

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.020

杨苏, 刘耀斌, 王静, 等. 不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳积累特征的研究. 土壤, 2021, 53(2): 361–367.

不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳积累特征的研究^①

杨 苏^{1,2}, 刘耀斌², 王 静², 汪吉东¹, 张永春^{1*}, 李辉信², 艾玉春¹

(1 农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210095; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要: 潮土有机质含量低、结构差是限制黄河故道区作物优质高产的主要原因。通过连续施用不同种类及用量有机物料, 探究有机物料投入下, 黄河故道区土壤有机质的积累特征, 为该区土壤快速固碳提供理论依据和参考方案。试验采用随机区组设计, 设置 7 个处理: 单施氮磷钾肥作为对照(CK), 其他处理在单施氮磷钾肥的基础上增施有机肥 6 000 kg/hm² (M1)、有机肥 12 000 kg/hm² (M2)、树枝菌渣 6 000 kg/hm² (B1)、树枝菌渣 12 000 kg/hm² (B2)、秸秆菌渣 6 000 kg/hm² (S1)、秸秆菌渣 12 000 kg/hm² (S2)。与 CK 相比, 外源有机物料施用会显著增加玉米产量和有机质含量, 增幅范围分别为 21.75%~58.32% 和 37.4%~70.1%, 玉米产量的增加直接导致进入土壤的秸秆残渣及根茬碳相应增加 38.9~76.9 kg/hm², 致使 B2 处理增产保肥效果最佳。就有机物料种类而言, 用量为 12 000 kg/hm² 的树枝菌渣对土壤活性有机质的提升幅度最大, 比相同用量的有机肥和秸秆菌渣高 26.2% 和 57.0%, 秸秆菌渣的碳库管理指数最高, 但与树枝菌渣相比无显著差异。树枝菌渣由于碳氮比高, 在土壤中分解慢, 相同用量下, 矿化消耗的碳量低于秸秆菌渣和有机肥, 单位碳投入下的呼吸量比秸秆菌渣和有机肥低 42.3%和 29.3%。用量为 12 000 kg/hm² 的树枝菌渣由于碳投入量大、矿化消耗少, 对黄河故道潮土有机质提升效果最好, 玉米增产最明显。

关键词: 土壤呼吸总量; 有机物料; 有机质积累; 碳库管理指数

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Soil Organic Carbon Accumulation in Old Riverway of Yellow River Under Different Organic Material Inputs

YANG Su^{1,2}, LIU Yaobin², WANG Jing², WANG Jidong¹, ZHANG Yongchun^{1*}, LI Huixin², AI Yuchun¹

(1 Agricultural Science and Technology Research Institute of Agricultural and Rural Sciences, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210095, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The low organic matter content and poor structure of tidal soil are the main factors limiting the high quality and high yield of crops in the old riverway of the Yellow River. In this study, through the continuous application of different kinds and amounts of organic materials in field plot experiment with randomized block design, the accumulation of soil organic matter was studied to provide theoretical basis and reference for rapid carbon sequestration in the study area. Seven treatments were designed, including: 1) CK, NPK fertilizers used; 2) M1, CK + 6 000 kg/hm² organic fertilizer; 3) M2, CK + 12 000 kg/hm² organic fertilizer; 4) B1, CK + 6 000 kg/hm² dendritic residue; 5) B2, CK + 12 000 kg/hm² dendritic residue; 6) S1, CK + 6 000 kg/hm² straw slag; 7) S2, CK + 12 000 kg/hm² straw slag, three repeat for each treatment. The results showed that, compared with CK, organic material input significantly increased corn yield and soil organic matter content by 21.75%–58.32% and 37.4%–70.1%, respectively. The yield increase directly led carbon increase from straw residues and roots into soil by 38.9–76.9 kg/hm², among of which, B2 treatment had the best effect. For organic material types, B2 treatment increased soil active organic matter most, which was 26.2% and 57.0% higher than that of M2 and S2 treatments, respectively. Meanwhile, S treatments had the highest C pool management index, but not significantly different to B treatments. Due to the high C/N ratio, dendritic slag is slowly

