

黑碳添加对土壤活性有机碳和原有机碳的影响^①

李淑香^{1,2}, 尹云锋^{1,2*}, 杨玉盛^{1,2}, 高人^{1,2}, 马红亮^{1,2}, 李芳芳^{1,2}

(1 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 通过室内培养实验, 向土壤(甘蔗土)中分别添加不同用量的黑碳(BC, 350℃热解水稻秸秆), 添加量分别为 0(BC0)、1%(BC1)、2%(BC2)、3%(BC3)、4%(BC4)和 5%(BC5), 研究黑碳添加量对土壤活性有机碳和原有机碳的影响。结果表明, 在 25℃培养条件下, 土壤易矿化碳(C_m)随黑碳添加量的增加而增加; 土壤微生物生物量碳含量亦随添加量的增加呈增加趋势(BC3 处理除外)。土壤可溶性有机碳含量在 BC1、BC2 和 BC3 处理之间的差异不显著, 并显著低于对照土壤(BC0); 应用 $\delta^{13}\text{C}$ 自然丰度方法研究发现, BC1 处理抑制了土壤原有机碳分解, 而 BC2、BC3、BC4 和 BC5 处理促进了土壤原有机碳的分解, 但统计上未达显著水平。

关键词: 黑碳; 活性有机碳; 原有机碳; $\delta^{13}\text{C}$

中图分类号: S153

黑碳(black carbon, BC)是生物质或化石燃料不完全燃烧产生的一种碳元素含量较高的混合物, 普遍存在于土壤、沉积物和大气中, 土壤中黑碳占有有机碳的比例可高达 45%, 是地球稳定性碳库的重要组成部分^[1-3]。研究发现, 黑碳具有较高的比表面积和羧基、羟基、酚羟基等多种功能团, 能吸附环境中的污染物质, 增加土壤中阳离子(CEC)的交换量, 同时对保持土壤肥力具有重要作用^[4-5]。目前, 黑碳对土壤固碳的影响机制方面已引起众多学者的广泛关注^[6]。但目前黑碳对土壤原有机碳的影响研究还不多见。本文利用稳定性同位素 ^{13}C 技术, 研究短期条件下黑碳添加量对土壤活性有机碳及原有机碳的影响, 为正确评价黑碳在土壤碳循环中的作用及贡献提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 黑碳的制备

黑碳制备方法参照文献[7]。将洗净的水稻秸秆置于烘箱中, 在 60℃中烘至恒重, 冷却后, 准确称取 2~3 g 秸秆于坩埚中(实验共需秸秆 75 g), 用坩埚盖盖好放入马弗炉中, 关闭炉门, 达到 350℃时开始计时, 燃烧 2 h 之后打开炉门, 冷却至室温, 准确称重。样品制备完毕, 过 0.25 mm 筛备用。黑碳的 pH 为 8.6, 全碳含量为 440.3 g/kg, 全氮含量 16.3 g/kg, C/N 为 27.8, 可溶性有机碳(DOC)含量为 1.86 g/kg,

$\delta^{13}\text{C}$ 值为-28.61‰。

1.2 供试土壤

供试土壤采自福建师范大学旗山校区校园内, 土壤连续种植甘蔗(C₄ 作物)多年, 有机碳含量为 8.31 g/kg、全氮为 0.45 g/kg、pH 值为 5.35, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.35‰。将采集的新鲜土壤样品去除植物残体, 过 2 mm 筛备用。

1.3 试验设计

本研究以不加黑碳的土壤作为对照 0(BC0), 向土壤中分别添加不同用量的黑碳(土壤质量分数), 即 1%(BC1)、2%(BC2)、3%(BC3)、4%(BC4)和 5%(BC5), 共 6 个处理, 每个处理重复 4 次。具体步骤如下: 分别将不同用量的黑碳与新鲜土样(相当于烘干土 50 g)混合均匀, 装入培养瓶中, 然后将装有样品的培养瓶放置于 1 L 的广口瓶中培养, 广口瓶中同时放置盛有 10 ml 0.5 mol/L NaOH 溶液的小瓶和装有蒸馏水的小瓶子各 1 个, 最后塞紧胶塞, 将广口瓶放入 25℃的培养箱中黑暗培养 56 天。分别在培养的第 3、7、14、21、28、56 天更换装有碱液的小瓶, 培养过程中定期补充水分, 保持土壤持水量(WHC)为 60%。

1.4 样品测定

土壤易矿化碳(C_m)利用 NaOH 收集, HCl 滴定法测定, 计算出 CO₂-C 的释放量; 可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)采用总有机碳分析仪(TOC-

