

李传松,张亦婷,赵兴敏,等. 冻融及有机物料添加对黑钙土有机、无机碳的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):272-277.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.10.060

冻融及有机物料添加对黑钙土有机、无机碳的影响

李传松,张亦婷,赵兴敏,隋 标,王鸿斌

(吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,吉林长春 130118)

摘要:以黑钙土为研究对象,采用室内培养方法,设置空白对照(NCK)、添加秸秆(NJ)、有机无机肥混施(NH)、冻融土培养(DCK)、冻融秸秆培养(DJ)与冻融混施肥培养(DH)6个处理。研究表明,NJ、DJ的CO₂释放速率及累积释放量较高,DCK最低。CO₂累积释放量较好地符合一级反应动力学方程($R^2 > 0.89$),CO₂潜在释放量参数C_i由大到小为NJ > DJ > NH > DH > NCK > DCK。NH、DH的黑钙土碳酸盐含量显著高于其他处理($P < 0.05$),而冻融处理对土壤碳酸盐含量的影响较小。添加秸秆的处理(NJ、DJ)土壤总碳、有机碳含量明显高于其他处理,而添加有机无机混合肥的处理(NH、DH)土壤总碳、有机碳含量与空白对照差别不大。冻融循环可以提升土壤碳含量,但与非冻融处理没有明显差异。综上所述,秸秆对土壤有机碳含量的提升有重要作用,但也增加了CO₂累积释放量;有机无机肥施对土壤固碳能力影响较小,但能显著增加黑钙土中碳酸盐的含量;冻融循环对土壤碳酸盐、有机碳含量的影响不明显,但可以减少添加有机物料后土壤CO₂的潜在释放量。

关键词:冻融作用;秸秆;有机无机肥;黑钙土;CO₂释放;有机碳;碳酸盐

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)10-0272-06

黑钙土是吉林省重要的农业土壤和畜牧业生产基地土壤^[1]。但近年来,由于土地过度使用和风蚀、水蚀等作用,引

起有机质(SOM)的积累条件发生变化并且分解加快,腐殖质层逐渐变薄、含量减少^[2]。为了稳定及逐步增加黑钙土SOM含量,秸秆还田及施用有机肥成为土地培肥的主要方式^[3],但有机物料进入土壤后,在向腐殖质转化的同时,也会矿化生成CO₂,因此,需要研究培肥过程中黑钙土CO₂的释放特征,为构建环境友好型的秸秆还田和有机肥施用方式提供理论依据^[4-7]。土壤有机质泛指以各种形态存在于土壤中的各种含碳有机化合物,其中所含的碳元素被称为土壤有机碳(SOC),其对全球碳平衡有重要作用,被认为是影响全球温室效应的

收稿日期:2018-01-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:41403077)。

作者简介:李传松(1993—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事土壤面源污染调控研究。E-mail:13125803969@163.com。

通信作者:赵兴敏,博士,副教授,主要从事土壤环境中污染物的迁移转化、污染控制与修复技术研究。E-mail:zhaoxingmin0704@163.com。

[16]李 华,李永青,沈成斌,等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(5):1752-1756.

[17]武瑞平,李 华,曹 鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(9):1855-1861.

[18]赵芸晨,秦嘉海,肖占文,等. 糠醛渣、沼渣与化肥配施对制种玉米田理化性质和酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):102-105,111.

[19]孙丽娜,董陆康,徐 刚,等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土壤理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报,2014(3):532-538.

[20]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.

[21]Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. Soil & Tillage Research,2017,166:59-66.

[22]叶协锋,凌爱芬,刘清华,等. 腐殖酸对植烟土壤理化性状影响的研究[J]. 中国农业科技导报,2010,12(6):120-125.

[23]王瑞霞. 腐殖酸与土壤酶活性[J]. 腐植酸,1988(3):27-28.

[24]赵 亮,刘存寿. 不同有机物料对土壤肥力及团聚体稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(2):130-136,144.

[25]董志新,卜玉山,刘秀珍,等. 不同有机物料对土壤养分和酶活性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2014,34(3):220-225.

[26]Zhang M, Li B, Xiong Z Q. Effects of organic fertilizer on net global warming potential under an intensively managed, vegetable field in southeastern China: a three-year field study[J]. Atmospheric Environment,2016,145:92-103.

[27]秦嘉海,李会隆. 长期施用有机固体废物对河西走廊风砂土的培肥效应和环境影响研究[J]. 土壤,2009,41(5):849-852.

[28]常准霞,韩金荣. “莲味宝”有机无机复合肥对玉米增产效果研究[J]. 园艺与种苗,2007,27(4):307-309.

[29]康宗利,刘延吉,杨玉红. 增效剂和腐殖酸肥料对番茄产量和品质的效应[J]. 北方园艺,2006(2):4-6.

