

添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响^①

叶丽丽^{1,2}, 王翠红^{1*}, 周虎², 彭新华^{2*}

(1 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 本研究通过室内恒温恒湿控制试验, 研究添加黑炭、秸秆在分解过程中对土壤抗破碎性及团聚体稳定性等土壤生物、物理特征的影响。黑炭是在 400℃ 缺氧状态下水稻秸秆焚烧而制成的。实验包括不添加任何物料的对照 (CK)、添加黑炭 (BC)、黑炭+氮磷钾肥 (BC+NPK)、秸秆 (Straw)、秸秆+氮磷钾肥 (Straw+NPK) 等 5 个处理。研究结果表明, 经过 55 天恒温 (25℃) 恒湿 (田间持水量的 40%) 培养, 黑炭分解速度很慢, 通过换算, 其周转周期约为 1400 年, 而秸秆周转周期仅为 7 年, 配施氮磷钾能加速黑炭和秸秆的分解。添加黑炭没有提高土壤抗破碎能力和土壤团聚体稳定性 ($P>0.05$), 而秸秆则相反 ($P<0.05$)。该研究结果表明生物质黑炭不能像其他有机物料一样提高土壤微生物活性和土壤结构稳定性。

关键词: 生物质黑炭; 土壤呼吸速率; 抗破碎性; 团聚体稳定性

中图分类号: S156.6

生物质黑炭 (biochar, 简称 BC) 是生物质如木材、秸秆、稻壳等在缺氧条件下热解炭化产生的一类高度芳香化物质^[1]。近年来, 由于黑炭富含碳, 能将碳固定在土壤中达数百年甚至更长, 并能显著降低大气中温室气体含量^[2], 因此黑炭受到科学界的广泛关注, 并得到了深入研究。其中包括黑炭对土壤物理 (如土壤持水能力、导水率)^[3-4]、化学 (如 pH、CEC)^[5-7] 和生物 (如活化微生物、提高作物产量)^[8-11] 特征的影响。到目前为止, 许多学者对黑炭持肯定态度, 认为黑炭可以减缓全球 CO₂ 浓度上升和提高粮食安全, 达到双赢的目的^[2]。

中国红壤 (Ultisol) 其特征表现为酸、黏、板、瘦, 不利于作物生长。全国范围内, 红壤广泛分布在南方地区, 占地面积达 $1.29 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。由于受季风气候影响, 红壤区长年高温多雨, 加之不合理利用, 造成土壤有机质快速矿化, 土壤有机碳含量较低。因此, 添加生物质黑炭除了直接提高土壤有机碳水平外, 还可能利用黑炭偏碱性、疏松多孔的特征提高红壤 pH、土壤孔隙度等。本研究主要探究黑炭添加到红壤中, 其分解过程中对土壤结构稳定性的影响, 包括土壤结构机械稳定性和水稳定性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤: 0~20 cm 耕层土壤, 采自江西省鹰潭市余江县红壤生态试验站垦殖农场三分场 (116°55' E, 28°15' N) 的旱地。该土壤长年种植作物主要为花生。该区土壤为富铁土, 土壤母质为第四纪红黏土, 主要黏土矿物为高岭石。土壤基本理化性质: 砂粒 401 g/kg, 粉粒 275 g/kg, 黏粒 324 g/kg, 有机碳 12.1 g/kg, 全氮 0.70 g/kg 和 pH 3.95。

供试物料: 采自江西鹰潭红壤生态试验站试验田 2009 年中稻秸秆, 秸秆在 60℃ 下烘干, 粉碎并过 2 mm 筛, 秸秆含碳 (C) 388 g/kg, 氮 (N) 6.1 g/kg, 磷 (P) 0.85 g/kg 和钾 (K) 118 g/kg。将该秸秆在马弗炉缺氧状态下 400℃ 不充分燃烧 4 h 以制备黑炭, 其回收率为 33%, 该黑炭制作条件与 Kuzyakov 等^[12] 所采用的相似。黑炭的化学性质为有机碳 426 g/kg, 氮 (N) 7.7 g/kg, 磷 (P) 2.2 g/kg 和钾 (K) 267 g/kg。