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801087, 31070549)和福建省自然科学基金项目(2010J01248)资助。

* 通讯作者(yunfengyin@163.com)

作者简介: 李淑香(1986—), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: shuxiangl@126.com

V CPH)测定,DOC 用 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液浸提的有机碳量表示,MBC 用氯仿熏蒸浸提方法测定^[8];土壤有机碳(SOC)和黑碳(BC)含量采用碳氮元素分析仪(Vario El III)测定,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值用稳定同位素质谱仪(Finnigan MAT 253)测定。

1.5 土壤不同来源有机碳数量的计算

计算方法参照文献[9-10]。在本实验中,培养结束时土壤有机碳总量中来源于黑碳的比例为:

$$f = (\delta - \delta_0) / (\delta_1 - \delta_0) \tag{1}$$

式中, δ : 培养结束时添加黑碳土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; δ_0 : 未添加黑碳土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; δ_1 : 黑碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

若土壤有机碳总量(C)已知,那么土壤中来自黑碳(C_{BC})和土壤原有有机碳(C₀)含量分别为:

$$C_{\text{BC}} = f C \tag{2}$$

$$C_0 = (1-f)C \tag{3}$$

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图,SPSS16.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 不同添加量对土壤活性有机碳的影响

表 1 为培养 56 天后不同黑碳添加处理 Cm、MBC 和 DOC 的变化情况。结果表明,土壤 Cm 呈现 BC5>BC4>BC3>BC2>BC1>BC0 的趋势,BC5 处理的土壤 Cm 是 BC0 处理土壤的 2.3 倍。添加黑碳后,土壤 MBC 含量均高于对照处理,BC1 与 BC5 处理土壤的 MBC 含量差异显著($P<0.05$),而与其他 3 个处理间差异不显著。土壤 DOC 含量并没有随添加量的增加而产生规律性的变化,BC1、BC2 和 BC3 处理的土壤 DOC 含量差异不显著($P>0.05$),并且低于 BC0 处理,BC4 和 BC5 处理的土壤 DOC 含量较 BC0 处理有所增加。回归分析表明,培养结束时的 Cm、MBC、DOC 含量随黑碳添加量变化符合二次函数关系(表 2)。

2.2 不同添加量对土壤原有有机碳的影响

由图 1 可见,加入黑碳后,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值较原土明显降低。BC5 处理的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 BC0 处理的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 降低了 5.41‰,降低幅度为 25%。回归分析表明,土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与黑碳添加量之间呈显著线性相关,回归方程为 $y = -1.02x - 21.45$ ($R^2 = 0.856$, $P<0.01$),黑碳添加量越大,土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低。

培养 56 天后,不同处理间土壤总有机碳含量差异显著($P<0.05$),并且总有机碳含量随黑碳添加量的增加而增加(图 2)。BC1 处理的土壤总有机碳中来自

表 1 土壤活性有机碳含量
Table 1 Soil labile organic carbon contents under different treatments

处理	Cm (mg/kg)	MBC (mg/kg)	DOC (mg/kg)
BC0	346.43 e	50.53 c	59.69 b
BC1	357.26 e	59.53 bc	52.54 c
BC2	491.54 d	82.36 ab	52.37 c
BC3	592.05 c	77.18 ab	52.54 c
BC4	666.80 b	84.78 ab	61.91 b
BC5	799.24 a	90.98 a	69.95 a

注:同列不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

表 2 土壤活性有机碳含量与黑碳添加量的关系
Table 2 Relationship between soil labile organic carbon content and black carbon addition level

活性有机碳	回归方程	R^2
Cm	$y = 6.6x^2 + 47.9x + 274.6$	0.984**
MBC	$y = -1342.9x^2 + 145.2x + 5.0$	0.908**
DOC	$y = 2044.6x^2 - 79.4x + 5.9$	0.973**

注:y 为活性有机碳含量;x 为黑碳不同添加量;** 表示在 $P<0.01$ 水平显著相关。

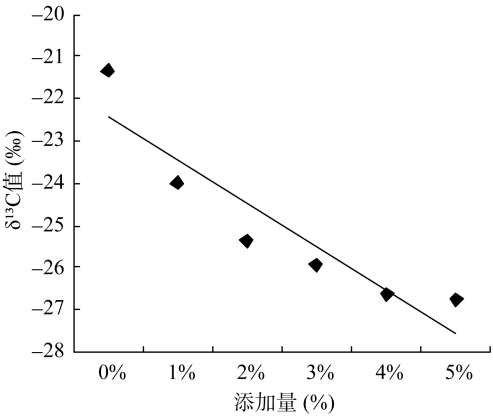


图 1 $\delta^{13}\text{C}$ 值与黑碳添加量的关系
Fig. 1 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ value in soil and BC addition level

