: 外源有机碳; 颗粒有机碳; 矿化

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0278-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.043

Effect of Exogenous Organic Carbon on Soil Organic Carbon and Particulate Organic Carbon in Black Soil

QU Xiaojing^{1,2}, WU Jinggui¹, LI Jianming¹, HU Juan¹, ZHANG Lele²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2. Jilin City Academy of Agricultural Sciences, Jilin Jilin 132101)

Abstract: To definite the mechanism of the effects of exogenous organic carbon on soil organic carbon transport, we studied effect of exogenous organic carbon on concentrations and mineralization characteristics of soil organic carbon (SOC) and particular organic carbon (POC). We conducted a 5-year outdoor culture combined with the mineralization culture to analyze the translocation. There were 5 treatments: single chemical fertilizer, cow manure combined chemical fertilizer, chicken manure combined chemical fertilizer, corn stalks combined chemical fertilizer and poplar leaves combined chemical fertilizer. The results showed that: (1) SOC loss amount of the control in black soil mainly came from POC loss. The exogenous organic carbon was conducive to the accumulation of SOC and POC. Compared with the control, the average SOC and POC of animal manure treatments increased 16.6% and 27.8% respectively; plant residues treatments increased 27.0% and 46.4% respectively; (2) The dynamics of both SOC and POC mineralization preferably followed the first-order kinetics ($R^2 > 0.9$). POC was more easily mineralized than SOC. The 60 days cumulative mineralization amounts of POC were 3 times higher than SOC; (3) The average POC mineralization rate of the treatments added animal manure or plant residues was 31.5% and 29.8% respectively. POC of animal manure treatment was easier to be mineralized. (4) The mineralization of black soil organic matter can be retarded by the addition of exogenous organic matter, especially the cow manure. The SOC mineralization rate of the cow manure treatment was 1.9%, 3.4% lower than the control. The POC mineralization rate was 24.8%, 17.4% lower than the control; (5) The ability of storage carbon of exogenous organic carbon in black soil

收稿日期: 2017-04-07

资助项目: 吉林省科技厅重大科技招标专项(20150203004NY); 国家重点研发计划项目(2017YFD0201801)

第一作者: 曲晓晶(1980—), 女, 在读博士研究生, 主要从事农业资源循环利用与土壤生境研究。E-mail: qxj8111@126.com

通信作者: 吴景贵(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤环境优化与农业废弃物资源化研究。E-mail: wujingguik@163.com

followed the order of poplar leaves > corn stalks > cow manure > chicken manure.

Keywords: exogenous organic carbon; particulate organic carbon; mineralization

土壤有机质是评价土壤质量的一个重要指标,按其生物稳定性、分解率及周转时间划分成不同的组分^[1],其中,土壤活性有机碳是其最敏感的组分,在作物生长过程中最容易被利用,也是最不稳定的部分^[2],与土壤内在的生产力高度相关^[3],近年来,土壤活性有机碳已成为研究热点^[4]。黑土是有机碳含量最高的土壤类型,但由于人们的不合理利用,导致黑土迅速退化。黑土区最有效的土壤固碳措施是增加土壤外源有机碳投入^[5],因此,研究外源有机碳在黑土中的运转机制,对保护及修复黑土具有重要的意义。颗粒有机碳(POC)是土壤活性有机碳库的重要部分,在土壤中周转速度较快,一般为 5~20 年^[6]。POC 是判断外界因素对土壤有机碳(SOC)短期影响的敏感指标^[7-8],对农业管理措施响应程度最高^[3]。土壤有机碳的降解(物理、化学和生物降解)主要通过矿化分解来体现,其矿化过程是土壤碳循环的关键步骤,是反映土壤质量变化的重要指标^[9]。土壤活性有机碳具有极易矿化分解的特征^[2],因此,本文采用室内矿化培养试验,通过研究不同外源有机物料添加后 SOC 和 POC 的矿化特征,反应其对土壤固碳影响的差异。研究外源有机碳对 POC 的含量及矿化特征的影响,对深入了解土壤有机碳周转机理具有重要的意义。

目前,国内外关于 POC 的研究较多,但多数以林地为研究对象,且耕地多以耕作措施或土地利用方式对比研究^[10],针对不同有机物料对 POC 影响的对比研究较少,且物料的选择一般少于 3 种。从有机碳源角度,选取多种有机物料对比的研究鲜有报道。有研究显示,土壤颗粒有机碳比例越高,土壤碳库越不稳定^[11];也有研究表明,颗粒有机碳对土壤团聚体有物理保护作用,有利于土壤固碳^[12]。可见,对于 POC 在土壤固碳方面的作用存在一定的争议。有机碳矿化方面的研究较全面系统,但都是以土壤整体为碳排放研究对象^[13-14],将颗粒碳提取出来进行独立分析的研究鲜有报道^[15]。

我国有机物料农业高效应用较国外发展缓慢,至今仍以有机无机配施为主。因此,本文主要研究在施用化肥的前提下,添加有机物料对土壤有机碳的影响。从不同碳源角度入手,选择了禽畜粪便有机碳源(牛粪、鸡粪)和植物残体有机碳源(玉米秸秆、杨树落叶)进行添加,研究有机物料大部分腐解后的土壤碳环境,并结合室内的矿化分析,以便更准确地反应有机物料对土壤固碳影响的差异,为揭示外源有机碳对土壤有机碳分解转化的影响机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自吉林农业大学试验田,为长期施用化肥的耕地,黄土母质,草甸黑土,其表土(0—20 cm)基本性质为:pH 为 6.76;SOC 含量为 13.62 g/kg;POC 含量为 4.71 g/kg;全氮为 1.19 g/kg;碱解氮为 0.118 g/kg;速效磷为 0.067 g/kg;速效钾为 0.185 g/kg;含水率为 18.1%。本试验为培养试验,培养时间为 5 a(2010—2015 年)。