[30]周 保,杨翠芹,秦耀国. 不同类型有机肥在矮生菜豆上的应用效果[J]. 中国蔬菜,2007(1):25-26.

[31]刘兰兰,王汝娟,张晓冬,等. 二种含腐殖酸钾肥的制备方法及对甘薯、生姜的增产效果[J]. 中国土壤与肥料,2008(6):78-81.

主要因素^[8-9]。研究表明,我国东北地区黑钙土逐渐出现 SOM 与养分含量降低、质地变轻、保水保肥能力变弱以及呈弱碱性反应等问题^[1], SOM、SOC 含量的减少限制了农业发展。因此,为解决这一问题,保障农业正常生产,提升黑钙土 SOM 含量已成为土壤改良的重点。大量研究证明,秸秆还田、增施有机肥或有机无机肥配施等土壤培肥方式在提高土壤肥力、促进有机质积累等方面具有显著的作用^[10-12]。有机物料进入土壤后,在缓慢腐殖化的同时,也会矿化或激发土壤有机碳矿化,生成 CO₂ 释放到大气中,农业土地利用上的碳排放问题逐渐引起研究者的关注^[13-15]。影响土壤有机碳分解的因素较多^[16],其中外源碳种类对 SOC 的分解有一定影响,与有机肥相比,玉米秸秆碳多氮少,C/N 比较高,施入土壤后由于氮素缺乏,微生物分解作用缓慢,土壤有机碳得以较多的积累^[17];气候因素对 SOC 的影响也不容忽视,全球气候变暖引起中高纬度及高海拔地区多年冻土区退化,出现冻融循环新模式,在冻融过程中,土壤有机质不同程度地暴露出来,加快了 SOC 的矿化^[18]。黑钙土是松嫩平原重要的土壤类型,前人就提升黑钙土有机质含量已做了一些相关工作,而关于改良过程中黑钙土 CO₂ 释放、碳酸盐含量变化及冻融交替作用影响的研究鲜见报道。以松嫩平原典型黑钙土为研究对象,采用室内培养方法研究秸秆和有机肥对土壤有机碳和 CO₂ 释放的影响,并利用碱液吸收、容量滴定法及重铬酸钾氧化外加热法,测定黑钙土培养期间的 CO₂ 释放量、碳酸盐含量及有机碳含量,揭示冻融及有机物料添加下,黑钙土 CO₂ 的释放、碳酸盐含量变化及有机碳积累特征,为探寻有效的增加土壤有机碳含量、减少 CO₂ 释放量的有机物料还田方式,建立环境友好型土壤培肥方式提供数据基础。

1 材料与与方法

1.1 试验材料

供试土壤为黑钙土,于2016年6月采自吉林省松原市前郭县红旗农场(124°47'E,45°23'N)玉米试验田,采用蛇形布点、多点混合的方法进行采样,取土深度为0~20 cm。样品于室内自然风干,去除肉眼可见的秸秆等有机残体,过2 mm 筛,混匀备用。土壤 pH 值为 6.87,有机碳含量为 15.05 g/kg,碱解氮含量为 94.43 mg/kg,速效磷含量为 44.45 mg/kg,速效钾含量为 188.21 mg/kg,全氮含量为 1.59 g/kg,C/N 比为 10.03,碳酸盐含量为 16.00 g/kg。供试玉米秸秆采自吉林农业大学试验田,样品自然风干,去除杂物后粉碎过 1 mm 筛备用;有机无机混合肥为掺混肥(N、P、K 的含量分别为 28%、15%、12%)与有机肥以质量比 3:2 比例混合制得,其养分组成如表 1 所示。

表 1 不同添加物料基本性质

有机物料	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	C/N
玉米秸秆	486.10	5.29	5.88	7.80	91.89
有机无机混合肥	165.40	161.32	118.06	136.96	1.03

1.2 培养试验

试验共设 6 个处理:(1)无肥料添加的空白对照,NCK;(2)添加秸秆,NJ;(3)添加有机无机混合肥,NH;(4)无添加冻融循环,DCK;(5)添加秸秆后冻融循环,DJ;(6)添加有机

无机混合肥后冻融循环,DH。每个处理重复 3 次,共设 11 个取样时间,每个处理共计 33 个样品。冻融循环 2 次,以 -10 °C 速冻 24 h 后 +10 °C 速融 24 h 为 1 次冻融循环。实验室模拟培养条件下有机物料添加量为田间常规施用有机物料量的 10 倍左右,因此将 500 g 土壤与 25 g 有机物料混匀,加蒸馏水调节混合样品含水量至 20% (约为田间最大持水量的 60%)后,转移至塑料瓶内,密封称质量。瓶盖上设置 2 个孔,一端连接换气装置,用于通入去除 CO₂ 的空气;一端连接碱液吸收装置,用于吸收土壤矿化产生的 CO₂ (图 1)。培养试验在 25 °C 恒温培养箱中完成。期间为避免造成厌氧环境,每隔 3 d 通入 1 次去除 CO₂ 的空气,每次 1 min,同时补水至原始质量,使装置保持适宜含水量。在培养 4、6、10、20、30、40、50、60、70、80、110 d (共计 11 个取样时间)时更换碱液吸收瓶测定 CO₂ 释放量并取出培养样品,风干后测定土壤总碳、有机碳、碳酸盐含量。