①基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)-1001)、国家重点研发计划项目(2018YFD0800301)和江苏省重点研发计划项目(BE2019378)资助。

* 通讯作者(yczhang66@sina.com)

作者简介: 杨苏(1994—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力提升与废弃物资源化利用。E-mail: 2017103075@njau.edu.cn

decomposed in soil, the amount of carbon consumed by the mineralization is lower than those of straw residue and organic fertilizer, and the respiration rate per unit carbon input was 42.3% and 29.3% lower than those of straw residue and organic fertilizer. In conclusion, 12 000 kg/hm² dendritic slag has the largest carbon input, less mineralization consumption and best effects in promoting organic matter content of the tidal soil in the old riverway of the Yellow River and in increasing corn yield.

Key words: Total soil respiration; Organic material; Organic matter accumulation; Carbon pool management index

研究表明,土壤有机碳库的储量变化受碳投入与矿化间的平衡关系调控^[1-2]。明确土壤有机碳的累积特征对于发挥土壤固碳潜力、培育土壤肥力具有重要意义^[3]。施用外源有机物料不仅能够直接增加土壤有机质含量、改变碳的有效性、恢复重建退化土壤,还会对土壤有机碳库的转化过程产生重要影响,进而影响到土壤碳的固定和 CO₂ 的排放^[4-5]。但有机质总量在短时间内,不能灵敏而全面地反映土壤有机质的内在组分变化,近年来土壤活性有机质与土壤碳库管理指数代替总有机质成为评价土壤质量和土壤管理的重要指标^[6-7]。据统计,土壤呼吸释放的 CO₂ 量占生态系统呼吸总量的 60%~90%^[8],是土壤碳矿化分解的主要途径。近年来对土壤呼吸的研究越来越多,Spaccini 等^[9]对 3 种农田土壤固碳潜力的研究表明,外源有机物料的添加能够直接增加土壤有机质含量,增强土壤的固碳潜力^[10]。侯建伟等^[11]认为不同有机物料还田均能增加土壤有效养分和微生物生物量碳、氮含量,这是由于有机物料的投入,抵消了土壤呼吸损失的碳,总体来说“入大于出”表现为农田土壤的“碳汇”^[12-13]。由于有机物料对土壤碳提升具有重要作用,因此提高有机物料的腐殖化系数、增强土壤的固碳潜力、减少有机物的矿化分解对于改良贫瘠土壤具有重要作用,但多数研究集中在中纬度的温带草地和森林^[9, 14],对连年施用菌渣及有机肥对潮土固碳特征的研究匮乏。

黄河故道区江苏段食用菌产量大,菌菇生产过程中会产生大量的菌菇渣,该菌菇渣经济易得,含有丰富的有机物质^[15],是生产商品有机肥的重要原料。但是在生产上易遭随意丢弃,造成资源浪费和环境污染,若加以利用一方面可以补充土壤养分,促进废弃物的资源化利用;另一方面,菌菇渣进入土壤后在微生物及酶的作用下被分解^[16],使有机物颗粒变小,

碳氮比下降,释放养分^[17-19],是培肥改土经济可行的方法。在“减肥增效”的大背景和现实需求下,有机肥被大量使用,但存在价格高、推广难等问题。而对于分布面积广^[20]、土壤结构差、肥力低下^[21]、土壤生态平衡容易遭到破坏^[22]的潮土,提升等量的有机质含量,对应需要投入的有机肥量更大,利用菌菇渣直接还田,如能获得与有机肥相当的效果,则为黄河故道区潮土质量提升提供新的思路和方法。目前提高潮土有机碳含量的研究,未能给出详细的最佳方案。本试验基于此目的,通过连续两年施用秸秆菌渣、树枝菌渣及有机肥,探究土壤不同组分有机碳变化及碳的积累与矿化量,为准确估算外源有机物料添加下,农田生态系统固碳潜力提供依据,为有机物料的资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验区位于江苏省盐城市滨海县界牌镇三坝村黄河湾绿色科技有限公司试验基地内(33°43'N, 119°37'E),试验区地处北温带,气候温和,降雨充沛,常年平均气温 14.1 °C,最高温 39 °C,最低温 -10 °C。降雨量 536~1 372 mm,年平均降雨量为 942.6 mm。试验区地势平坦,土壤类型为脱盐潮土。样地土壤有机质含量 4.41 g/kg,全氮 0.18 g/kg,有效磷 2.63 mg/kg,速效钾 63.3 mg/kg, pH 8.58。小麦秸秆全氮含量 6.95 g/kg,全磷 0.96 g/kg,速效钾 121 mg/kg,有机碳 270 g/kg,碳氮比 66.86。添加的有机物料为有机肥(M),由阿古利斯有限公司提供,主要原材料为中药渣;秸秆菌渣(S)系草菇生产后的秸秆类菌渣,简称秸秆菌渣;树枝菌渣(B)系香菇生产后树枝类菌渣,简称树枝菌渣;于 2017 年玉米季开始施用,其养分含量如表 1。