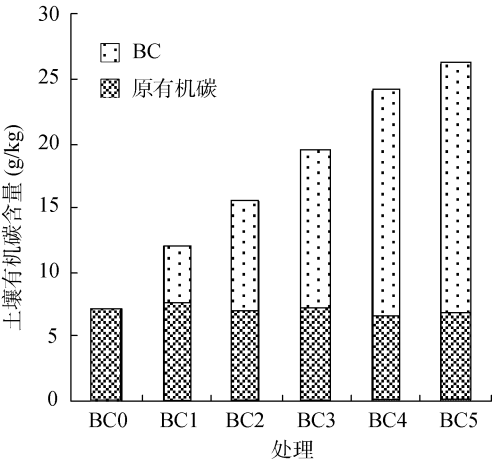


图 2 土壤有机碳的来源
Fig. 2 Organic carbon derived from BC and native SOC under different treatments

黑碳部分为 4.38 g/kg, BC5 处理的土壤有机碳中来自黑碳部分为 BC1 处理的 4.47 倍。土壤中原有机碳含量表现为 BC1>BC0>BC3>BC2>BC5>BC4, BC1 处理的原有机碳含量为 7.58 g/kg, 高于 BC0 处理 0.44 g/kg。而 BC2、BC3、BC4、BC5 处理的土壤原有机碳损失量在 0.3%~8.8% 之间(同 BC0 相比)。但不同处理间原有机碳含量的差异并不显著($P>0.05$)。

3 讨论

黑碳添加量与 C_m 、MBC、DOC 含量的变化有着密切的联系。Novak 等^[11]利用黑碳和柳枝稷混合作为研究材料,发现黑碳在抑制土壤 C_m 同时又促进了柳枝稷的分解。Zimmerman 等^[12]发现黑碳添加可以增加土壤 C_m , 且添加不同材料制备的黑碳对土壤 C_m 的影响不同, 由木本制备的黑碳土壤 C_m 要低于由草本制备的。本研究表明, 在短期时间内(56 天), 黑碳添加导致了土壤 C_m 的增加, 这与 Kolb 等^[13]的结论相一致。BC5 处理的土壤 C_m 最大, 其原因可能在于 BC5 处理的黑碳添加量最高, 土壤 MBC 含量也最高(表 1), 有研究表明较高的黑碳添加量具有较高的微生物活性^[13-14], 另外, 土壤 C_m 也部分来源于黑碳的分解^[15]。但在本研究中, 土壤 DOC 含量并没有随黑碳添加量的增加产生明显的规律性变化, BC1、BC2、BC3 处理的土壤 DOC 含量差异不显著且低于对照土壤, 而 BC4 和 BC5 处理的土壤 DOC 含量显著且高于对照土壤。这可能是由于低添加量土壤中黑碳空隙间附着的微生物促进了可溶性碳的分解, 但随着黑碳添加量的增加, 黑碳的强吸附性又对土壤 DOC 的分解起到了抑制作用。土壤碳组分中不仅 DOC 是土壤有机碳库的活性组分, 易于被土壤微生物吸收利用, MBC 也是土壤中活跃的移动性碳库^[16-17]。土壤类型、黑碳种类及添加量的不同都会对土壤微生物的活动产生影响^[18-19]。Steinbeiss 等^[20]发现土壤中添加葡萄糖制备的黑碳会导致土壤微生物量减少, 而添加发酵物制备的黑碳后土壤微生物量却没有变化。Zavalloni 等^[21]发现黑碳添加并未影响土壤微生物量。本研究发现, 添加黑碳的土壤 MBC 含量高于对照土壤的, 且 BC5 处理的土壤 MBC 含量最高, 这说明黑碳添加为微生物的生长提供了能量, 增强了微生物的呼吸(表 1)。

黑碳添加对土壤原有机碳的影响研究还存在争议^[14,22-24]。如 Smith 等^[25]利用 ^{13}C 自然丰度研究黑碳添加对 SOC 矿化的影响, 结果发现黑碳添加对土壤原有机碳几乎无影响, Jones 等^[26]利用 ^{14}C 标记法研

究发现黑碳添加抑制了土壤原有机碳的分解。而 Wardle 等^[14]发现黑碳促进了土壤中腐殖类物质的分解。Zimmerman 等^[12]发现在培养 90 天后黑碳对土壤原有机碳的影响由促进作用转变成抑制作用。Luo 等^[27]将黑碳(350℃ 热解条件制备)以 5% 的质量比添加到土壤中培养 87 天, 结果发现土壤原有机碳损失 3.3%, 表明黑碳促进了土壤原有机碳的分解, 这与本研究的结论基本一致。但本研究也发现黑碳添加量为 1% 时抑制了土壤原有机碳的分解, 而添加量为 2%、3%、4% 和 5% 时却促进了土壤原有机碳的分解, 但统计上未达显著水平, 这表明向土壤中添加 1%~5% 的黑碳短期内对土壤原有机碳的影响较小。