1.2 试验设计

试验包括 5 个处理, 不添加任何物料的对照 (CK), 添加 1% 黑炭 (BC), 添加 1% 黑炭+氮磷钾肥 (BC+NPK), 添加 3% 秸秆 (Straw), 添加 3% 秸秆+氮磷钾肥 (Straw+NPK), 考虑到黑炭回收率为 33%, 黑炭用量为秸秆的三分之一。尿素 (N)、过磷酸钙 (P₂O₅)、氯化钾 (K₂O) 用量为 0.15、0.1、0.15 g/kg。物料按上述比例与过 6 mm 筛鲜土混匀。每个 50 ml 塑料瓶中添加混合土样 60 g, 体积质量 (容重) 为 1.2

①基金项目: 中国科学院“百人计划”项目资助。

* 通讯作者 (cuihongwang515@sina.com; xhpeng@issas.ac.cn)

作者简介: 叶丽丽 (1983—), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事生物质黑炭的生物物理学行为的研究。E-mail: yll.1380@yahoo.com.cn

g/cm³, 放入到 500 ml 广口玻璃瓶中密闭。根据鲁如坤^[13]主编的《土壤农业化学分析方法》, 发育于第四纪红黏土的红壤在田间持水量的 40% 左右土壤呼吸强度最适宜, 在 25℃ 恒温下培养微生物活性最强。我们采用这个水热条件进行培养实验, 以使微生物活性达到最适宜状态。培养期间, 土壤含水量变化用称量法计算, 微弱的蒸发导致水分损失部分通过加水补充, 同时测定土壤呼吸速率。另外, 填装环刀土样 (100 cm³), 体积质量为 1.2 g/cm³, 采样相同的培养条件, 用于分析土壤结构抗破碎性和团聚体水稳定性。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤呼吸速率 土壤呼吸速率测定采用碱液吸收法^[13]。分别在第 1、2、3、4、7、9、13、17、20、27、34、41、55 天取出 10 ml 0.3 mol/L NaOH 用 0.05 mol/L HCl 滴定, 测定土壤呼吸速率 (R)。根据黑炭 (或者秸秆) 呼吸速率与对照的差异, 来计算其分解速率。黑炭和秸秆分解速率的倒数, 就是其周转时间 (mean residence time, MRT)。其计算公式如下:

$$MRT_j = \frac{1}{R_j - R_{CK}} \quad (1)$$

式中, R_j 和 R_{CK} 分别表示秸秆 (或黑炭) 和对照 (CK) 的土壤呼吸速率。

1.3.2 土壤抗破碎性 抗破碎性测定采用 Dexter 和 Kroesbergen 方法^[14]。恒温恒湿培养样品分别在第 2、8、20、32、68 天取出, 在 40℃ 下烘至恒重, 然后从环刀中取出土样, 横放在材料试验机 (型号: CMT0104, 深圳市新三思计量技术有限公司) 平台上。压力运行模式为 1 mm/s, 每隔千分之一秒记录压力变化。其计算公式如下:

$$Y = \frac{2F}{\pi DL} \quad (2)$$

式中, Y 为土壤抗破碎强度 (Pa), F 是土壤开始破碎时的压力 (N), D 和 L 分别为土壤样品的直径 (m) 和长度 (m)。

1.3.3 土壤团聚体稳定性 破碎后的土壤过 6 mm 筛, 称取 10 g 土壤样品进行团聚体水稳定性分析。团聚体稳定性采用 Le^[15]方法中快速湿润法。团聚体稳定性用平均质量直径 (M_zWD) 表示:

$$MWD = \sum_1^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (3)$$

式中, r_i 为得到第 i 个粒级的平均孔径 (mm), 即筛分该粒级前后两个筛子孔径的均值; m_i 为第 i 个粒级团聚体质量百分比 (%); i 为 5 个不同粒级 (6~1、