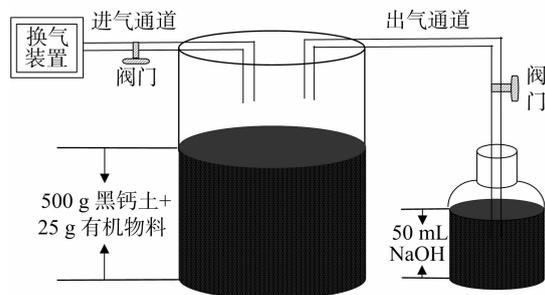


图 1 试验装置示意

1.3 测定项目及方法

土壤基本理化性质:土壤 pH 值、碱解氮含量等基本理化性质采用常规方法^[19]测定。

土壤总碳、有机碳含量:土壤样品取出后风干,研磨后过 60 目筛,采用静电吸附方法去除土壤中的秸秆等有机残体,称取 0.100 0 g 样品,使用 multi C/N HT1300 型有机碳/总氮分析仪(德国耶拿公司)测定土壤总碳含量,同时称取 0.100 0 g 样品,加 10% 盐酸,以除尽土壤中的无机碳,测定 SOC。

土壤碳酸盐含量:采用容量滴定法^[19]测定土壤碳酸盐含量。

土壤 CO₂ 释放量:使用碱液吸收-中和滴定法^[19]测定。将培养瓶的出气孔与装有 50 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液的吸收瓶连通好,同时作无土对照试验。量取 10 mL 吸收瓶中的溶液至于三角瓶中,加入 2 mL 0.15 mol/L BaCl₂ 溶液,再加入 2~3 滴酚酞指示剂,用 0.1 mol/L HCl 滴定至颜色消失即为终点。

土壤 CO₂ 累积释放量:采用一级反应动力学方程模型对 CO₂ 累积释放量进行拟合,具体方程为

$$C_t = C_i (1 - e^{-Kt}) \quad (1)$$

式中: C_i 为土壤 CO₂ 潜在释放量(mg/kg); C_t 为经过 t 时间后土壤 CO₂ 累积释放量(mg/kg); K 为周转速率(d^{-1})。

1.4 数据处理分析

采用 Excel 对试验数据进行整理,SPSS 22.0 软件最小显著性差异法(LSD)进行显著性差异比较,Origin 2017 制作图表。

2 结果与分析

2.1 冻融交替及有机物料添加对黑钙土 CO₂ 释放速率与累积释放量的影响

冻融交替及有机物料添加对黑钙土 CO₂ 释放速率的影响如图 2 所示,可以看出,6 个处理的土壤 CO₂ 释放速率均呈规律性变化,即培养 4 d 或 6 d 时出现释放高峰,之后至 20 d 时释放速率快速下降,进入第 1 个缓慢释放平台,而后至 80 d 时进入第 2 个更加缓慢释放平台。添加秸秆处理 CO₂ 释放速率高于 NCK,冻融空白处理(DCK)、冻融有机无机肥料添加处理(DH)CO₂ 释放速率高峰值出现在培养 4 d 时,冻融秸秆添加处理(DJ)及非冻融各处理(NCK、NH、NJ)CO₂ 释放速率高峰值出现在培养 6 d 时。非冻融处理的 CO₂ 释放速率高峰值均比冻融处理(除添加含碳量较高秸秆的 DJ)晚 2 d。

图 2 中,不同有机物料添加处理 CO₂ 释放速率前期表现出明显的差异,后期差异逐渐缩小。DJ 的 CO₂ 释放速率最高可达 62.47 mg/(kg·d),其次为 NJ,最高释放速率为 41.45 mg/(kg·d)。整体来说,各处理 CO₂ 的最高释放速率(取图 2 峰值)为 DJ > NJ > NCK > DH > NH > DCK,其中, DJ 是 NCK 的 2.86 倍。不添加有机物料时, NCK 的 CO₂ 最高释放速率比 DCK 高 422.32%,说明冻融作用减弱了 CO₂ 的释放。对于添加有机物料的处理而言, DJ CO₂ 最高释放速率比 NJ 高 55.1%, DH CO₂ 最高释放速率比 NH 高 34.3%。