1.2 试验方法

室外培养试验为露天培养,为便于研究外源有机碳在土壤中的分解转化,有机物料及化肥仅于 2010 年培养前添加 1 次,共设 5 个处理:单施化肥处理(CK)、牛粪处理(Animal manure+NPK,AM1)、鸡粪处理(Animal manure+NPK,AM2)、秸秆处理(Plant residue+NPK,PR1)和树叶处理(Plant residue+NPK,PR2)。目前,秸秆还田是我国农业循环利用中的一项重要措施,是农田生态系统碳循环的至关重要环节^[16],因此,本文有机物料的添加量以秸秆为参照,进行等碳计算各有机物料用量。根据现有研究综合分析^[17-19],确定本试验较适宜的秸秆添加量为 14 000 kg/hm²。

有机物料与等量化肥添加土壤后(添加量见表 1),混合均匀装盆培养。其中,禽畜粪便为鲜粪;秸秆为粉碎的秋季自然风干玉米秸秆;树叶为秋季杨树落叶。处理后土壤置于直径 33 cm、深 40 cm 的圆柱形专用培养盆露天培养,每盆土壤重 12 kg,每个处理 3 次重复。外源有机物料的基本性质及添加量见表 2,肥料由众德肥料有限公司生产的复混肥, $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=28:14:13$,总养分>55%,添加量为每盆 50 g。

表 1 有机物料主要性质及添加量

有机物料	干物质含碳量/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	每盆添加 干物质量/kg
牛粪	308.30	24.5	0.15
鸡粪	262.05	12.5	0.17
秸秆	393.08	58.3	0.12
树叶	317.05	47.5	0.14

室内矿化培养采用密闭装置碱液吸收法^[20]:分别称过 2 mm 筛的风干土 50 g 和 POC(提取烘干后研磨过筛)10 g 平铺于密闭容器中,调节含水量至田间持水量的 60%,设 3 次重复,分别吸取 20 mL 浓度 1 mol/L 的 NaOH 溶液和 50 mL 去 CO₂ 的蒸馏水于小烧杯中,置于密闭容器内,在(25±2)℃恒温恒湿光

照培养箱中培养。

有机物料的腐解时间与 C/N 成正比^[21],本试验选取的有机物料中秸秆的 C/N 最高(表 2),而秸秆腐解 4 a 后其残留率在 20%左右^[22]。因此,本试验选择在室外培养 5 a(2010—2015 年)后取样,即 2015 年 7 月。为确保样品能够反映整盆土壤的碳环境,每盆土选取中心点和边际点 2 个采样点取土,每个采样点取 0—20 cm 土层土壤,混合均匀后,称取约 200 g 土样,分成 2 部分,一部分自然风干备用,一部分储存于 4 ℃冰箱内,矿化培养备用。其中,风干土一部分研磨过 0.149 mm 筛,用于测定 SOC;一部分研磨过 2 mm 筛,用于提取 POC。SOC 和 POC 测定均采用重铬酸钾外加热法^[23]。

POC 提取采用湿筛法^[24]:称过 2 mm 筛的风干土 30 g 于 250 mL 三角瓶,每个处理 3 次重复,加 100 mL 浓度 5 g/L 的(NaPO₃)溶液,振荡 16 h 后,将土壤悬液过 0.053 mm 筛,用蒸馏水反复冲洗,筛上物质即土壤颗粒组分,将其收集于小烧杯中,置于 60 ℃烘箱烘至恒重,研磨过 2 mm 筛备用。

矿化培养样品分别于培养 1,3,5,7,10,15,20,30,40,60 d 取出 NaOH 溶液,用 HCl 标准液滴定,计算 CO₂ 量,分别求出 SOC 和 POC 矿化量。

1.3 计算方法

有机碳损失量=原土壤有机碳量+有机物料添加有机碳量-试验后土壤有机碳量

矿化率=累积矿化碳量×100%/总有机碳量

应用一级动力学方程分析 SOC 和 POC 的矿化动态^[25]。

$$C_t=C_0(1-e^{-kt})$$

式中:C₀为潜在矿化有机碳(mg/kg);k为有机碳矿化速率常数,即周转速率;t为天数;C_t为培养时间为 t 时有机碳累积矿化量(mg/kg)。

试验数据采用 Excel 2003、SPSS v21.0、Origin 8.0 软件进行整理和分析,方差分析多重比较采用 LSD 法,在 p<0.05 水平下检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 外源有机碳对 SOC 和 POC 含量的影响

由表 2 可知,各处理间 SOC 和 POC 含量的差异显著。添加有机物料处理的 SOC 均显著高于对照,其含量顺序为树叶处理>秸秆处理>牛粪处理>鸡粪处理>对照。有机物料处理的平均 SOC 含量比单施化肥增加了 17.9%,其中,牛粪处理和鸡粪处理的 SOC 和 POC 含量差异均不显著,且 POC 变化规律与 SOC 一致(表 2)。对照有 POC 比例最低,秸秆处理最高,比对照高了 5.8%,其次是树叶处理,而牛粪

处理和鸡粪处理的 POC 比例无显著差异。可见,外源有机碳有利于提高 SOC、POC 及 POC 比例,牛粪和鸡粪对其影响相近,而秸秆和树叶差异显著。

表 2 不同处理的 SOC 和 POC 含量

处理	SOC/ (g·kg ⁻¹)	POC/ (g·kg ⁻¹)	POC 比例/%
CK	12.03±0.13d	3.78±0.04d	31.4±0.4d
AM1	14.20±0.25c	4.86±0.08c	34.3±0.6c
AM2	13.86±0.37c	4.79±0.02c	34.6±0.1c
PR1	14.68±0.11b	5.46±0.03b	37.2±0.2a
PR2	15.88±0.19a	5.61±0.03a	35.3±0.2b

