植物营养与肥料学报 2015,21(4):943-950 doi: 10.11674/zwyf.2015.0413
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

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

李有兵[1], 把余玲[1,2], 李 硕[1], 田霄鸿[1*]
(1 西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100;
2 陕西省土地工程建设集团,陕西西安 710075)

摘要:【目的】本研究通过探讨小麦和玉米残体与其生物炭配施对土壤各组分有机碳及其自身有机碳矿化的影响,揭示其在土壤固碳和培肥方面的效应,为农田有机物资源合理利用提供理论支撑。**【方法】**采用室内恒温培养试验,共设置小麦或玉米残体(根茬、秸秆)和秸秆制成的生物炭单施(WS、WR、WB、MS、MR、MB),配施(WS+WB、WR+WB、MS+MB、MR+MB)以及对照(CK)构成的11个处理,培养期间测定土壤 CO_2 释放量,培养结束后测定土壤总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)以及粗细颗粒有机碳含量(CPOC、FPOC)。**【结果】**添加玉米有机物料对土壤 TOC、MBC、POC、CPOC 和 FPOC 含量的增加作用普遍高于添加小麦有机物料。添加小麦或玉米秸秆对土壤 TOC、POC、CPOC、FPOC 含量的增加作用均高于添加根茬。单独添加生物炭,作物残体与生物炭配施和单独添加作物残体处理分别在培养的第4、8、21 d 有机碳矿化速率最大,为有机碳矿化快速期,之后矿化速率减缓并逐渐趋于稳定。单独添加作物残体其有机碳累积矿化率最大,达到30%~46%;与对照相比,添加有机物料的各处理均显著增加了土壤 TOC 含量,其中添加生物炭处理土壤 TOC 含量增幅最大;单独添加小麦和玉米生物炭处理,土壤 TOC 含量分别显著增加34.4%和36.5%,但其有机碳累积矿化率仅为3%左右,土壤 FPOC 含量及敏感性指数在单独添加生物炭处理最高;小麦和玉米残体与其生物炭配施处理,土壤 MBC 和 CPOC 含量分别显著增加80.2%~199.2%,且其有机碳累积矿化率为12%~19%,介于生物炭和残体单施之间,土壤 CPOC 含量及敏感性指数均表现为配施处理最高。**【结论】**单独添加作物残体能够较好地补充土壤养分,但 CO_2 释放量显著高于单施生物炭及配施处理;单独添加生物炭其有机碳累积矿化率较低,短期内对土壤养分的补充作用较小。作物残体与其生物炭配施可以较好地克服各自单独施用的弊端,尤其是玉米秸秆与其生物炭配施,在保证作物养分供应的同时能增加土壤碳库储量,对土壤肥力提升效果更好。

关键词: 作物残体; 生物炭; 各组分有机碳; 有机碳矿化
中图分类号: S141.4; S153.6+21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0943-08

Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate

LI You-bing[1], BA Yu-ling[1,2], LI Shuo[1], TIAN Xiao-hong[1*]
(*1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrient and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Shaanxi Land Construction Group, Xi'an 710075, China*)

Abstract:【Objectives】This study investigated effects of single or combined addition of crop residues and straw biochar on the contents of soil organic carbon components and their mineralization, and revealed their effects in terms of soil carbon sequestration and fertility improvement, therefore provided theoretical support for reasonable utilization of farmland organic resources.**【Methods】** An incubation experiment was carried out for 83 days with totally 11 treatments, control soil (CK), single addition (WS, WR, WB, MS, MR and MB) and combined

收稿日期: 2014-04-29 **接受日期:** 2014-07-07 **网络出版日期:** 2015-04-14
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11);国家自然科学基金项目(41371288, 31071863)资助。
作者简介: 李有兵(1989—),男,陕西米脂人,硕士研究生,主要从事废弃物资源农业循环利用方面的研究。E-mail:li_youbing@126.com
* 通信作者 Tel:029-87082069,E-mail:txhong@hotmail.com