表 1 有机物料的基本性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested organic materials

物料	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	有机质(g/kg)	高活性有机质(g/kg)	中活性有机质(g/kg)	活性有机质(g/kg)	C/N
有机肥	13.5	10.4	7.30	386	1.78	8.74	67.97	16.6
秸秆菌渣	15.6	7.95	7.95	296	1.81	8.71	69.39	11.0
树枝菌渣	10.8	5.17	5.61	565	1.85	8.76	70.08	30.4

1.2 试验设计

试验设置 7 个处理, 分别为单施氮磷钾肥作为对照(CK), 其他处理在单施氮磷钾肥的基础上增施有机肥 6 000 kg/hm² (M1)、有机肥 12 000 kg/hm² (M2)、树枝菌渣 6 000 kg/hm² (B1)、树枝菌渣 12 000 kg/hm² (B2)、秸秆菌渣 6 000 kg/hm² (S1)、秸秆菌渣 12 000 kg/hm² (S2), 每个处理 3 个重复, 采用完全随机排列, 每个小区面积为 96 m² (长 12 m, 宽 8 m)。试验区种植制度为玉米-小麦轮作, 有机物料添加始于 2017 年玉米季, 玉米品种均为蠡玉 31 号, 小麦品种为华麦 7 号。第一季种植玉米于 2017 年 7 月 5 日播种, 10 月 20 日收获; 第二季种植小麦于 2017 年 10 月 26 日播种, 2018 年 6 月 26 日收获; 第三季种植玉米于 2018 年 7 月 2 日播种, 10 月 23 日收获; 玉米株间距为 25 cm, 行间距为 70 cm, 小麦行间距为 15 cm。在小麦收获后玉米种植前进行麦秆覆盖还田。玉米季施复合肥(18:12:10) 600 kg/hm², 有机肥和菌渣做基肥在播种前一次性施入, 在拔节期和大喇叭口期追施尿素, 尿素用量占化肥总氮的 30%, 化肥及有机物料的施用均采用人工撒施的方式进行。在每个小区相同的株间位置固定一个长期测气的 PVC 圆柱形底座(高 20 cm, 直径 20 cm), 为了减少对土壤的扰动, 初次测定在 PVC 底座插入土壤 24 h 后进行。为防止有机物料添加不均对试验结果造成的影响, 先计算出 PVC 管内土壤的体积, 再按比例添加有机物料。试验开始监测前将 PVC 底座固定在每个小区相同的位置, 且 PVC 底座露出地面的高度均为 7 cm, 确保密闭区域体积相同, 以便估算呼吸通量。在测定前一天, 检查 PVC 底座是否完好, 并用剪刀贴地剪除底座内的可见植物, 减少植物呼吸和土壤扰动的影响。于 2018 年玉米生长的苗期(7 月 7 日)、拔节期(8 月 4 日)、抽雄-授粉期(8 月 28 日)、乳熟期(9 月 22 日)和成熟期(10 月 12 日), 从 8:00—10:00 测定 CO₂ 通量, 同时监测 0~10 cm 土壤温度和湿度, 在玉米收获时测产, 并在每个小区 S 形采取 0~10 cm 土壤样品 5 个, 组成混合样品, 带回实验室进行风干、研磨、过筛, 测定土壤不同组分有机质含量。