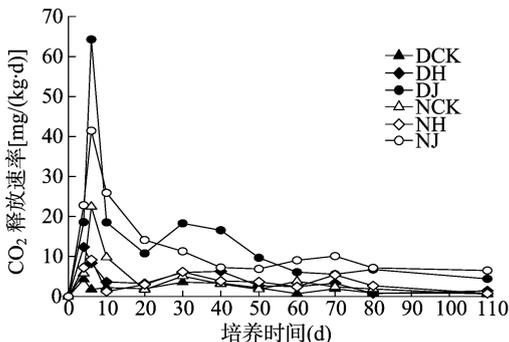


图2 冻融交替及有机物料添加对黑钙土 CO₂ 释放速率的影响

图 3 为土壤 CO₂ 累积释放量的一级反应动力学方程拟合曲线,其拟合参数如表 2 所示,拟合后的决定系数(R^2)均大于 0.89($n=6, P<0.01$),说明一级反应动力学方程可以较好地描述不同处理黑钙土 CO₂ 累积释放量的变化。从表 2 可以看出,CO₂ 潜在释放量因有机物料的不同而存在显著差异($P<0.05$)。添加有机物料后,土壤 CO₂ 潜在释放量(C_i)与 NCK 相比,有不同程度的增加;其中 NJ 的 C_i 最大(1 280.93 mg/kg),DCK 的 C_i 最小(255.65 mg/kg), C_i 由大到小依次为 NJ > DJ > NH > DH > NCK > DCK;方差分析结果显示,当添加的有机物料相同时,冻融与非冻融处理间的 C_i 差异不显著。表 2 中不同种类外源碳对 CO₂ 周转速率的影响不同, NJ、DJ 的 K 值较低,说明添加秸秆可能使黑钙土中 CO₂ 的周转速率减慢,在外源碳的帮助下,有利于土壤有机碳的累积;而 NH 的 K 值高于 NJ,说明本试验条件下,有机无机肥配施可以一定程度加速土壤有机碳矿化,不利于土壤有机碳累积;NCK 的 K 值最大,说明扰动的土壤在无外源有机质添加的条件下,CO₂ 周转速率最快,而 DCK 的 K 值比 NCK

小,说明冻融降低了 CO₂ 周转速率;方差分析结果显示,除 NJ 和 DJ 外, NCK、DCK、NH、DH 处理周转速率均存在显著性差异($P<0.05$)。

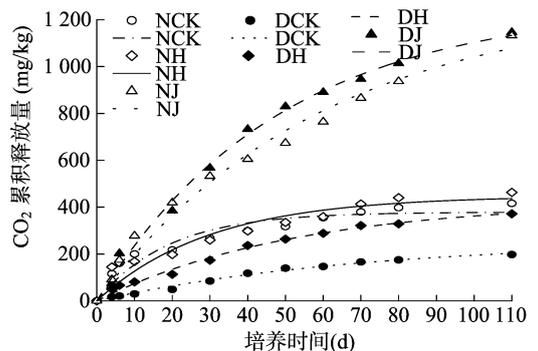


图3 黑钙土 CO₂ 累积释放量随培养时间的拟合曲线

表 2 黑钙土有机碳矿化的一级动力学参数

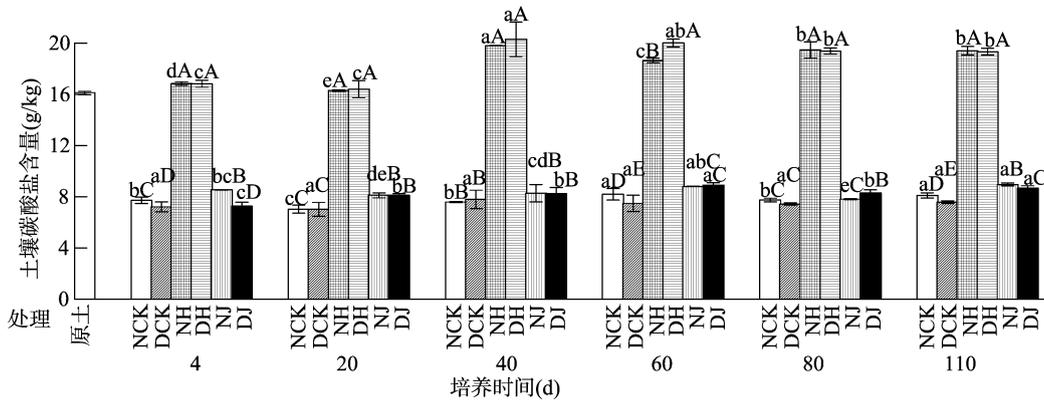
处理	C_i (mg/kg)	K (d ⁻¹)	R^2
NCK	378.93 ± 20.95c	0.053 ± 0.010a	0.913
DCK	255.65 ± 19.05d	0.014 ± 0.002d	0.991
NH	448.03 ± 40.26b	0.033 ± 0.008b	0.892
DH	425.34 ± 23.13b	0.019 ± 0.002c	0.990
NJ	1 280.93 ± 105.15a	0.017 ± 0.002cd	0.983
DJ	1 263.29 ± 49.13a	0.021 ± 0.002c	0.994