注:表中数据=平均值±标准误;不同字母表示不同处理间 p<0.05 水平下差异显著。下同。

由图 1 可知,禽畜粪便处理的 SOC 损失量显著高于植物残体处理。有机物料处理中,树叶处理最低(1.51 g/kg),且与对照(1.59 g/kg)相近,无显著差异;其次是秸秆处理(2.71 g/kg);牛粪和鸡粪处理的差异不明显,且鸡粪处理 SOC 损失量最高(3.53 g/kg)。可见,禽畜粪便添加后,SOC 较植物残体添加更易分解,尤其是鸡粪,而树叶则利于土壤固碳。由 POC 的损失可以看出,禽畜粪便处理 POC 损失无显著差异,且基本与对照相等,但显著高于植物残体处理,约高 72%,而 2 种植物残体处理的 POC 损失也无显著差异,禽畜粪便处理引入了外源 POC 后,其 POC 损失量仍与对照相近,而植物残体处理显著低于对照,说明与对照相比,禽畜粪便处理的 POC 基本达到收支平衡,而植物残体处理 POC 有明显的累积趋势。同时,POC 损失量占 SOC 损失量的百分比表现为对照>树叶处理>牛粪处理>鸡粪处理>秸秆处理。对照土壤的 SOC 损失主要来自于原土中 POC 的分解(POC 损失占比约 58%),而有机物料处理 SOC 损失主要来自于外源有机质的降解,从而在一定程度上降低了原土中 POC 的分解速度,尤其是秸秆。

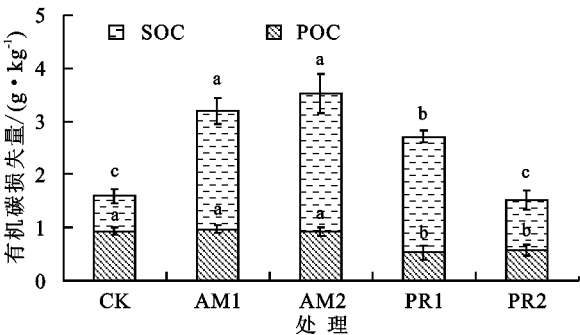


图 1 不同处理有机碳的损失量

2.2 外源有机碳对土壤有机碳矿化的影响

2.2.1 SOC 和 POC 累积矿化量 由图 2 可知,SOC 累积矿化量显著低于 POC 累积矿化量。培养到 60 d 时,SOC 平均累积矿化量约为 465 mg/kg,POC 平均累积矿化量是 SOC 累积矿化量的 3 倍以

上,约为 1 590 mg/kg。

矿化培养过程中,对照的 SOC 累积矿化量一直高于有机物料处理,牛粪和秸秆处理一直低于其他有机处理。60 d 累积矿化量对照最高,为(630.0±25.6)mg/kg,牛粪处理最低,为(267.0±20.0)mg/kg,其他处理表现为鸡粪处理>树叶处理>秸秆处理。培养时间小于 10 d 时,鸡粪处理和树叶处理的累积矿化量相近,10 d 累积矿化量分别为(135.2±6.9)mg/kg 和(128.8±7.1)mg/kg,无显著差异,随着培养时间的增加,鸡粪处理的累积矿化量逐渐超过了树叶处理,培养结束后,鸡粪处理比树叶处理高 13.6%。

POC 累积矿化量整体看表现为,牛粪处理最低,60 d 累积矿化量(1 205.6±41.1)mg/kg(图 2),对照、牛粪、鸡粪、秸秆和树叶处理的平均日矿化量分别约为 28.4,21.2,31.2,35.3,36.3 mg/kg。培养过程中,鸡粪处理和对照的 POC 累积矿化量变化规律基本一致,无显著差异,仅当培养时间大于 30 d 时,鸡

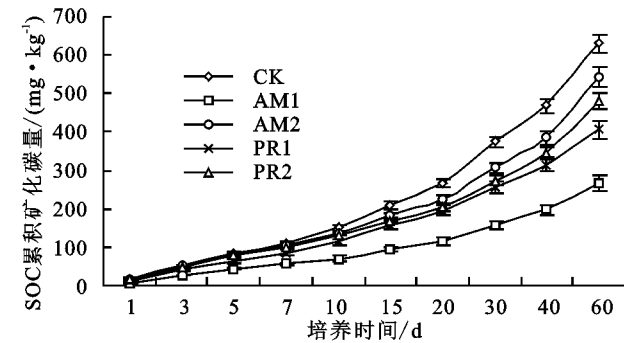


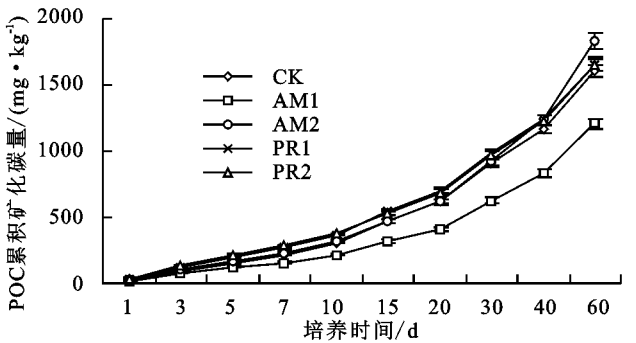
图 2 不同处理 SOC 和 POC 积累矿化碳动态变化

2.2.2 SOC 和 POC 矿化速率 各处理 SOC 和 POC 矿化速率均表现为随培养时间的加快,先大幅度增高,再急速下降(图 3)。对照、牛粪、鸡粪、秸秆和树叶处理的 SOC 平均矿化速率分别为 12.4,5.6,11.3,9.1,10.3 mg/(kg·d);各处理 POC 平均矿化速率分别为 28.5,20.6,30.9,32.6,32.8 mg/(kg·d)。各阶段 POC 的矿化速率均显著高于 SOC,约为 SOC 的 3 倍。