1.3 试验方法

土壤呼吸监测采用开路式土壤碳通量自动监测系统, 仪器型号为 Li-8100 (Li-COR, Lincoln, NE, USA), 取玉米不同生育期(8:00—10:00)土壤呼吸速率为当天呼吸的平均值, 然后乘以生长期天数, 求出不同生育期呼吸总量, 对不同生育期呼吸总量求和得到玉米整个生长期土壤呼吸总量(没有测定日期的土壤

呼吸采用内插法估算)。

土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定。采用 3 种浓度 33、167、333 mmol/L 的 KMnO₄ 氧化法分别测定高活性、中活性和活性有机质含量。

土壤碳库管理指数以不施肥为参考土壤, 其计算方法^[20]:

碳库指数(CPI)=样品全碳含量(g/kg)/参考土壤全碳含量(g/kg);

碳库活度(A)=活性碳含量/非活性碳含量;

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度;

碳库管理指数(CPMI, %)=碳库指数×碳库活度指数×100。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 软件中 Pearson 双尾检验进行玉米产量与土壤不同组分有机质含量及碳库管理指数的相关性分析; 平均值多重比较采用 Duncan's New Multiple Range Test 进行显著性检验($P < 0.05$); 采用单因素方差分析对不同处理全生育期内土壤呼吸速率平均值进行差异显著性检验。采用 Microsoft Excel 2007 和 Origin 8.0 软件进行数据处理和绘图。

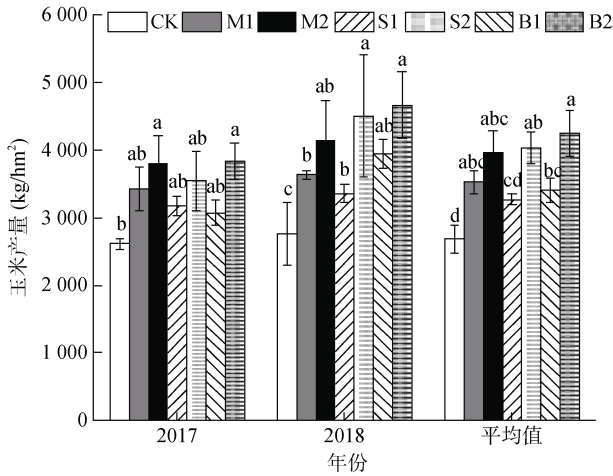
2 结果与分析

2.1 有机物料投入对玉米产量的影响

外源有机物料施入土壤后, 均会显著增加玉米产量, 且随有机物料施用量的增加玉米产量呈增加的趋势, 其中 2018 年玉米总产量高于 2017 年, 增产效果也优于 2017 年, 两年平均增产幅度在 21.75%~58.32% (图 1)。就有机物料种类而言, 对玉米的增产效果表现为: 树枝菌渣>秸秆菌渣≥有机肥, 即 12 000 kg/hm² 的树枝菌渣增产效果最优, 2018 年增产 69.05%, 2017 年增产 46.73%, 两年平均增产 58.32%。

2.2 有机物料施用对土壤不同组分有机质含量的影响

有机物料施用后土壤不同活性有机质含量介于 0.46~2.70 g/kg, 占总有机质的 7.4%~35% (表 2), 有机物料施用下, 活性有机质占总有机质比例最高, 其次为中活性有机质和高活性有机质。有机肥的活性有机质含量最低, 为 1.72 g/kg, 其次为秸秆菌渣 2.14 g/kg, 树枝菌渣最高为 2.70 g/kg, 表明菌渣对土壤总有机质以及不同组分有机质的提升效果优于有机肥。B2 处理的总有机质、中活性有机质和活性有机质含量高于 S2 和 M2, 分别比 S2、M2 高 0.62、1.08, 0.05、0.10, 0.56、0.98 g/kg。碳库管



(图中小写字母不同表示同一年份不同处理间玉米产量差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 2017—2018 年玉米总产量
Fig. 1 Total corn yields in 2017—2018