1~0.5、0.5~0.125、0.125~0.053、<0.053 mm)。

2 结果分析

2.1 黑炭和秸秆的分解过程

2.1.1 添加不同物料对土壤呼吸速率的影响 如图 1 所示, 添加不同物料条件下, 土壤呼吸速率大小差异较大, 其大小关系为 Straw+NPK、Straw > BC+NPK、BC 和 CK。添加黑炭处理仅在培养期间前 2 天较 CK 处理土壤呼吸速率高。BC 处理增加范围在 0.77~0.32 mg/(g·a) 之间, 增加率 19%~22%, BC+NPK 处理增加范围为 8.5~16 mg/(g·a)。培养 2 天后, BC 和 BC+NPK 两个处理的呼吸速率基本与 CK 处理一致。添加黑炭在培养第二天可能产生一个微弱的“激发”效应, 促进微生物的活性, 土壤呼吸达到最高值, 但是, 从整个培养的 55 天来看, 添加黑炭没有明显提高土壤呼吸 ($P>0.05$)。相反, 添加秸秆处理显著地提高土壤呼吸 ($P<0.05$), 配施氮磷钾肥更加促进微生物活性。在 Straw 和 Straw+NPK 两个处理中, 在培养第 9 天有明显的“激发”效应。随后, 随着培养时间延长, 土壤有机质消耗, 呼吸速率降低。同时, 添加黑炭的处理呼吸强度远低于添加秸秆的处理。

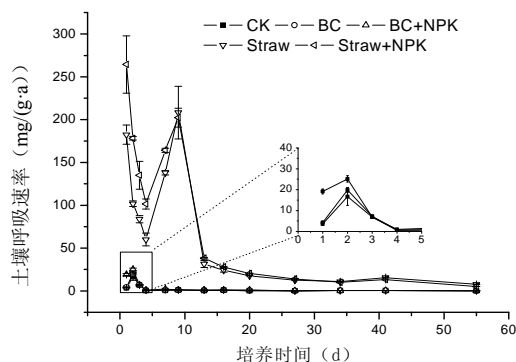


图 1 旱地土壤添加不同物料后土壤呼吸速率比较

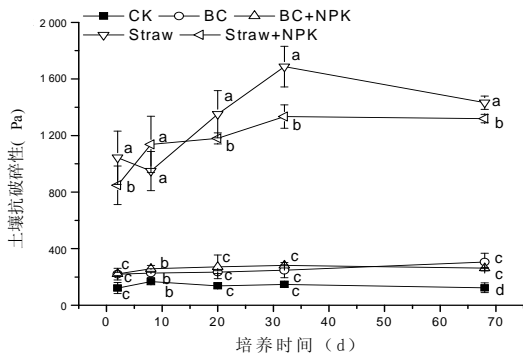
Fig. 1 Changes of soil respiration rate with incubation time for different soils amended with different organic materials

2.1.2 黑炭的周转速率 在 25℃、40% 田间持水量的条件下培养 55 天, CK、BC、BC+NPK、Straw、Straw+NPK 5 个处理平均呼吸速率分别为 3.46, 4.18, 6.28, 147 和 172 mg/(g·a)。根据公式 (1), 计算本试验黑炭的周转时间约为 1388 年, 添加氮磷钾肥后黑炭周转时间缩短到 355 年, 秸秆完全分解仅需 7 年, 添加氮磷钾肥后秸秆周转时间缩短了 1 年。如果在田间条件下, 水分和温度往往并不能达到最适宜的条件, 微生物活性将会大大下降, 因此, 黑炭和秸秆的周转时间将会

更长^[8,16]。

2.2 土壤抗破碎性

土壤抗破碎性是指土壤抵抗外力的强度，强度越大，土壤抗机械应力能力越大。从图 2 可见，Straw、Straw+NPK 处理的土壤抗破碎性随培养时间的增加呈上升趋势，在第 32 天后达到一个平衡。而 BC 和 BC+NPK、CK 处理随培养时间增加而变化不明显。添加不同物料对土壤抗破碎性影响程度差异很大，其抗破碎强度大小为 Straw、Straw+NPK > BC+NPK、BC 和 CK 处理。与 CK 处理相比，Straw 和 Straw+NPK 处理显著提高土壤机械稳定性 ($P < 0.05$)，增加了 830 ~ 1430 Pa，是 CK 处理的 2.8 ~ 5 倍；BC 和 BC+NPK 处理除第 68 天与 CK 处理有显著差异外 ($P < 0.05$)，没有增加土壤抗破碎性 ($P > 0.05$)。



(每个时间点列不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 的水平上差异显著，下同)

图 2 添加不同物料室内恒温培养土壤抗破碎性动态变化
Fig. 2 Changes of soil tensile strength with incubation time for different soils amended with different organic materials