SOC 矿化速率在培养第 3 天时达到最高峰(图 3),对照的矿化速率(19.3 mg/(kg·d))显著高于有机物料处理;有机物料处理中,鸡粪处理的矿化速率最高(17.3 mg/(kg·d)),牛粪处理最低(10.1 mg/(kg·d));与培养 1 d 时相比,对照土壤培养 3 d 时的矿化速率增长速度超过了 130%,而有机物料处理的矿化速率增长低于 75%。培养 3 d 后,SOC 矿化速率开始大幅下降,且对照的矿化速率显著高于有机物料处理;培养 30~60 d,各处理矿化速率表现为对照>鸡粪处理>秸秆处理>树叶处理>牛粪处理;培养 60 d 时,对照和鸡粪处理的矿化速率(8.0 mg/(kg·d)和 7.9 mg/(kg·d))无明显差异,但显著高于其他处理(3.5~6.8 mg/(kg·d)),其中,牛粪、鸡粪和树叶处理的矿化速率变化幅度小于 5%,而其

粪处理的矿化量有显著增长趋势,且明显高于对照,而秸秆和树叶处理的 POC 累积矿化量动态变化曲线基本重合,无明显差异。

牛粪处理的 SOC 和 POC 累积矿化量均最低,且有机物料处理的 SOC 累积矿化量显著低于对照,说明有机物料有抑制土壤矿化的作用。其中,牛粪抑制作用最强,且其 POC 组分较其他处理不易矿化。对照的 POC 累积矿化量除显著高于牛粪处理外,低于其他处理,可见,化肥促进了 SOC 的矿化,但对其 POC 矿化却有一定的抑制作用。说明化肥促进了除 POC 外其他有机碳组分的矿化,其中可能包括结构相对稳定的有机碳组分,不利于土壤固碳。同样,除牛粪处理外,有机物料处理的 POC 矿化量略高于化肥处理,尤其是鸡粪处理矿化后期有明显的增长趋势,鸡粪、秸秆和树叶的添加抑制了 SOC 的矿化,但却加速了 POC 的矿化,这可能是由于其他有机碳组分矿化降低导致的。



他处理则高于 10%。可见,牛粪、鸡粪和树叶处理 SOC 矿化速率在培养 60 d 后有趋于平稳的趋势。牛粪处理 SOC 矿化速率在整个培养过程中一直处于最低水平,培养后期,秸秆处理 SOC 矿化速率有接近牛粪的趋势,对照土壤从培养 3 d 起 SOC 矿化速率一直处于最高水平。

由图 3 可知,牛粪处理的 POC 矿化速率在整个培养过程中一直处于最低水平。POC 矿化速率也在培养 3 d 时达到高峰,随后大幅下降,趋于平稳。培养时间小于 7 d 时,各处理 POC 矿化速率表现为树叶处理>秸秆处理>鸡粪处理>对照>牛粪处理;培养 7~30 d 时,秸秆处理 POC 平均矿化速率(33.0 mg/(kg·d))最高,牛粪处理(19.6 mg/(kg·d))最低;培养 30 d 后,对照、秸秆和树叶处理的 POC 矿化速率急剧下降,下降率分别为 3%,13%和 10%,且三者的矿化速度差异较小;培养 60 d 时,其矿化速率分别为 22.3,21.0,20.7 mg/(kg·d)。从培养第 10 天开始,鸡粪处理的 POC 矿化速率呈小幅上升趋势,至培养 30 d 时,达到了 30.8 mg/(kg·d),显著高于其他处理,培养 60 d 时,略有下降(约下降 2%),趋于平稳,但仍显著高于其他处理。与其他有机物料相比,

鸡粪的添加促使土壤中 POC 组分易矿化;与对照相比,秸秆和树叶的添加对土壤 POC 组分矿化的影响并不明显,说明其 POC 结构可能相近,而牛粪的添加抑制了 POC 的矿化。

对照 SOC 的矿化速率高,而 POC 低,说明,化肥可能加快了土壤有机碳中相对稳定组分的矿化,结果

与累积矿化量一致。鸡粪处理的 SOC 和 POC 矿化速率均表现为培养后期高于其他有机物料处理,说明鸡粪促进了土壤 POC 的矿化。与对照相比,牛粪明显抑制了 SOC 矿化的同时,也降低了 POC 的矿化,相对其他处理其矿化规律较稳定,说明牛粪利于土壤固碳,且性质较稳定,与累积矿化碳量结果一致。

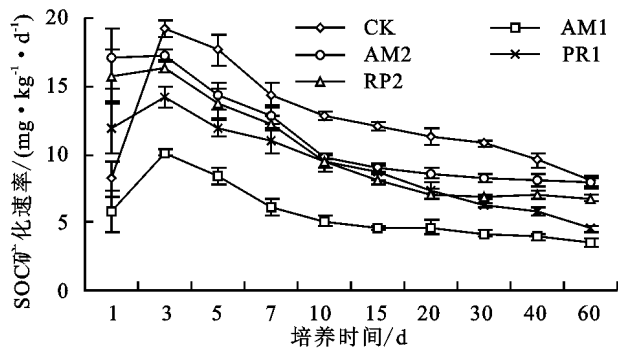
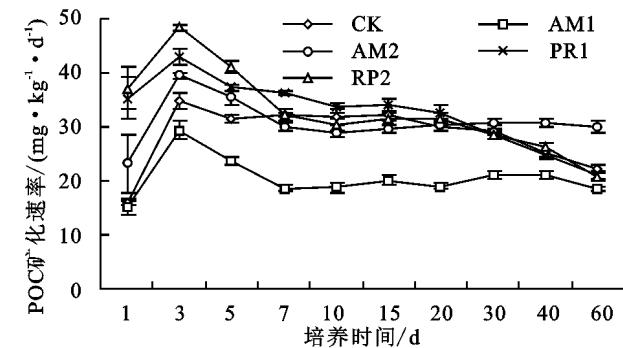