理指数(CPMI)与不同组分有机质含量趋势相同,由小到大为: $M1 < M2 < CK < S1 < B1 < B2 < S2$, S2 和 B2 处理 CPMI 显著高于 CK, 但二者之间无显著差异。对于有机肥、秸秆菌渣和树枝菌渣 3 种有机物料而言, 高用量比低用量 CPMI 分别增加了 15.36%、46.96% 和 13.94%。

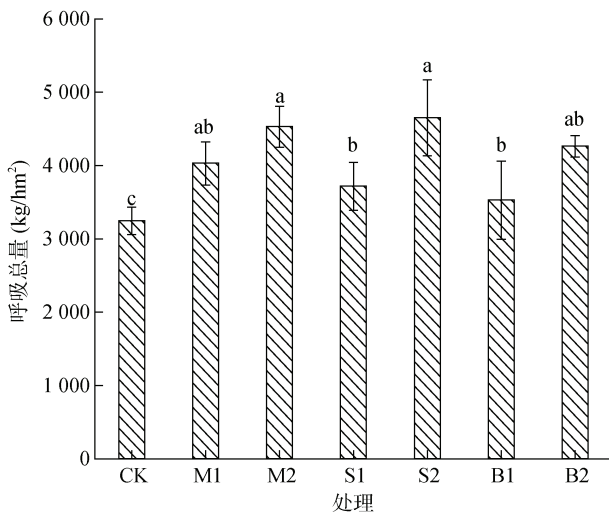
2.3 土壤呼吸总量与单位碳投入下呼吸量

有机物料施用下土壤呼吸总量为 $C\ 3\ 245 \sim 4\ 650\ kg/hm^2$ (图 2), 处理间表现为: 秸秆菌渣 \geq 有机肥 $>$ 树枝菌渣 $>$ 对照, 在所有处理中 S2 呼吸总量最大, 其值为 $4\ 650\ kg/hm^2$, 显著高于 CK, 但与 M2 无显著差异。各处理碳投入量为树枝菌渣 $>$ 有机肥 $>$ 秸秆菌渣, 树枝菌渣碳投入量多, 呼吸消耗量少, 导致单位碳投入下的呼吸量显著低于秸秆菌渣和有机肥(图 3)。相同用量的 3 种有机物料, 树枝菌渣对土壤有机碳的提升效果最佳。

表 2 土壤碳投入和不同组分碳含量
Table 2 Soil carbon inputs and carbon contents in different components

处理	碳投入量(kg/hm ²)	有机质(g/kg)	高活性有机质(g/kg)	中活性有机质(g/kg)	活性有机质(g/kg)	碳库管理指数(%)
CK	1 200	4.52 ± 0.19 c	0.43 ± 0.02 c	0.51 ± 0.05 c	1.34 ± 0.12 d	99.80 ± 0.45 b
M1	2 544	6.21 ± 0.27 b	0.46 ± 0.03 c	0.64 ± 0.04 abc	1.56 ± 0.03 d	81.4 ± 5.16 c
M2	3 888	6.61 ± 0.24 ab	0.65 ± 0.03 ab	0.72 ± 0.03 ab	1.72 ± 0.09 bcd	93.9 ± 6.16 b
S1	2 234	6.17 ± 0.12 b	0.49 ± 0.07 bc	0.74 ± 0.11 ab	1.63 ± 0.13 cd	110.1 ± 20.01 b
S2	3 268	7.07 ± 0.34 a	0.59 ± 0.05 abc	0.77 ± 0.09 ab	2.14 ± 0.28 b	161.8 ± 20.48 a
B1	3 168	6.62 ± 0.49 ab	0.51 ± 0.11 bc	0.62 ± 0.11 bc	2.02 ± 0.23 bc	132.0 ± 17.65 ab
B2	5 136	7.69 ± 0.12 a	0.70 ± 0.14 a	0.82 ± 0.06 a	2.70 ± 0.27 a	150.4 ± 24.99 a

注: 表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 2 土壤呼吸总量
Fig. 2 Total soil respiration