addition (WS + WB, WR + WB, MS + MB and MR + MB) of wheat or maize residues (root, straw) and straw biochar. The experiment measured soil CO_2 emission during cultivation, at the end of the experiment, soil total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC) and coarse, fine particulate organic carbon (CPOC and FPOC) were also determined. **【Results】** The contents of soil TOC, MBC, POC, CPOC and FPOC under the adding maize residue are higher than those of adding wheat residue, and the addition of shoots increases the contents of soil TOC, POC, CPOC and FPOC more obviously compared to the addition of roots. The organic carbon mineralization rates are rapid at the beginning of 4, 8, 21 d under treatments of single addition biochar, combination of crop residues and biochar and single addition crop residues respectively, then slow down and gradually stabilize. The single addition of crop residues has the maximum cumulative mineralization rate of organic carbon (up to from 30% to 46%). Compared with the control, the treatments of adding organic materials all significantly increase the content of soil TOC, and the single addition of biochar has the largest increase (by 34.4% and 36.5% under the single addition of wheat or maize straw biochar respectively), but the cumulative mineralization rate of organic carbon is only 3%. The soil FPOC content and sensitivity index of the single addition biochar treatments are higher than those of the others. The treatments with mixed wheat or maize residue and their biochar significantly increase the contents of soil MBC and CPOC by 102.2%, 109.3% and 199.2%, 80.2% respectively and the cumulative mineralization rate of organic carbon is between 12% to 19%. The treatments of combining addition crop residues and biochar also have the highest soil CPOC contents and sensitivity indices. **【Conclusions】** The complementary role of soil nutrients is obvious in adding crop residues alone treatments, while the CO_2 released rates of the adding crop residues alone treatments are higher than those of the other treatments, and the single addition of biochar has the lowest cumulative mineralization rate, therefore, the supply of soil nutrients is limited. Over all, the combined addition of crop residues and their biochar can better overcome their drawbacks, especially for maize straw and its biochar mixture, which can both increase soil carbon reservoir and ensure the supply of soil nutrients, have significant effect on soil fertility enhancement.

Key words: crop residues; biochar; soil organic carbon components; organic C mineralization

土壤碳库在陆地碳循环和全球气候变化中起关键作用,土壤碳库储量是衡量土壤肥力的重要指标,目前关于如何增加土壤碳库储量已成为研究热点[1]。土壤总有机碳(TOC)作为土壤碳库的容量指标,其循环和转化与作物的养分供应和土壤物理、化学以及微生物性状的改善密切相关[2-3]。土壤可溶性有机碳(DOC)包括多种大分子量的腐殖质以及小分子量的多糖、氨基酸和有机酸[4],是土壤有机碳库的重要组成部分,在改善土壤微生物活性和营养物质转运以及调节全球碳循环方面具有重要意义[5]。土壤颗粒有机碳(POC)是与土壤砂粒结合的有机碳部分,其中250～2000 μm被称为粗颗粒有机碳(CPOC),53～250 μm被称为细颗粒有机碳(FPOC),均属于有机碳中的活性组分,主要包括作物残体、微生物及小型动物的残骸,其中大部分由最新的活性有机物质组成[6-9]。土壤微生物不仅参与土壤结构的形成,也是土壤中养分循环和物质转化的驱动者,土壤微生物量碳(MBC)被认为是土壤养分转化过程中的一个重要源和库,其大小能够反映土壤同化和矿化的能力,在调节土壤养分供应方面具有不可忽视的作用[10-11]。

生物炭(Biochar)是农林废弃物等生物质在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物。近年来,随着粮食安全、环境安全和固碳减排需求的不断发展,生物炭的内涵逐渐与土壤管理、农业可持续发展和碳截留等相联系[12-13]。生物炭作为一种惰性有机资源,还田后能通过改善土壤物理、化学及生物学性状来改良和培肥土壤[14],但由于其稳定性较强,分解缓慢,因此单独施用生物炭短期内对土壤养分的补充作用较小,提升土壤肥力的效果不明显;秸秆等作物残体还田能改善土壤理化性质,提高土壤肥力,但残体还田后也会引起农田温室气体排放的增加等一系列负面效应[15]。因此,我们猜想,作物残体与其秸秆生物炭配施还田在保证和提高土壤肥力的基础上,能够减少温室气体的排放,对于维持土壤的可持续发展和改善全球气候环境也具有重要意义。目前关于生物炭和作物秸秆分别施入农田的研究很多,但作物残体与其生物炭配施对土壤各组分