图 3 不同处理 SOC 和 POC 矿化速率动态变化

2.2.3 SOC 和 POC 矿化率 由图 4 可知,POC 矿化率(25%~43%)显著高于 SOC(2%~5%),是 SOC 的 8 倍以上。SOC 矿化率处理间差异显著,其中,对照最高为 5.2%,其次是鸡粪处理为 3.9%,牛粪处理最低为 1.9%,秸秆处理(2.8%)略低于树叶处理(3.0%);POC 矿化率表现为对照>鸡粪处理>秸秆处理>树叶处理>牛粪处理,其中,秸秆处理(30.3%)和树叶处理(29.4%)POC 矿化率的差异不显著。

与对照相比,有机物料的添加显著增加了 SOC 和 POC 含量,同时显著降低了有机碳的矿化率,可见,有机物料形成稳定有机碳组分的速度高于易矿化组分,有利于 SOC 和 POC 的积累,利于土壤固碳,尤其是牛粪。有机物料处理中,鸡粪处理的 SOC 和 POC 矿化率均显著高于其他处理,与其他有机物料相比,鸡粪促进了土壤有机碳易矿化组分的形成,而秸秆和树叶对土壤有机碳的矿化影响相近,说明其转化形成的有机碳组分结构可能相似。



POC 矿化拟合效果优于 SOC。不同处理 SOC 和 POC 的 C_0 差异性显著,且 SOC 矿化潜力显著低于 POC。SOC 的 C_0 顺序为对照>鸡粪处理>树叶处理>秸秆处理>牛粪处理;POC 顺序为鸡粪处理>牛粪处理>对照>秸秆处理>树叶处理,其中,鸡粪处理的 C_0 达到了其他处理的 3 倍以上,这是由于鸡粪处理矿化速率显著高于其他处理,拟合后导致其数值过高,秸秆处理和树叶处理 POC 的 C_0 差异不明显,与矿化率结果一致。有机物料对 C_0 /SOC 和 C_0 /POC 的影响规律基本与 SOC 和 POC 一致,且 C_0 /POC 值显著高于 C_0 /SOC,对照、牛粪处理和鸡粪处理的 C_0 /POC 值超过了 100%,显著高于其他处理,且秸秆处理和树叶处理相近。

由表 4 可知,累积矿化碳、矿化速率和矿化率两两显著正相关,且 $R^2 > 0.95$,三者接近线性正相关。矿化拟合参数中, C_0 、 C_0 /SOC 和 C_0 /POC 均与矿化速率显著正相关,而与其他参数无显著相关性, C_0 主要受矿化速率影响显著。

有机物料的添加在增加了 SOC 的同时,降低了矿化量及潜在矿化有机碳,促进了土壤中不易矿化有机碳的形成,而 POC 在矿化率降低的同时,牛粪和鸡粪处理潜在矿化碳增加了,秸秆和树叶却显著降低了,说明禽畜粪便处理土壤中 POC 主要以易矿化态存在,而植物残体处理的 POC 则以不易矿化态存在。与其他有机物料相比,鸡粪处理的 SOC 和 POC 均表现出了最强的矿化能力,尤其是潜在矿化碳达到了其他有机物料处理的 3 倍以上,说明与其他有机物料相比,鸡粪促进了土壤有机碳的矿化分解,尤其是 POC 组分的矿化。

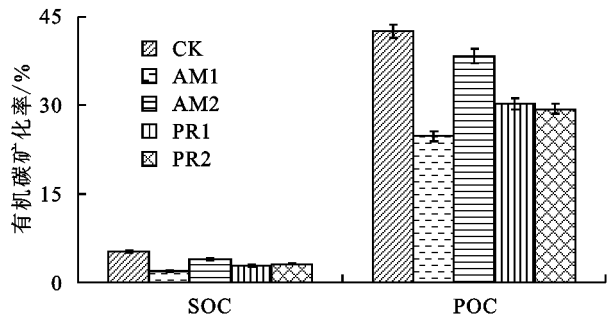


图 4 SOC 及 POC 矿化率

2.3 矿化动力学模拟及相关性分析

利用一级动力学方程对 SOC 和 POC 矿化动态进行拟合,拟合参数(潜在矿化有机碳, C_0 和矿化速率常数, k)见表 3,拟合效果较好(R^2 皆接近 1),且

表 3 土壤有机碳矿化的动力学拟合参数

处理	SOC				POC			
	C_0	k	C_0/SOC	R^2	C_0	k	C_0/POC	R^2
CK	1.099±0.049 a	0.014±0.001 b	9.14	0.999	4.603±0.407 c	0.007±0.001 b	121.78	0.999
AM1	0.403±0.038 d	0.017±0.002 b	2.84	0.994	8.566±2.140 b	0.003±0.001 c	176.08	0.999
AM2	0.949±0.130 a	0.014±0.003 b	6.85	0.993	28.283±10.827 a	0.001±0.000 d	590.12	1
PR1	0.536±0.022 c	0.023±0.001 a	3.65	0.998	3.038±0.034 d	0.013±0.000 a	55.67	1
PR2	0.727±0.091 b	0.017±0.003 b	4.58	0.989	3.033±0.135 d	0.013±0.001 a	54.08	0.999