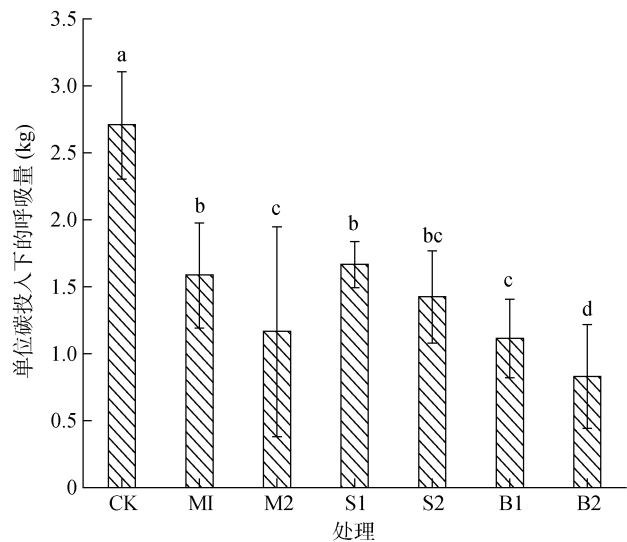


图 3 单位碳投入下的呼吸量
Fig. 3 Respiration per unit of input

2.4 玉米产量与不同组分有机质及碳库管理指数的相关性

通过 Pearson 双变量相关分析表明, 玉米产量与

各组分有机质含量和碳库管理指数均呈显著正相关($P < 0.05$), 其中玉米产量与有机质含量相关性系数为 0.775, 达到极显著水平($P < 0.01$)。有机质与活性有机质呈显著

正相关,与中活性有机质呈极显著正相关,而与高活性有机质和碳库管理指数相关性不显著;活性有机质与高

活性和中活性有机质均呈显著正相关;碳库管理指数的增加表明活性有机质含量增加,进而提高玉米产量。

表 3 不同指标之间的相关性
Table 3 Correlation between different indicators

	玉米产量	有机质	高活性有机质	中活性有机质	活性有机质	碳库管理指数
玉米产量	1					
有机质	0.775**	1				
高活性有机质	0.459*	0.293	1			
中活性有机质	0.594*	0.799**	0.302	1		
活性有机质	0.451*	0.523*	0.600*	0.562*	1	
碳库管理指数	0.556*	0.147	0.065	0.256	0.829**	1

注: *、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

2.5 碳投入与碳积累和碳矿化的拟合

通过图 4 拟合曲线发现,碳投入量与碳积累量呈极显著线性正相关关系, R^2 为 0.838; 投入量与碳矿化量

拟合为三次函数效果较好,达到显著水平, R^2 为 0.609, 表明碳矿化量随碳投入量的成倍增加并不是呈倍数增加的,其增长趋势先上升后趋于平稳甚至有降低趋势。

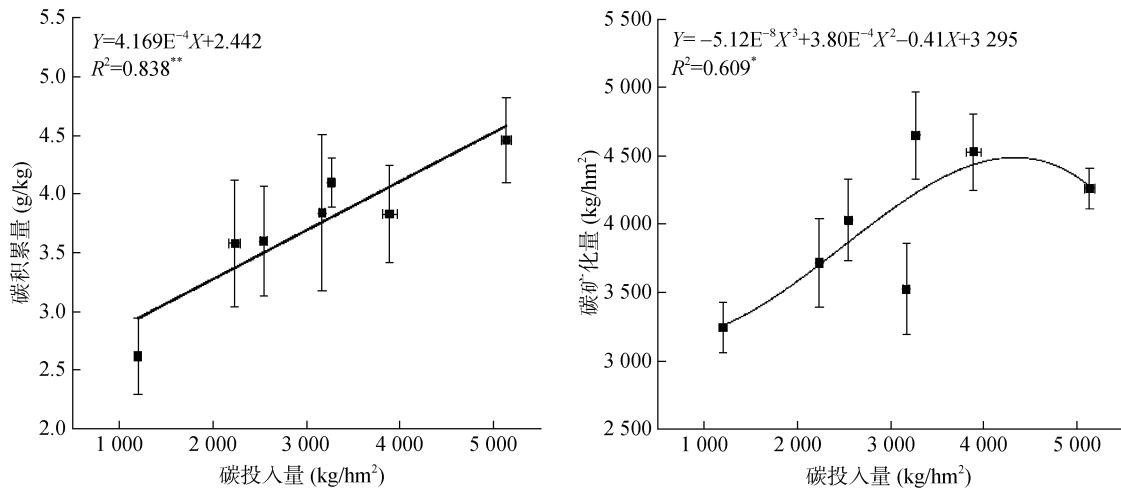


图 4 碳投入与碳积累和碳矿化的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of carbon input with carbon accumulation and mineralization