有机碳及其自身有机碳矿化影响的研究很少。本试验采用室内恒温培养方法,研究了小麦、玉米残体(根茬、秸秆)及其秸秆生物炭单独施用或配合施用对土壤 TOC、DOC、MBC、POC、CPOC 和 FPOC 含量及其自身有机碳矿化的影响,探明作物残体与其生物炭配施还田在增加土壤碳截留和提高土壤肥力方面的作用,以期为农田有机物资源合理利用提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试土壤采自小麦/玉米一年二熟轮作长期定位试验地两种作物秸秆均不还田处理的田块耕层(0—20 cm),该试验地位于陕西省三原县西北农林科技大学三原试验站,土壤类型属于土垫旱耕人为土。于 2012 年 6 月小麦收获后采集新鲜土样,过 2 mm 筛后分为两部分,一部分于 4℃下保存待用;另一部分风干后测定土壤基本理化性质。供试土壤 pH 为 8.08,土壤总有机碳和全氮含量分别为 14.86 g/kg 和 1.55 g/kg, NO_3^--N 17.73 mg/kg, NH_4^+-N 12.37 mg/kg。

供试有机物料包括小麦根茬(WR)、小麦秸秆(WS)、玉米根茬(MR)、玉米秸秆(MS)、小麦生物炭(WB)和玉米生物炭(MB)。其中,小麦和玉米植株以整株的方式采用“S”型多点采样法,分别于 2012 年 5 月 3 日和 2011 年 10 月 9 日于作物收获前在田间采集得到,采回后从植株茎、根连接处分成根茬和秸秆 2 部分,清洗根样,将残体烘干(65℃)称重、粉碎(0.5 ～ 1.0 mm)后备用,本试验中采用的生物炭为自制的秸秆炭,是将小麦、玉米地上部分(不包括籽粒)粉碎后于 450℃下缺氧不完全燃烧得到[16],供试有机物料碳、氮含量见表 1。

1.2　试验设计及培养过程

室内培养试验包括有机物料单施(WR、WS、WB、MR、MS、MB),小麦、玉米残体分别与其秸秆生物炭按 1∶1 的重量比配施(WR + WB、WS + WB、MR + MB、MS + MB),以及对照(CK, 未添加有机物料的土壤)共 11 个处理,各处理有机物料的加入量相等,每个处理重复 3 次。

称取 100 g(烘干计)供试土样于 1 L 培养盆中,用蒸馏水调节土壤含水量至田间持水量的 60%,20℃下预培养 7 d,待微生物活化后,根据处理按每千克土样 8 g 有机物料的用量分别加入有机物料,同时将 $CO(NH_2)_2$ 按 106 mg/kg(240 kg/hm^2)的用量,以溶液形式加入相应培养盆中补充氮源(调节土壤含水量至田间持水量的 70%)。另外设有只加土壤的处理为对照处理,充分混匀后,在(25 ± 1)℃恒温条件下密封培养 83 d,培养过程中水分采用称重法补充维持至初始重量。

表 1　供试有机物料的碳氮含量

Table 1　The basic chemical compositions of organic amendments

添加物 Amendment	全碳 Total C (g/kg)	水溶性碳 Water-soluble C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碳氮比 C/N
小麦根茬 WR	417	7.6	6.1	69.7
小麦秸秆 WS	425	15.4	5.8	73.2
小麦生物炭 WB	611	2.5	8.9	68.7
玉米根茬 MR	405	14.9	3.9	103.9
玉米秸秆 MS	444	30.8	5.9	74.9
玉米生物碳 MB	689	3.3	15.7	43.9

注(Note): WR—Wheat root; WS—Wheat straw; WB—Wheat biochar; MR—Maize root; MS—Maize straw; MB—Maize biochar.

1.3　测定项目与方法

土壤和有机物料中全碳和全氮的测定采用常规方法[17],有机物料水溶性碳采用蒸馏水浸提(w/v = 1/10)TOC 分析仪测定,CO_2 释放量分别在培养的第 2、4、6、9、13、17、21、27、34、41、51、66、83 d 采用 NaOH 吸收滴定法测定。采用氯仿薰蒸浸提法测定土壤微生物量碳,根据刘梦云等[18]的研究方法测定土壤颗粒有机碳。

1.4　数据分析

土壤粗细颗粒有机碳的敏感性指数采用下式计算[19]:

敏感性指数 = (各处理土壤碳组分含量 - 对照处理土壤碳组分含量)/对照处理土壤碳组分含量

试验数据采用 Microsoft Excel 2007、DPS 7.05 统计软件进行方差分析和多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同添加物处理有机碳矿化速率及累积矿化率