表 4 有机碳矿化参数相关系数

指标	累积矿化碳	矿化速率	矿化率	C_0	C_0 比例	k
累积矿化碳	1	0.98**	0.97**	0.61	0.63	-0.73*
矿化速率		1	0.96**	0.75*	0.77**	-0.83**
矿化率			1	0.60	0.63	-0.77**
C_0				1	1.00**	-0.78**
C_0 比例					1	-0.79**
k						1

注：* 表示在 $P<0.05$ 水平下差异显著；** 表示在 $P<0.01$ 水平下差异极显著。

3 讨论

3.1 外源有机碳对 POC 累积的影响

土壤有机碳约一半存储于土壤表层(0—20 cm),而其中 70%以上是以不稳定形态存在的^[26],POC 占 SOC 的 30%~60%,是 SOC 中除惰性碳外最主要的组分,周转时间小于 10 年^[27],是长期施肥后土壤有机碳的主要存在形式^[28]。土壤活性有机碳库一定程度上能够反映土壤的碳储情况,土地利用方式、耕作措施等人为活动是影响活性碳库的重要原因^[29-30],POC 则是最敏感的指标^[7-8]。本试验显示,不同处理对 POC 的影响与 SOC 规律一致,说明土壤有机碳活性组分变化能够很好地反映土壤有机碳库的变化^[31]。多年来,土壤学者对有机物料添加对土壤的影响进行了大量的研究,表明有机物料能够提高土壤活性有机碳组分及其总有机碳的数量,但由于各种有机物料组成与结构的不同,导致其在土壤中形成的有机碳及其活性组分存在较大差异^[32],本试验选用的植物残体和禽畜粪便源有机碳添加对土壤 SOC 和 POC 含量及矿化特征的影响差异显著也验证了此观点。

有机物料本身的性质决定了其在土壤中的转化特征及产物特性,有研究显示有机物料 C/N 越高,其腐解速度越慢^[21,33],有机物料腐解后产物的性质对土壤性质的影响起着决定性的作用。本试验为等碳量投入,添加外源有机碳后土壤环境形成的 C/N 顺序与有机物料相同(表 2),即添加植物残体土壤 C/N 高于禽畜粪便处理。由于 C/N 过高,碳素多,氮素养料相对缺乏,导致微生物不能正常繁殖,有利于胡敏酸的结构复杂化,利于腐殖质积累,C/N 过低则造成碳素不足,土壤盐分高,不利于微生物细胞的合成^[34-35],可见,植物残体腐解形成有机碳比禽畜粪便

稳定,导致了本试验中牛粪和鸡粪处理的 SOC 损失量高于秸秆和树叶处理,尤其是鸡粪。

化肥能够促进土壤原有有机碳的矿化分解^[36],降低 SOC 和 POC 的含量^[37]。本研究显示,有机物料处理土壤的 SOC 损失量显著高于对照(化肥处理),对照土壤的 SOC 损失主要来自于原土中 POC 的分解,有机物料处理 SOC 损失主要来自于外源有机质的降解,而外源碳的添加,在一定程度上降低了原土中 POC 的分解速度,尤其是秸秆的添加,与 Chan 等^[38]的结论类似。这是由于单施化肥未供给土壤额外有机物,农田土壤有机质输入主要来源于作物根茬等残留有机物,但每年作物残留物累积的土壤有机碳含量远不能满足其矿化量^[39],导致有机碳含量下降,而有机物料的添加满足了矿化需求,为土壤有机碳积累提供了条件。同时,本研究显示,禽畜粪便添加后,SOC 较植物残体添加更易分解^[40-42],且禽畜粪便外源碳对 POC 的影响较小,而植物残体利于 POC 的累积。

土壤碳库的稳定性主要决定于 POC 比例,POC 比例越高,土壤碳库越不稳定^[11];也有研究表明,POC 对土壤团聚体有物理保护作用,有利于土壤固碳^[43],而 POC 及其比例与 SOC 显著正相关^[8,44]则说明了 POC 的增长能反应土壤的碳汇情况。根据 Benbi 等^[15]的研究发现 POC 比 SOC 更易矿化分解,POC 在数量上能够反应 SOC 的累积,但结构上并不稳定,极易降解,其数量的多少并不能代表其组成的碳库稳定性。因此,要明确 POC 的增加是否能够促进土壤碳库的稳定,还应进一步分析其化学结构性质。本试验结果显示,禽畜粪便处理的 POC 收支处于平衡状态,即其土壤碳累积并非来自于 POC 的累积,而植物残体处理的 POC 则处于累积状态,植物残体 POC 的形成速度高于分解速率,或

POC 结构相对稳定。POC 主要来自于外源有机物料的添加^[45],且以脂肪族组分为主,其积累和稳定性主要来源于脂肪族化合物的贡献^[40],而添加木质素能提高结构相对复杂的胡敏酸或类胡敏酸物质的形成^[41],说明植物残体形成的 POC 结构较禽畜粪便稳定,尤其是树叶。