3 讨论

3.1 潮土施用有机物料对玉米产量的影响

外源有机碳输入是增加土壤有机碳含量、提高作物产量最直接有效的方式^[20-21]。针对黄河故道潮土有机质含量低的问题,通过施用外源有机物料发现,有机物料可增加潮土有机质含量,提高活性有机质占总有机质的比例,增加碳库管理指数,进而达到增产的目的,这与 Rondon 等^[22]和胡乃娟等^[23]的研究结论相似。有机物料进入土壤后,在微生物的作用下会氧化分解释放养分,被作物吸收利用,从而提高作物产量。胡乃娟等^[23]研究表明物料的分解与有机物料 C/N 相关,秸秆菌渣的 C/N 最低,腐解最快,而树枝菌渣的 C/N 最高,腐解相对较慢^[24],因此固存到土壤中的养分多,有利于作物增产。而王丹丹和曹凑贵^[25]

的研究表明作物产量与有机质含量呈负相关,但相关性不显著,本研究结果与此不一致。这可能与研究地区的土壤类型有关,本研究供试土壤为脱盐潮土,有机质含量极低,土壤结构差;而王丹丹试验所用土壤类型为砂质水稻土,土壤结构及养分含量均优于潮土。

3.2 有机物料投入下土壤碳的转化与积累

土壤呼吸是碳矿化的主要方式。宋秋来等^[26]的研究表明,CO₂ 排放量随有机物料投入量的增加而增加,本研究结果与此相似,但二者呈非线性关系,拟合为三次函数关系较好。不同有机物料由于自身物质组成不同,添加到土壤中对土壤碳的矿化和积累的效果也不同。这可能是由于树枝菌渣比秸秆菌渣的碳氮比高,分解树枝菌渣的微生物群落繁殖速度慢,也可能是树枝菌渣中含有较多的木质素和其他难分解成

分造成碳素释放较秸秆菌渣低,对微生物分解矿化有机碳的激发作用弱。

Logninow 等^[27]提出用 3 种不同浓度的 KMnO_4 (33、167、333 mmol/L)氧化土壤有机质,把有机质划分为高活性、中活性和活性有机质。许多研究表明,土壤中活性有机质对土壤碳的变化较非活性有机质敏感得多,与总有机质相比与土壤性质关系更密切,而且土壤总有机质在短时间内变化较小,不能像土壤活性有机质与土壤碳库管理指数一样灵敏全面地反映土壤肥力的变化,因此可以将土壤活性有机质和碳库管理指数作为评价土壤质量和土壤管理的重要指标^[28]。Conteh 等^[29]认为农田土壤活性有机质含量一般占总有机质含量的 9%~20%,同时土壤活性有机质含量的变化并不与有机碳含量的变化成比例。本试验结果显示土壤活性有机质占总有机质的 24%~37%,且变化趋势与有机质一致,这可能与研究区的土地管理有关。且施用的菌菇渣主要为被食用菌菌丝利用后的有机残体,具有极难降解性^[30],导致土壤中非活性有机质占主导,但这部分有机质可稳定储存于土壤中,提高土壤有机质含量。研究结果显示不同活性有机质间差异显著,表明外源添加有机肥和菌菇渣主要通过影响土壤中的不同活性有机质含量来影响总有机质含量。土壤碳库管理指数是土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标^[31],随外源有机物料的添加,CPMI 增加了 10.1%~61.8%,表明外源碳输入使土壤肥力趋向好的方向发展,这与李忠佩等^[32]和 Li 等^[33]的研究结果一致。