图 1 显示,培养期间各处理有机碳矿化速率变化规律一致,均表现为前快后慢。不同种类作物残体单施处理前期(0 ～ 21 d)有机碳矿化速率较快,为有机碳矿化快速期,之后矿化速率有所减缓并逐

渐趋于稳定,在培养51 d后有机碳矿化速率趋于平稳状态;不同种类生物炭单施处理在培养前期(0～4 d)有机碳矿化速率较快,之后基本维持稳定状态;不同有机物料配施处理前期(0～8 d)有机碳矿化速率较快,之后有所减缓,于41 d后基本维持稳定。培养结束后,无论来源于小麦还是玉米的有机物料,单施处理其有机碳累积矿化率以秸秆最高(46%),根茬次之(30%～43%),生物炭最低(3%～4%),残体与生物炭配施处理其有机碳累积矿化率介于生物炭和作物残体单施处理之间;有机碳累积矿化率在配施处理间表现为秸秆与生物炭配施(19%)始终高于根茬与生物炭配施(12%～15%),表明秸秆较根茬更容易腐解。

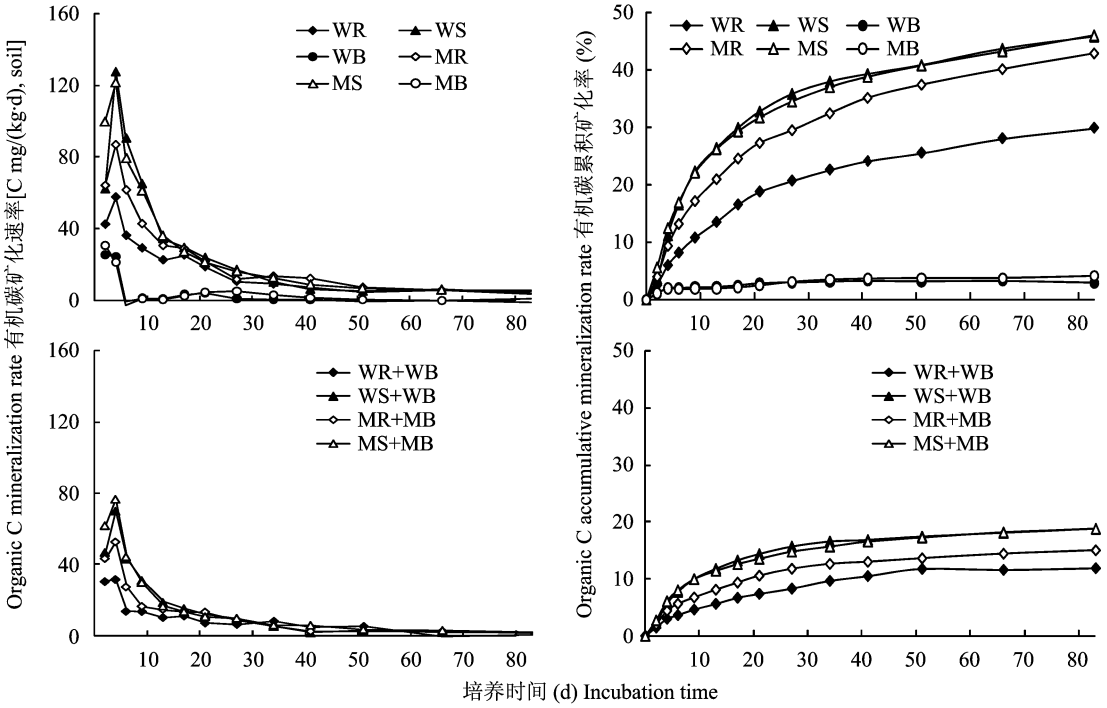

图1 不同添加物处理有机碳矿化速率及累积矿化率

Fig. 1 Organic C mineralization rate and cumulative mineralization rate under different amendments treatments

[注(Note): WR—小麦根茬 Wheat root;WS—小麦秸秆 Wheat straw;WB—小麦生物炭 Wheat biochar;MR—玉米根茬 Maize root;MS—玉米秸秆 Maize straw;MB—玉米生物炭 Maize biochar.]