3.2 外源有机碳对 POC 矿化特征的影响

外源有机质的添加,改善了土壤结构,有利于有机碳进入大团聚体被保护,促进 POC 的形成,而单施化肥不利于土壤团粒结构形成^[46];从对有机碳结构影响上看,化肥使土壤中芳香碳化合物比例降低,有机肥导致大量碳水化合物等可利用碳源被微生物转化为难降解的芳香碳,从而使土壤有机碳芳香碳化合物相对积累^[42]。可见,化肥导致土壤有机碳向不稳定态转化,有机物料的添加显著降低了土壤潜在矿化碳库,有利于土壤有机碳的稳定和累积^[47-48]。本研究也显示,有机物料处理的 C_0 均显著低于对照,牛粪处理最低,即其矿化速率最低。土壤学者针对添加有机物料对黑土影响的长期定位研究也表明有机无机混施对土壤固碳具有重要的意义,动植物源有机碳均利于土壤固碳^[49-50]。本试验结果显示,禽畜粪便的添加增加了 SOC 和 POC 的同时,降低了矿化率,其转化形成的有机碳不易矿化,相对来说,单施化肥促进了土壤固有有机碳的矿化分解^[46],不利于土壤固碳。

POC 的活性高,易矿化^[15],其含量及结构稳定性能够反应土壤有机碳排放 CO_2 的能力及矿化潜力。本研究显示,与处理前相比,腐解完成后牛粪处理损失的 SOC 高于秸秆和树叶,而室内培养试验显示,牛粪处理的 SOC 和 POC 矿化率低于其他物料,牛粪腐解过程中形成的有机碳以易降解有机碳为主,而腐解完成后,其在土壤中形成的有机化合物不易矿化分解,且可能对 POC 有一定的保护作用,而提高了其稳定性,这可能是由于牛粪腐解形成的化合物中小分子化合物高于其他物料^[51],易络合,对 POC 形成了保护;相反,鸡粪形成的有机碳易矿化分解。因此,牛粪添加使土壤有机碳比鸡粪稳定。土壤肥力主要来自于有机物料腐解提供有机质及营养物质,而禽畜粪便腐解能够产生大量的营养成分^[52],牛粪在提高土壤肥力的同时,利于土壤的固碳,而鸡粪能够迅速提高土壤肥力,但不利于土壤固碳。同理,植物残体利于土壤固碳,但不利于短期内对土壤肥力的提高,尤其是树叶。由于秸秆和树叶中难降解木质素含量相近,而木质素含量与有机质分解速度成反比,在植物残体分解后期,起主导和调控降解过程的作用^[53],添加植物源有机碳土壤 POC 主要来源于木质素源脂肪化合物^[40],其 POC 结构应该相近。同时,潜在可矿化有

机碳是评估土壤微生物活性和土壤肥力的指标之一^[54],而 C_0/SOC 能反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳矿化能力越强,有机碳的固存能力越小^[9],根据秸秆和树叶处理 POC 的 C_0/POC 值相近,也可以看出,其 POC 的分解转化能力相近,即结构相似。因此,秸秆和树叶腐解形成的 POC 结构相近,导致了其矿化特征的相似。本试验的矿化拟合结果与试验分析结果一致。本研究中,由潜在可矿化碳与有机碳比值可知,SOC 的稳定性表现为牛粪>秸秆>树叶>鸡粪,POC 的稳定性则为树叶>秸秆>牛粪>鸡粪,即植物残体形成的 POC 较禽畜粪便稳定,而潜在可矿化碳与有机碳比值与矿化速率显著正相关,禽畜粪便处理 POC 分解转化的速度低于植物残体,而牛粪处理中 SOC 分解转化速度却显著低于其他处理,说明牛粪可能促进了土壤有机碳向较稳定的成分转化,即利于土壤固碳。

4 结论

(1)POC 比 SOC 易矿化,其累积矿化量是 SOC 的 3 倍以上,且矿化率是 SOC 的 8 倍以上,通过综合分析 POC 的含量和稳定性能够预测土壤有机碳分解转化的趋势。化肥导致的土壤 SOC 损失主要来源于 POC 的损失,其 POC 的损失量占 SOC 损失量的 55% 以上。外源有机碳能够有效降低土壤有机碳的矿化,尤其是牛粪。有机物料在黑土中 SOC 的累积能力表现为树叶>秸秆>牛粪>鸡粪,植物残体利于 POC 的累积,促使 POC 稳定,尤其是秸秆,而禽畜粪便对 POC 影响较小。

(2)禽畜粪便于土壤肥力的提高,植物残体更利于土壤固碳。因此,平衡耕作与固碳的需求,从循环农业角度考虑,还田有机物料的选择优先顺序为牛粪、秸秆、鸡粪、树叶。

参考文献:

- [1] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2013, 164(4): 80-99.
- [2] Wang Q Y, Wang Y, Wang Q C, et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143(12): 1-6.
- [3] 毛艳玲, 杨玉盛, 崔纪超. 土壤团聚体颗粒有机碳对土地利用变化的响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 188-191.
- [4] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽. 东北黑土有机质组分与结构的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(6): 888-897.
- [5] 郝小雨, 马星竹, 周宝库, 等. 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 316-321.
- [6] 刘晶, 徐少君, 刘丽芬. 不同退耕方式对豫西黄土丘陵区