4 结论

本试验研究表明,施用有机物料会显著增加玉米产量和土壤有机质含量,但也会增加土壤碳的矿化量,总体而言碳的积累量大于矿化消耗量,最终表现为土壤的“碳汇”。有机物料对土壤总有机质的影响主要通过增加不同活性有机质含量来实现,与对照相比,碳库管理指数显著增加。相同用量的 3 种有机物料,由于碳氮比不同,对土壤有机质的提升效果也不同,表现为呼吸总量:秸秆菌渣 \geq 有机肥 $>$ 树枝菌渣;碳积累量:树枝菌渣 $>$ 秸秆菌渣 \geq 有机肥。综上所述,用量为 12 000 kg/hm²的树枝菌渣对黄河故道潮土有机质提升效果最佳,单位碳投入下的矿化量最少,有机质积累量多,玉米产量高,兼具环境与经济效益。

参考文献:

[1] Rodríguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(1): 53–61.

[2] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612–619.

[3] 李忠佩,张桃林,陈碧云,等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344–352.

[4] 李凌浩,陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 45–51.

[5] 张启明,陈仁霄,管成伟,等. 不同有机物料对土壤改良和烤烟产质量的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 929–933.

[6] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.

[7] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. *Soil Research*, 1998, 36(4): 669.

[8] Maier M, Longdoz B, Laemmel T, et al. 2D profiles of CO_2 , CH_4 , N_2O and gas diffusivity in a well aerated soil: measurement and Finite Element Modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 21–33.

[9] Spaccini R, Piccolo A. Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129: 45–51.

[10] Sparrius L B, Kooijman A M. Nitrogen deposition and soil carbon content affect nitrogen mineralization during primary succession in acid inland drift sand vegetation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 364(1/2): 219–228.

[11] 侯建伟,索全义,梁桓,等. 有机物料对沙蒿生物炭改良沙土中有效养分的增效作用[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 463–467.

[12] 龚振平,王雪松,宋秋来,等. 不同有机质含量土壤 CO_2 排放季节变化规律及差异研究[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(3): 31–37.

[13] 宋秋来,赵泽松,龚振平,等. 东北黑土区旱作农田土壤 CO_2 排放规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(23): 200–207.

[14] 杨艳华,苏瑶,何振超,等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 668–676.

[15] 冯慧翎,胡玉福,舒向阳,等. 金针菇菌渣对川西北高寒沙地植被及土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 161–165.

[16] 李永涛,戴军, Becquer T, 等. 不同形态有机碳的有效性在两种重金属污染水平下水稻土壤中的差异[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 138–145.

[17] 黄以柱. 黄河故道区域土地资源开发利用研究[J]. *自然杂志*, 1995, 17(4): 211–215.

[18] Walpola B C, Arunakumara K. Decomposition of *Gliricidia* leaves: The effect of particle size of leaves and soil texture on carbon mineralization[J]. *Tropical Agricultural Research and Extension*, 2011, 13(1): 19.

[19] Ismail S M, Ozawa K. Improvement of crop yield, soil moisture distribution and water use efficiency in sandy

- soils by clay application[J]. *Applied Clay Science*, 2007, 37(1/2): 81–89.
- [20] 张志国, 徐琪, Blevins R L. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响[J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 384–391.
- [21] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1399–1406.
- [22] Rondon M A, Lehmann J, Ramírez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 699–708.
- [23] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 371–377.
- [24] 鲁耀, 郑波, 段宗颜, 等. 不同有机物料在植烟土壤中的腐解及活性有机碳、氮含量的变化[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4): 1616–1620.
- [25] 王丹丹, 曹凑贵. 耕作措施与秸秆还田方式对土壤活性有机碳库及水稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(32): 123–127.
- [26] 宋秋来, 王峭然, 王麒, 等. 玉米秸秆还田对黑土碳排放的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(13): 219–222.
- [27] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47–52.
- [28] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513–519.
- [29] Conteh A, Lefroy R D B, Blair G J. Dynamics of organic matter in soil as determined by variations in ¹³C/¹²C isotopic ratios and fractionation by ease of oxidation[J]. *Soil Research*, 1997, 35(4): 881.
- [30] 孙建华, 袁玲, 张翼. 利用食用菌菌渣生产有机肥料的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(1): 52–55.
- [31] 沈宏, 曹志洪. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 663–668.
- [32] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 220–228.
- [33] Li C F, Yue L X, Kou Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119: 31–37.