注:表中数值为平均值 ± 标准差($n=6$),同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

由图 3 可知,CO₂ 累积释量前期增长迅速,后期增长缓慢,与释放速率的大小具有很好的对应关系。秸秆中的木质素、纤维素等分解为糖、醇、酚类物质被微生物利用,矿化生成 CO₂,同时秸秆对土壤有机碳矿化的正激发效应,增加了 CO₂ 释放量,培养至 110 d 时 NJ 的 CO₂ 累积释放量为 1 132.00 mg/kg,是 NCK(415.99 mg/kg)的 2.72 倍。冻融过后, NJ 与 DJ 的 CO₂ 累计释量在培养 30 d 已经产生差异,说明冻融作用对添加秸秆的土壤 CO₂ 累积释量的影响有一定的滞后。前期主要是秸秆对 CO₂ 的累积释量贡献较大,而在后期,秸秆中绝大部分易分解的物质被微生物利用,由于冻融引起的土壤团聚体破坏等,使土壤有机碳暴露于空气中,从而造成 DJ 的 CO₂ 累积释量要高于 NJ。由图 3 可以看出, NCK 与 DCK 之间的 CO₂ 累积释量差异较大,而 NH 与 DH、NJ 与 DJ 间差异较小,说明有机物料的添加可能缩小了由冻融循环引起的 CO₂ 累积释量差异。除 NJ、DJ 外,培养至 110 d 时其余处理的 CO₂ 均已到达了累积释量平台期,说明秸秆中尚有少部分难分解的有机物质在缓慢分解逐步释放 CO₂,而其他处理则由于外源碳较少,且土壤有机碳矿化速率缓慢,较早地进入了释放平台期。

2.2 冻融交替及有机物料添加对黑钙土碳酸盐含量的影响

从图 4 可以看出,不同处理间黑钙土碳酸盐含量变化趋势不尽相同。NCK 在培养的 4 d 时碳酸盐含量有较大幅度的下降,相较于原土下降了 52.1%,后期碳酸盐含量趋于稳定,说明石灰性土壤耕层的扰动加快了碳酸盐在早期的分解,但随着扰动后的土壤恢复稳定,碳酸盐也进入稳定状态,分解缓慢。添加不同有机物料后,土壤碳酸盐含量差异明显。NH、



柱上不同小写字母表示同一处理在不同时间的差异显著 ($P < 0.05$)；不同大写字母表示同一时间不同处理差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同处理下黑钙土碳酸盐含量随培养时间的变化

DH 碳酸盐含量呈增加态势,较短的培养期内(20 d)缓慢变化,而到培养 40 d 迅速增加,分别增加了 21.5%、23.8% (与培养 20 d 相比),而与其他处理相比,碳酸盐含量高出 139.1% ~ 167.8%。而后随培养时间的延长,黑钙土碳酸盐趋于稳定,说明在密闭的环境中,有机无机肥配施对土壤碳酸盐的固定有积极影响。而 NJ、DJ 与无添加培养呈现相同的趋势,碳酸盐含量迅速降低并逐渐稳定,但是添加秸秆 (NJ、DJ) 的土壤碳酸盐含量略高于未添加有机物料的处理 (NCK、DCK),说明添加秸秆对土壤碳酸盐的稳定或固定可能存在有较小影响。此外,冻融循环处理与未冻融处理的黑钙土碳酸盐含量在培养时间内呈现相似的变化趋势,且在培养结束时,碳酸盐含量较为接近,NCK 土碳酸盐含量比 DCK 高 7%,NH 比 DH 高 0.4%,NJ 比 DJ 高 3.5%,说明冻融循环对土壤碳酸盐含量的变化有影响,但影响力度较小,这一研究结果是否与试验设置的较少冻融次数有关,有待于进一步研究证明。