参考文献:

- [1] Schmidt MI, Skjemstad JO, Czimczik CI, Glaser B, Prentice KM, Gelinas Y, Kuhlbusch TJ. Comparative analysis of black carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 163-167
- [2] Skjemstad JO, Reicosky DC, Wilts AR, McGowan JA. Charcoal Carbon in U.S. Agricultural Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 249-1 255
- [3] Schmidt MI, Noack AG. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implication, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 777-793
- [4] 章明奎, 王浩, 郑顺安. 土壤中黑碳的表面化学性质及其变化研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2009, 35(3): 278-284
- [5] Czimczik CI, Masiello CA. Controls on black carbon storage in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 1(3): 1 029-1 036
- [6] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen HQ, Bogomolova I, Xu XL. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 210-219
- [7] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, Amelung W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35: 823-830
- [8] Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, Chaussod R, Brookes PC. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1 167-1 169
- [9] 窦森, 张晋京, Lichtfouse E, 曹亚澄. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 328-333
- [10] 尹云锋, 蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1 022-1 027
- [11] Novak JM, Busscher WJ, Watts DW, Laird DA, Ahmedna MA, Niandou MAS. Short-term CO_2 mineralization after

- additions of biochar and switchgrass to a typic Kandudult [J]. *Geoderma*, 2010, 154: 281–288
- [12] Zimmerman AR, Gao B, Ahn MY. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1 169–1 179
- [13] Kolb SE, Fermanich KJ, Dornbush ME. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1 173–1 181
- [14] Wardle DA, Nilsson MC, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus[J]. *Science*, 2008, 320: 629
- [15] Cross A, Sohi SP. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 2 127–2 134
- [16] Jiang YM, Chen CR, Liu YQ, Xu ZH. Soil soluble organic carbon and nitrogen pools under mono- and mixed species forest ecosystems in subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10: 1 071–1 081
- [17] Park JH, Kalbitz K, Matzner E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 813–822
- [18] Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota-A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1 812–1 836
- [19] Durenkamp M, Luo Y, Brookes PC. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 2 026–2 029
- [20] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1 301–1 310
- [21] Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, Vedove GD, Fornasier F, Liu J, Peressotti A. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 50: 45–51
- [22] Major J, Lehmann J, Rondon M. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 1 366–1 379
- [23] Spokas KA, Koskinen WC, Baker JM. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 77: 574–581
- [24] Liang BQ, Lehmann J, Sohi SP, Thies JE, Neill BO, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Groosman J, Neves EG, Luizao FJ. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206–213
- [25] Smith JL, Collins HP, Bailey VL. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 2 345–2 347
- [26] Jones DL, Murphy DV, Khalid M, Ahmad W, Edwards-Jones G, DeLuca TH. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1 723–1 731
- [27] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 2 304–2 314

Effects of Black Carbon Addition on Soil Labile Organic Carbon and Native Soil Organic Carbon

LI Shu-xiang^{1,2}, YIN Yun-feng^{1,2*}, YANG Yu-sheng^{1,2}, GAO Ren^{1,2},
MA Hong-liang^{1,2}, LI Fang-fang^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China;*

2 *College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*)

Abstract: Black carbon (BC) is an important pool of the global C cycle. However, very little is known about the effect of BC addition on soil labile organic carbon and native soil organic carbon. In the study, BC was produced by charring the rice straw under 350°C and mixed with soil under different rates of addition levels (0, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%), and incubated for 56 days at 25°C. The results indicated that soil easily mineralization carbon (C_m) increased with the increase of BC addition level, and soil microbial biomass carbon (MBC) content had the similar trend (exception for 3%). Dissolved organic carbon (DOC) content in soil showed no significant difference among the lower addition levels (1%, 2%, 3%), but it was obviously lower in BC amended soils (1%, 2%, 3%) relative to the unamended soils. Using natural ¹³C abundance method, the results suggested that BC addition inhibited the native SOC decomposition at rate of 1% BC addition, but stimulated the native SOC decomposition at rates of 2%, 3%, 4% and 5% BC addition. However, the effects of BC additions on the native SOC decomposition were not significant among different treatments.

Key words: Black carbon, Soil labile organic carbon, Native soil organic carbon, $\delta^{13}\text{C}$ values