2.2 不同添加物处理土壤各组分有机碳含量

表2表明,对于土壤总有机碳,与培养前土壤相比,培养期间各处理土壤TOC含量均有不同程度的增加,具体表现为单施生物炭>残体与生物炭配施>单施残体>对照,且单施生物炭处理土壤TOC含量显著高于其他处理,与对照处理相比,添加小麦和玉米生物炭,TOC含量分别显著增加了34.4%和36.5%。土壤可溶性有机碳含量在添加小麦根茬和玉米生物炭处理最高,在对照处理最低,残体与其生物炭配施介于二者之间,与对照处理相比,不同添加物处理均显著增加了土壤DOC含量,对于小麦添加物,DOC含量依次为根茬>秸秆>生物炭,玉米添加物则与之相反。对于土壤微生物量碳含量,不同有机物料添加处理间基本趋势为残体与生物炭配施>单施残体>单施生物炭,作物不同部位添加物间均表现为秸秆>根茬,不同种类作物添加物间均表现为玉米>小麦。对于土壤颗粒有机碳含量,添加生物炭的处理土壤POC含量普遍较高,但各处理间差异较小,对于小麦和玉米添加物,POC含量均表现为生物炭>根茬>秸秆,且差异达到显著性水平。可见,添加生物炭能够明显增加土壤TOC和POC含量,生物炭与残体配施能够增加土壤MBC含量,在增加土壤TOC和MBC含量方面,添加玉米秸秆效果优于小麦秸秆。

表 2　不同添加物处理土壤各组分有机碳含量

Table 2　The contents of SOC components under different amendment treatments

处理 Treatment	总有机碳 (g/kg) TOC	活性有机碳 (mg/kg) DOC	微生物量碳 (mg/kg) MBC	颗粒总有机碳(g/kg) POC
CK	15.00 ± 0.15 e	1.89 ± 0.43 e	27.87 ± 2.24 h	5.08 ± 0.20 g
WR	16.40 ± 0.63 d	4.00 ± 0.32 a	39.15 ± 2.11 g	6.18 ± 0.42 ef
WS	16.21 ± 0.38 d	2.91 ± 0.34 d	42.35 ± 6.72 f	5.26 ± 0.28 g
WB	20.16 ± 0.52 a	2.54 ± 0.24 de	38.16 ± 3.38 g	7.43 ± 0.60 abc
MR	17.71 ± 0.41 c	2.84 ± 0.19 d	52.78 ± 1.82 de	6.55 ± 0.17 de
MS	16.91 ± 0.26 d	3.97 ± 0.24 ab	66.79 ± 1.06 bc	5.64 ± 0.22 fg
MB	20.47 ± 0.22 a	4.12 ± 0.22 a	52.47 ± 7.14 d	8.14 ± 0.86 a
WR + WB	18.00 ± 0.22 bc	3.03 ± 0.68 cd	49.15 ± 1.97 ef	7.89 ± 0.44 ab
WS + WB	18.35 ± 0.55 bc	3.18 ± 0.26 bcd	63.60 ± 0.69 c	7.30 ± 0.83 abcd
MR + MB	18.21 ± 0.84 bc	3.70 ± 0.29 abc	71.60 ± 0.24 b	6.97 ± 0.04 cde
MS + MB	18.51 ± 0.37 b	3.21 ± 0.57 bcd	95.21 ± 0.62 a	7.27 ± 0.41 bcd

注(Note): TOC—Total organic carbon; DOC—dissolved organic carbon; MBC—microbial biomass carbon; POC—particulate organic carbon; WR—小麦根茬 Wheat root; WS—小麦秸秆 Wheat straw; WB—小麦生物炭 Wheat biochar; MR—玉米根茬 Maize root; MS—玉米秸秆 Maize straw; MB—玉米生物炭 Maize biochar. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments($P < 0.05$).

2.3　不同添加物处理土壤粗细颗粒有机碳含量及其敏感性指数

表 3 表明,对于土壤粗颗粒有机碳含量,与有机物料单独添加处理相比,残体与其生物炭配施土壤 CPOC 含量较高,且 WR + WB、WS + WB、MS + MB 三个处理土壤 CPOC 含量显著高于有机物料单独添加处理。土壤细颗粒有机碳含量范围为 4.12 ～ 6.63 g/kg,大于土壤粗颗粒有机碳的 0.96 ～ 2.02 g/kg,不同有机物料添加处理均表现为单施生物炭 > 残体与生物炭配施 > 单施残体,不同种类作物添加物间基本趋势为玉米 > 小麦,与对照处理相比,添加小麦和玉米生物炭土壤 FPOC 含量分别显著增加 2.01 g/kg 和 2.51 g/kg。土壤粗、细颗粒有机碳敏感性指数变化幅度较大,分别为 12.88% ～ 110.44%,1.44%～60.92%。在不同有机物料添加处理中,土壤粗颗粒有机碳较细颗粒有机碳更为敏感,对土壤和作物管理措施变化的响应更为敏感。土壤粗颗粒有机碳的敏感性指数在残体与生物炭配施处理下最高,土壤细颗粒有机碳的敏感性指数在单施生物炭处理下最高,表明残体与其生物炭配施有利于增加土壤粗颗粒有机碳含量,单施生物炭有利于增加土壤细颗粒有机碳含量。