2.3 冻融交替及有机物料添加对黑钙土总碳、有机碳含量的影响

培养 110 d 后,不同处理黑钙土总碳、SOC 含量如图 5 所示,可以看出,不同处理间土壤总碳、SOC 含量变化趋势各异。在密闭培养环境及 20.0% 的适宜含水量条件下,无添加培养与有机无机肥配施处理的土壤总碳含量与原土相比均有不同程度的降低,损失量范围为 0.17 ~ 1.06 g/kg,降低了 1.1% ~ 6.6%;但添加秸秆处理的土壤总碳含量与原土相比有所升高,增加了 4.85 ~ 5.20 g/kg。与 NCK、DCK 相比,有机物料添加均增加了土壤总碳含量,NH、NJ 处理土壤总碳量分别比 NCK 处理增加 0.84、5.91 g/kg,DH、DJ 处理土壤总碳量分别比 DCK 处理增加 0.68、6.05 g/kg,其中以添加秸秆处理增幅最大,NJ、DJ 分别比 NCK 增加为 39.7% 和 42.0%。说明添加秸秆或秸秆还田对于培肥地力、提升土壤有机质有明显的促进作用,是改善土壤环境的有效方式,而有机无机肥配施对于 SOC 含量的提升没有明显影响,这与众多研究中有机无机肥配施对土壤有机质含量提升有促进作用的研究结果^[21-22]有一定差别,可能是由于本试验施入氮素过多,而外源碳的输入较少,土壤 C/N 比较低,导致 SOC 含量减少。此外,与培养初期的样品相比,NCK 的有机碳含量随培养时间延长而降低还反映出,耕层土壤扰动后不利于土壤的固碳性能,并且还会加快 SOC 的矿化。冻融处理的土壤碳含量略高

于未冻融处理,其差值(冻融处理的土壤碳含量与相应处理的未冻融土壤碳含量的差值)对 SOC 含量的影响程度总体为有机无机肥配施(450 mg/kg) > 添加秸秆(300 mg/kg) > 无添加(110 mg/kg)。不同的外源碳对土壤碳含量增加的贡献率(添加有机物料后土壤碳的增加量与所添加有机物料碳量的比值)差异明显,NH、DH、NJ、DJ 处理中有机物料含碳量对土壤 SOC 含量提升的贡献率分别为 11.9%、20.1%、47.8%、49.4%,与有机无机肥料相比,秸秆碳对促进土壤碳含量的提高有更大的潜力。

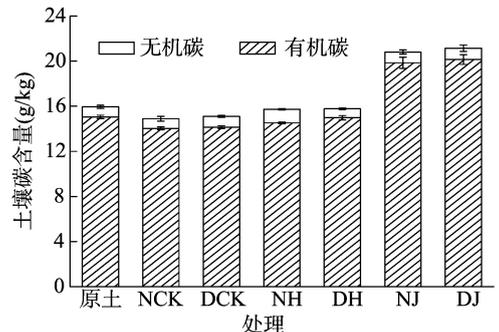


图5 培养 110 d 及培养前不同处理黑钙土总碳、有机碳含量

由表 3 可以看出,培养前土壤总碳量与培养后及矿化的土壤总碳量基本处于 C 素平衡状态,损失的碳素主要由残留在培养瓶内及逸散的 CO₂ 与测定误差所致。

3 讨论

3.1 CO₂ 释放速率与累积释放量

培养试验表明,有机物料加入均能不同程度地影响土壤 CO₂ 释放速率及累积释放量,而冻融循环对土壤 CO₂ 释放速率及累积释放量的影响较小。

有机物料添加到土壤后在微生物的作用下,有机碳矿化生成 CO₂ 释放出来,其释放量的多少可以有效指示有机物料的土壤环境效应^[23]。土壤中 CO₂ 释放速率呈现明显的阶段性变化趋势,前期快速上升达到释放峰值,随着时间的延长逐渐降低后再次小幅上升出现次高峰,主要是因为有机物料进入土壤后易分解物质先被微生物利用,快速分解造成 CO₂ 释放高峰出现^[24],尤以添加秸秆的处理最为明显,丰富的营养物质激发了土壤微生物的活性,并大量增殖,使其 CO₂ 释放速

表3 不同处理下黑钙土碳素的增减收益

处理	碳添加量 (g)	培养前土壤碳量 (g)	CO ₂ - C 量 (g)	培养结束时土壤碳量 (g)	碳素损失 (g)
NCK	0	7.525	0.057	7.445	0.023
DCK	0	7.525	0.027	7.484	0.014
NH	4.135	11.660	0.063	11.466	0.131
DH	4.135	11.660	0.051	11.502	0.107
NJ	12.152	19.677	0.154	19.396	0.127
DJ	12.152	19.677	0.156	19.420	0.101

率及累积释放量远高于其他处理,伴随易分解物质的减少,微生物对土壤中碳或氮源物质的竞争加剧,数量减少,而且秸秆进入到缓慢腐解阶段,之前不易腐解的木质素、单宁与蜡质等物质逐步分解,使得土壤 CO₂ 释放缓慢^[25];非冻融条件下添加有机无机混合肥的土壤 CO₂ 释放速率及累积释放量较低,是因为与秸秆相比,虽然试验用有机无机混合肥 C/N 比较低,适宜微生物分解有机物,但由于添加的有机肥量较少,碳源不足,因此可供微生物利用或分解的有机物数量有限,造成土壤 CO₂ 累积释放量较小。同时,长期施用化肥还会导致土壤中无机氮含量增加,而无机氮又可与木质素残体或酚类化合物反应,使土壤有机质分解性降低^[20]。