- 土壤颗粒有机碳含量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(5):72-76.
- [7] Silveira M L, Liu K, Sollenberger L E, et al. Short-term effects of grazing intensity and nitrogen fertilization on soil organic carbon pools under perennial grass pastures in the southeastern USA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58(2):42-49.
- [8] Stewart C E, Follett R F, Wallace J, et al. Impact of biosolids and tillage on soil organic matter fractions: Implications of carbon saturation for conservation management in the Virginia Coastal Plain[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4):1257-1267.
- [9] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9):1705-1714.
- [10] 周晨霓, 任德智, 马和平, 等. 西藏色季拉山两种典型天然林分土壤活性有机碳组分与土壤呼吸特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2):557-563.
- [11] Solomon D, Lehmann J, Zech W. Use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: Carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 78(3):202-213.
- [12] 徐香茹, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):753-760.
- [13] 马天娥, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1):8-16.
- [14] 吴健利, 刘梦云, 赵国庆, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤有机碳矿化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):1006-1015.
- [15] Benbi D K, Boparai A K, Brar K. Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70(2):183-192.
- [16] 刘四义. 玉米秸秆还田对农田黑土 CO₂ 排放及碳氮组分的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.
- [17] 张久明, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 秸秆不同方式还田对土壤理化性质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(9):30-34.
- [18] 钱凤魁, 黄毅, 董婷婷, 等. 不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2):61-65.
- [19] 靳海洋, 蒋向, 杨飞文, 等. 作物秸秆直接还田思考与秸秆多途径利用商榷[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9):142-147.
- [20] Tian L, Dell E, Shi W. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: Correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3):426-435.
- [21] Lu Y, Zheng B, Duan Z Y, et al. Decomposition of different organic materials and variation of active organic carbon and nitrogen contents in tobacco-planted soil[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2015, 16(1):107-111.
- [22] 须湘成, 张继宏, 汪景宽, 等. 不同有机物料的腐解残留率及其对土壤腐殖质组成和光学性质的影响[J]. 土壤通报, 1993, 24(2):53-56.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [24] Benbi D K, Toor A S, Kumar S. Management of organic amendments in rice-wheat cropping system determines the pool where carbon is sequestered[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1/2):145-162.
- [25] Hyvönen R, Ågren G, Dalas P. Analysing temperature response of decomposition of organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(5):770-780.
- [26] Zhao Y G, Liu X F, Wang Z L, et al. Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 133(10):303-308.
- [27] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modeling carbon turnover[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(2):207-222.
- [28] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微生物有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12):2961-2966.
- [29] Sharma V, Hussain S, Sharma K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. *Geoderma*, 2014, 232/234(12):81-87.
- [30] Wang Q Y, Wang Y, Wang Q C, et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143(12):1-6.
- [31] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5):1223-1228.
- [32] Johnson E N, Malhi S S, Hall L M, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on seed yield, N uptake, N use efficiency, and seed quality of *Brassica carinata* [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2013, 93(6):1073-1081.
- [33] Lu Y, Zheng B, Duan Z Y, et al. Decomposing and activity organic carbon and nitrogen content of different organic materials in tobacco soil[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2014, 27(4):1616-1620.
- [34] 唐璐. 不同堆肥条件对堆肥过程中碳素损失及腐殖质形成的影响研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
- [35] 张雪辰. 禽畜粪便堆肥化过程碳氮转化规律[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

- [36] 闫德智,王德建.长期施用化肥和秸秆对水稻土碳氮矿化的影响[J].土壤,2011,43(4):529-533.
- [37] 王雪芬,胡锋,彭新华,等.长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响[J].土壤学报,2012,49(5):954-961.
- [38] Chan K Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61 (5):1376-1382.
- [39] 吕国红,焦晓光,王笑影,等.不同施肥方式对农田有机碳含量的影响[J].安徽农业科学,2010,38(6):3035-3038.
- [40] 周萍,潘根兴.南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅳ.颗粒有机质热裂解—气相—质谱法分子结构初步表征[J].土壤学报,2011,48(1):112-124.
- [41] Smidt E, Meissl K, Schmutzer M, et al. Co-composting of lignin to build up humic substances-strategies in waste management to improve compost quality[J]. Industrial Crops and Products, 2008, 27(2):196-201.
- [42] 郭素春,郁红艳,朱雪竹,等.长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J].土壤学报,2013,50(5):922-930.
- [43] 徐香茹,蔡岸冬,徐明岗,等.长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J].农业环境科学学报,2015,34(4):753-760.
- [44] 王朔林,王改兰,赵旭,等.长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):104-111.
- [45] Li S Y, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155(7):199-206.
- [46] 赵玉皓,张艳杰,李贵春,等.长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J].生态学杂志,2016,35(7):1826-1833.
- [47] 李有兵,把余玲,李硕,等.作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):943-950.
- [48] 张杰,黄金生,刘佳,等.秸秆、木质素及其生物炭对潮土 CO₂ 释放及有机碳含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(2):401-408.
- [49] 李玮,孔令聪,张存岭,等.长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J].土壤学报,2015,52(4):943-949.
- [50] 徐香茹,骆坤,周宝库,等.长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J].应用生态学报,2015,26(7):1961-1968.
- [51] 吴景贵,吕岩,王明辉,等.有机肥腐解过程的红外光谱研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(3):259-266.
- [52] 张雪辰.禽畜粪便堆肥化过程碳氮转化规律及其受调控措施的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [53] 张向茹.宁南山区枯落物分解对土壤微生物群落结构及有机碳形态的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [54] 张仕吉,项文化.土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究进展[J].中南林业科技大学学报,2012,32(5):134-143.
- (上接第 277 页)
- [14] 侯淑艳.土壤添加有机物料后温度和水分对胡敏素形成转化和结构性质的影响[D].长春:吉林农业大学,2007.
- [15] 张林海,王瑞申.闽江河口秋茄湿地土壤腐殖质组成及剖面分布特征[J].云南地理环境研究,2011,23(1):5-10.
- [16] 李爽,张玉龙,范庆锋,等.不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响[J].土壤学报,2012,49(5):909-915.
- [17] Li Y J, Yuan B Z, Bie Z L, et al. Effect of drip irrigation criteria on yield and quality of muskmelon grown in greenhouse conditions[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109(9):30-35.
- [18] 褚慧,宗良纲,汪张懿,等.不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J].土壤学报,2013,50(5):931-939.
- [19] 窦森,肖彦春,张晋京.土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J].土壤学报,2006,43(6):934-940.
- [20] Han L, Zhang Y L, Jin S, et al. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(8):1625-1633.