3　讨论

作物残体还田能够提高土壤有机质含量,补充土壤养分,改善土壤理化性质,但残体单独施入土壤后,由于其腐解速率较快,不利于土壤有机碳的长期固持,影响土壤的可持续发展。本研究中,单施残体在培养的前 21 d 为有机碳矿化快速期,其有机碳矿化速率及累积矿化率均最高,与添加根茬相比,添加秸秆其有机碳累积矿化率较高。这是因为与秸秆相比,根茬木质化程度高,较难腐解,尤其是小麦根茬,因此其有机碳累积矿化率较低。Puget 等对豆科绿肥中根碳和地上部碳短期动态变化进行研究,发现在生长季末期,近一半源于根的碳仍留在土壤中,然而仅有 13% 源于地上部的碳留存在土壤中[20]。本研究中,添加作物根茬对土壤总有机碳及颗粒有机碳的增加作用均大于添加秸秆,表明添加根茬更有利于增加土壤碳库储量,提升土壤肥力。

生物炭是一种稳定的有机物质,生命周期可达数百至数千年[21],生物炭的高度稳定性使其在增加土壤碳截留和碳库储量方面具有重要意义。本研究中,单施生物炭其有机碳累积矿化率最低。这是因为与秸秆相比,生物炭具有芳香族的多碳结构,易矿化的有机碳含量较低, 培养 4 d 后残留的有机碳比

表3 不同添加物处理土壤粗细颗粒有机碳含量及其敏感性指数

Table 3 The contents and sensitivity indices of CPOC and FPOC under different amendment treatments

处理 Treatment	粗颗粒有机碳 CPOC		细颗粒有机碳 FPOC	
	含量(g/kg) Content	敏感性指数(%) Sensitivity index	含量(g/kg) Content	敏感性指数(%) Sensitivity index
CK	0.96 + 0.03 c	0	4.12 ± 0.18 f	0
WR	1.12 ± 0.03 c	17.46	5.05 ± 0.39 de	22.49
WS	1.08 ± 0.02 c	12.88	4.18 ± 0.27 f	1.44
WB	1.30 ± 0.03 bc	35.19	6.13 ± 0.62 ab	48.85
MR	1.26 ± 0.02 bc	31.59	5.29 ± 0.18 cd	28.42
MS	1.14 ± 0.09 c	18.82	4.50 ± 0.14 ef	9.34
MB	1.51 ± 0.22 b	57.25	6.63 ± 0.68 a	60.92
WR + WB	2.00 ± 0.40 a	108.01	5.90 ± 0.14 bc	43.18
WS + WB	2.02 ± 0.34 a	110.44	5.29 ± 0.76 cd	28.21
MR + MB	1.56 ± 0.05 b	62.80	5.41 ± 0.01 cd	31.17
MS + MB	1.90 ± 0.25 a	98.89	5.36 ± 0.19 cd	29.98

注(Note): CPOC—Coarse particulate organic carbon; FPOC—Fine particulate organic carbon; WR—小麦根茬 Wheat root; WS—小麦秸秆 Wheat straw; WB—小麦生物炭 Wheat biochar; MR—玉米根茬 Maize root; MS—玉米秸秆 Maize straw; MB—玉米生物炭 Maize biochar. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments($P < 0.05$).