3.2 碳酸盐含量

土壤中的碳酸盐以无机碳(SIC)固相为主要存在形式^[26],主要分为岩生性(原生)碳酸盐与发生性(次生)碳酸盐^[27]。黑钙土中碳酸盐以 CaCO₃ 为主。本试验培养过程中并没有植物的参与,所以土壤中的钙素并没有损失。但无添加培养与添加秸秆处理碳酸盐含量降低幅度较大,主要是由于土壤经过扰动后,碳酸盐平衡迅速被打破,土壤中的碳酸盐向不稳定状态发展,分解较快,而且金属阳离子(Ca²⁺, Mg²⁺等)的输入量较少,在碳酸盐分解后,难以有金属阳离子与 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 形成新的碳酸盐^[28]。而试验中有机无机肥配施处理的碳酸盐含量增加,是因为添加肥料给土壤带入了部分金属阳离子;由于整个培养过程一直是密闭环境,土壤含水量与田间相比也一直处于较适宜状态,因此,更有利于土壤中的水与有机碳矿化生成的 CO₂ 反应,生成碳酸根或重碳酸根,然后在 CO₂ 分压的作用下,与金属阳离子结合生成碳酸盐或重碳酸盐,沉积于土壤中^[29-30]。在培养后期黑钙土碳酸盐总量一直处于稳定状态,变化幅度较小,可能与密闭环境中 CO₂ 过量或化学反应已达平衡有关,但引起这种平衡的机制尚不明确,需要继续研究验证。

3.3 总碳、有机碳含量

土壤碳库由 SOC 库与 SIC 库组成^[31],其中 SOC 是表征土壤肥力的一项重要指标,且 SOC 的矿化会释放 CO₂^[3],因此,土壤培肥还需探求利于环保的有机物料添加方式,减少 CO₂ 释放量,同时还能将更多的碳固持在土壤中。本试验中,培养前,黑钙土需要粉碎过筛,这与田间翻耕等扰动性耕作措施一样,改变了土壤结构,增加了 SOC 暴露于空气中的机会,加速了 SOC 的矿化^[32-33]。虽然施肥一直是提高与维持土壤肥力的有效措施,但本试验中,与原始土样相比, NH、DH 土壤总碳、SOC 含量却降低,主要是由于有机无机肥配施后,造成氮素投入量过多,引起土壤 C/N 比降低,加速了 SOC 分解,在

没有较多外源碳输入的前提下,土壤中原有的有机碳逐渐减少^[34-35]。与原始土样相比, NJ、DJ 的 SOC 含量有不同程度增加,说明秸秆还田是农田土壤培肥的有效措施,可通过直接添加有机物料的形式^[36],向土壤中添加大量有机质、全氮、全磷等,增加土壤肥力^[37],改善土壤结构,提升土壤有机碳水平^[38]; DJ 的 SOC 含量略高于 NJ, 主要是因为冻融循环使秸秆部分老化,局部破碎释放出较多的碳,被土壤固定^[39]。

与 SOC 相比,本试验中 SIC 含量的变化相对较小,是由于在自然条件下, SIC 转化较为缓慢,短期内不易发生变化;因此,较多研究者一直认为 SIC 在碳循环中占较轻的地位^[40]。但随着农田土壤的不断扰动,使 SIC 的周转时间大大缩短, SIC 的变化逐渐成为研究重点。本研究中,添加有机物料后 SIC 大多略高于无添加处理,是由于在碱性及富含钙的地球化学环境中存在着 SOC → CO₂ → HCO₃⁻ → CaCO₃ → SIC 系列反应, SOC 在一定条件下可以转化为无机碳^[30,41],因而无机碳略有增加。冻融与未冻融相比, SIC 却基本无变化^[42],是因为短期内,冻融频次与冻融强度对土壤无机碳的影响不显著^[43]。

4 结论

扰动过的黑钙土 CO₂ 周转速率最大,而冻融循环会大大减小周转速率,同时秸秆及有机无机混合肥添加也可以降低 CO₂ 周转速率,但秸秆也会增加黑钙土 CO₂ 释放速率及累积释放量。外源碳较少的有机无机肥配施对黑钙土 CO₂ 释放量的贡献也较小。有机物料添加可以缩小因冻融所造成的 CO₂ 累积释放量间的差异,碳添加量越高,差异越小。

密闭的环境及适宜的含水量,有利于肥料中金属阳离子与 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 结合转化为碳酸盐。冻融的频次及强度对碳酸盐的影响较小。

添加秸秆是提升黑钙土有机碳含量的有效措施,外源碳量较少及 C/N 比较低的有机无机肥配施不利于黑钙土有机碳的积累。冻融会使秸秆局部破碎化,释放更多的碳,增加 SOC 含量。

参考文献:

- [1] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998:137-144.
- [2] 张琦珠,孙秀秀,王志华. 黑钙土垦后肥力演变的探讨[J]. 干旱区研究,1985(3):25-30.
- [3] Zhao X M, He L, Zhang Z D, et al. Simulation of accumulation and mineralization (CO₂ release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting[J]. Soil & Tillage

- Research, 2016, 156: 148 - 154.
- [4] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 42 - 49.
- [5] Badía D, Martí C, Aguirre A J. Straw management effects on CO₂ efflux and C storage in different Mediterranean agricultural soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(1): 233 - 239.
- [6] 田舒怡, 满秀玲. 大兴安岭北部主要森林类型土壤活性碳特征研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 165 - 171.
- [7] 高菲, 林维, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳矿化的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 9 - 16.
- [8] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 32 - 46.
- [9] 李志洪, 赵兰坡, 窦森. 土壤学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 47 - 49.
- [10] Sommer R, Ryan J, Masri S, et al. Effect of shallow tillage, moldboard plowing, straw management and compost addition on soil organic matter and nitrogen in a dryland barley/wheat - vetch rotation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 39 - 44.
- [11] Liu S L, Huang D Y, Chen A L, et al. Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropic [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 184(1): 51 - 58.
- [12] 吴其聪, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1034 - 1039.
- [13] Li L J, You M Y, Shi H A, et al. Soil CO₂ emissions from a cultivated Mollisol: effects of organic amendments, soil temperature, and moisture, soil temperature, and moisture [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 83 - 90.
- [14] Mancinelli R, Marinari S, Felice V. Soil property, CO₂ emission and aridity index as agroecological indicators to assess the mineralization of cover crop green manure in a Mediterranean environment [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 31 - 40.
- [15] Waseen H, Julie D, Farhat Abbas. Effect of type and quality of two contrasting plant residues on CO₂ emission potential of Ultisol soil: Implications for indirect influence of temperature and moisture [J]. *Catena*, 2014, 114: 90 - 96.
- [16] 王宏燕, 许毛毛, 孟雨田, 等. 玉米秸秆与秸秆生物炭对2种黑土有机碳含量及碳库指数的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(12): 228 - 232.
- [17] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565 - 3574.
- [18] 高敏, 李艳霞, 张雪莲, 等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2269 - 2274.
- [19] 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, 2000: 12 - 194.
- [20] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1278 - 1285.
- [21] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337 - 345.
- [22] 李继福, 薛欣欣, 李小坤, 等. 水稻 - 油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 317 - 325.
- [23] Maestrini R, Herrmann A M, Paolo N, et al. Ryegrass - derived pyrogenic organic matter changes organic carbon and nitrogen mineralization in a temperate forest Soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 291 - 301.
- [24] 林心雄, 程励励, 施书莲, 等. 绿肥和藁秆等在苏南地区土壤中的分解特征[J]. *土壤学报*, 1980, 17(4): 319 - 327.
- [25] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 135 - 138.
- [26] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 986 - 990.
- [27] 刘哲, 陈懂懂, 李奇, 等. 土地利用方式对高寒草甸生态系统土壤无机碳的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 73 - 79.
- [28] 王莲莲, 张树兰, 杨学云. 长期不同施肥和土地利用方式对壤土耕层碳储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 404 - 412.
- [29] 杨文静. 长期不同土壤管理措施壤土无机碳储量及其与有机碳的转化关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [30] 杨文静, 张树兰, 杨学云. 不同管理措施壤土无机碳储量及其与有机碳含量的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(9): 74 - 82.
- [31] 刘淑丽, 林丽, 杜岩功, 等. 青海省高寒草甸不同退化阶段土壤无机碳分异特征[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1290 - 1296.
- [32] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(10): 1138 - 1148.
- [33] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1733 - 1739.
- [34] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549 - 552.
- [35] 曾骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(2): 11 - 14.
- [36] Zhu L Q, Li J, Tao B R, et al. Effect of different fertilization modes on soil organic carbon sequestration in paddy fields in South China: a meta - analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 144 - 153.
- [37] 李春喜, 张令令, 马守臣, 等. 有机物料还田对麦田土壤碳氮含量、小麦产量及经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2017(2): 145 - 150.
- [38] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1527 - 1532.
- [39] 陈昱, 梁媛, 郑章琪, 等. 老化作用对水稻秸秆生物炭吸附 Cd(II) 能力的影响[J]. *环境化学*, 2016, 35(11): 2337 - 2343.
- [40] 王海荣, 杨忠芳. 土壤无机碳研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(35): 21735 - 21739.
- [41] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义[J]. *南京农业大学学报*, 1998, 22(1): 51 - 57.
- [42] 赵光影, 郭冬楠, 江珊, 等. 冻融作用对小兴安岭典型湿地土壤活性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5411 - 5417.
- [43] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 等. 冻融作用下黑土有机碳数量变化的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 984 - 990.