较稳定,难以被微生物腐解利用,因此其有机碳累积矿化率最低[22]。有研究表明,与不添加生物炭的土壤相比,添加生物炭能降低土壤 CO_2 的释放[23]。在本研究中,添加生物炭增加了土壤 CO_2 的释放量,这是因为一方面添加有机物料能为微生物活动繁殖提供能量来源,促进微生物活动繁殖,加快矿化作用;另一方面添加生物炭能够改变土壤的 pH 值,加快土壤的呼吸速率[24],也一定程度上增加了土壤 CO_2 的释放量;Bruun 等认为也可能是因为生物炭加入土壤后引起的激发效应导致土壤 CO_2 释放量的增加[25]。添加有机物料的各处理均不同程度提高了土壤 TOC 含量,且添加生物炭对土壤 TOC 含量的提升作用显著高于添加作物残体,这是因为一方面各有机物料加入到土壤中,不同程度地增加了土壤碳投入,因而增加了土壤 TOC 含量;另一方面生物炭本身以芳香环形式存在的碳含量很高,粉碎加入土壤中能显著提高土壤 TOC 含量,因此对于土壤中碳的长期固持很有潜力,而秸秆粉碎后加入土壤中只有分解到一定程度才能成为土壤有机质的组分,故添加生物炭所引起的土壤 TOC 含量的增加显著高于添加秸秆[26]。土壤颗粒有机碳作为土壤活性有机碳库的重要组成部分,对土壤团聚体形成和碳素循环与转化具有重要意义。近年来有关土壤有机碳的研究表明,颗粒有机碳既可作为有机碳长期变化的累积性指标[27],又能很好地反映土壤质量的变化[28],颗粒有机碳的形成对提高土壤碳库储量和减缓 CO_2 释放也具有重要意义[29]。与添加作物残体相比,添加生物炭对土壤颗粒有机碳的增加作用更为显著,是因为生物炭具有与土壤颗粒形成土壤团聚体和有机无机复合体的活性功能,生物炭一方面有利于土壤团聚体的形成和稳定,使其结构得到改善;另一方面受益于团聚体的物理保护作用,从而有利于碳长期固持形成颗粒有机碳,因此能够增加土壤颗粒有机碳的含量。与作物残体相比,生物炭更有利于土壤细颗粒有机碳含量的增加,可能是因为生物炭施入土壤后,其自身极细小的生物炭颗粒夹杂或吸附在土壤表面,从而引起土壤细颗粒有机碳含量的增加[30]。

残体与生物炭配施其有机碳累积矿化率介于残体和生物炭单施之间,不仅能为当季作物提供养分来源,生物炭的高度稳定性还使其对土壤养分的补充作用能够维持较长时间,有利于增加土壤碳库储

量,从而改善土壤质量,维持土壤的可持续发展。土壤微生物量碳是衡量土壤微生物活性的重要指标,不同添加物处理间土壤微生物量碳含量均表现为残体与生物炭配施 > 单施残体 > 单施生物炭,生物炭单独添加到土壤中,易矿化的有机碳增加较少,为微生物提供的能源物质较少,微生物活动较弱,因此微生物量碳含量较低,残体与生物炭配施加入土壤中,一方面,生物炭的分子结构表现出化学和微生物学的高度稳定性,这样的结构可以为土壤微生物提供良好的避难所[31];另一方面,作物残体降解产生的碳、氮组分为微生物提供物质和能量来源,促进微生物活动和繁殖,因此能够增加土壤微生物量碳含量[32]。作物残体与其生物炭配施更有利于土壤粗颗粒有机碳含量的增加,可能是因为配施处理为微生物活动繁殖提供能源和栖息场所,促进微生物的活动,加速土壤的团聚化作用形成粗颗粒有机碳。

4　结论

添加不同有机物料对土壤各组分有机碳含量及其自身有机碳矿化的影响存在一定差异。单独添加作物残体其有机碳累积矿化率最大,对土壤养分的补充作用较为明显,但会释放过多的 CO_2;单独添加生物炭显著增加了土壤总有机碳,其有机碳累积矿化率仅为 3% 左右,短期内对土壤养分的补充作用较小;作物残体与其生物炭配施显著增加了土壤微生物量碳和粗颗粒有机碳含量,且其有机碳累积矿化率介于生物炭和残体单施之间,在保证作物养分供应的同时能增加土壤碳库储量,可以有效克服秸秆和生物炭单独还田的弊端,对土壤肥力的综合提升效果更好。

参 考 文 献:

[1] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 张庆忠. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
Chen H X, Du Z L, Guo W, Zhang Q Z. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2930-2934.

[2] Yang X Y, Ren W D, Sun B H, Zhang S L. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. Geoderma, 2012, 177: 49-56.

[3] 龚伟, 颜晓元, 王景燕, 等. 长期施肥对小麦玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1245-1252.
Gong W, Yan X Y, Wang J Y *et al*. Effects of long-term fertilization on soil humus carbon and nitrogen fractions in a wheat-maize cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1245-1252.

[4] Haei M, Öquist M G, Ilstedt U *et al*. The influence of soil frost on the quality of dissolved organic carbon in a boreal forest soil: combining field and laboratory experiments[J]. Biogeochemistry, 2012, 107(1-3): 95-106.

[5] Xiao K, Zhou J, Liu X *et al*. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) as affected by plant residue composition and soil pH[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2013. 475-478.

[6] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123-130.

[7] Yan D, Wang D, Yang L. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(1): 93-101.

[8] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A *et al*. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1799-1806.

[9] Purakayastha T J, Rudrappa L, Singh D *et al*. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system[J]. Geoderma, 2008, 144 (1): 370-378.

[10] 马涛涛, 颜冬冬, 毛连纲, 等. 4 种熏蒸剂处理对土壤可溶性有机氮和微生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 159-164.
Ma T T, Yan D D, Mao L G *et al*. Effects of four fumigants on dissolved soil nitrogen transformation and microbial biomass[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 159-164.

[11] 肖新, 朱伟, 肖靓, 等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. 农业工程学报, 2013 29 (21): 91-98.
Xiao X, Zhu W, Xiao L *et al*. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 91-98.

[12] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619-1640.

[13] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3324-3333.

[14] Sohi S P, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. A review of biochar and its use and function in soil[J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 47-82.

[15] 蒙世协, 刘春岩, 郑循华, 等. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤-大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(4): 504-514.

Meng S X, Liu C Y, Zheng X H *et al*. Effects of the applied amount of wheat straw on methane, carbon dioxide, nitrous oxide, and nitric oxide fluxes of a bare soil in South Shanxi[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(4): 504-514.

[16] Streubel J D, Collins H P, Perez M G *et al*. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 75(4): 1402-1413.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 263-270.
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry (3rd Ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 263-270.

[18] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 孙宁. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226.
Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, Sun N. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 218-226.

[19] Banger K, Toor G S, Biswas A *et al*. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3), 391-399.

[20] Puget P, Drink L E. Short-term dynamics of root-and shoot-derived carbon from a leguminous green manure[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 771-779.

[21] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.

[22] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. 土壤与作物, 2012 1(4): 219-226.
Zhang Q F, Wang G H. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects as soil amendment[J]. Soil and Crop, 2012, 1(4): 219-226.

[23] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 胡锋. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570-575.
Kuang C T, Jiang C Y, Li Z P, Hu F. Effects of biochar amendments on soil organic carbon mineralization and microbial biomass in red paddy soils[J]. Soil, 2012, 44(4): 570-575.

[24] 范分良, 黄平容, 唐勇军, 等. 微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 932-937.
Fan F L, Huang P R, Tang Y J *et al*. Altered microbial communities change soil respiration rates and their temperature sensitivity[J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 932-937.

[25] Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H *et al*. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 73-79.

[26] 王娟, 张丽君, 姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 97-104.
Wang J, Zhang L J, Yao H Y. Effects of straw and black carbon addition on C-N transformation and microbial metabolism profile in paddy soil[J]. Chinese Journal of Rice Sci, 2013, 27(1): 97-104.

[27] 于建光, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 818-824.
Yu J G, Li H X, Chen X Y, Hu F. Efects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 818-824.

[28] Lou Y L, Wang J K, Liang W J. Impacts of 22-year organic and inorganic N managements on soil organic C fractions in a maize field, northeast China[J]. Catena, 2011, 87(3) 386-390.

[29] 李江涛, 张斌, 彭新华, 赖涛. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 912-917.
Li J T, Zhang B, Peng X H, Lai T. Effects of fertilization on particulate organic material formation and aggregates stability in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 912-917.

[30] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1948-1955.
Gao H Y, He X S, Chen X X *et al*. Effects of biochar and biochar-based ammonium nitriate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1948-1955.

[31] Christopher J A, Jean D F, Neil A H. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. Plant and Soil, 2010, 337: 1-18.

[32] Fernández J M, Nieto M, López-de-Sá E G *et al*. Carbon dioxide emissions from semi-arid soils amended with biochar alone or combined with mineral and organic fertilizers[J]. Science of the Total Environment, 2014, 482: 1-7.