2.3 团聚体水稳定性

图 3 显示添加不同物料土壤团聚体水稳定性动态变化。CK 处理随培养时间的增加，其团聚体稳定性呈下降趋势，MWD 值降低了 23%。而 BC、BC+NPK 和 Straw+NPK 处理，MWD 值则先升高后降低，培养到 66 天分别降低了 2%，9% 和 29%。仅添加秸秆处理其团聚体水稳定性呈波动状，没有明显规律。与 CK 处理相比，BC 和 BC+NPK 两个处理，其土壤团聚体稳定性下降了 12% ~ 36%。但是只有在培养的第 2 天 BC 和 BC+NPK 两个处理 MWD 均显著小于 CK 处理 ($P < 0.05$)，和第 32 天 BC+NPK 处理显著小于 CK 处理 ($P < 0.05$)，其他均无明显差异 ($P > 0.05$)。Straw 和 Straw+NPK 两个处理比 CK 处理的 MWD 高出 0.21 ~ 0.57 mm，增加率为 45% ~ 136% ($P < 0.05$)。由此可

见，秸秆有利于土壤团聚，而黑炭对土壤颗粒没有明显团聚作用，甚至表现为负面作用，不利于颗粒团聚。

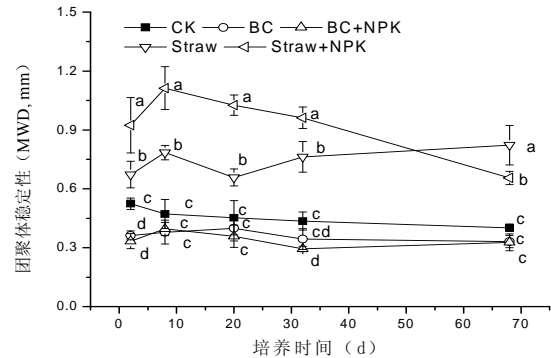


图 3 添加不同物料室内恒温培养土壤团聚体动态变化

Fig. 3 Changes of water stable aggregates with incubation time for different soils amended with different organic materials

3 讨论

在水热条件适宜的情况下培养 55 天来看，黑炭仅在培养前 2 天稍微提高了土壤微生物呼吸。这个结果与 Jeffrey 等^[17]报道一致，其报道称黑炭仅在前 6 天时间提高土壤呼吸速率。但是，从整个培养时期来看，黑炭与对照相比，没有显著提高微生物的活性 ($P > 0.05$)，而且一直维持在一个很低的水平。这与黑炭本身矿化速率很小有关。Ling 等^[18]也有类似报道称添加黑炭的土壤在 2 天后 CO_2 释放量急剧减少，2 周后达到 CO_2 释放量较低水平的平衡。黑炭对土壤微生物数量及活性的提高与土壤肥力有关^[19]。Simone 等^[20-23]报道在矿化速度大、碱解氮含量高、有效磷丰富的土壤中添加黑炭更有利于微生物的生长。而红壤由于肥力低下，微生物活性本身就比较低，因此在添加氮磷钾的条件下黑炭对进微生物活性的影响也不明显。而添加秸秆的处理在整个培养过程中都显著提高了土壤呼吸速率，其原因在于秸秆的施用增加了土壤微生物多样性及土壤酶活性^[24]。由此可见，黑炭对土壤微生物活性而言，其影响很小，并远远低于秸秆。

由于黑炭芳香化程度高，分解非常缓慢，因此被认为是提高土壤固碳的一种途径^[7]。在 25℃、田间持水量 40% 的条件下培养，黑炭的周转时间约 1 400 左右年。Kuzyakov 等^[12]利用同位素示踪技术，同时在培养过程中添加了葡萄糖激发微生物活性，计算黑炭周转时间为 200 年左右，是本试验仅添加黑炭的 1/7 周转时间，是添加氮源后的黑炭周转时间的 56%。本试验中配施氮磷钾化肥的处理，黑炭和秸秆的周转时间

略缩短, 由此说明化肥的施入能够加速黑炭的腐解速率。而秸秆的周转周期仅 7 年, 可见秸秆增加土壤有机质是短期的, 而黑炭在土壤中能长期存在, 对土壤固碳有长期效益。影响黑炭的周转周期因素包括内和外因素。内在因素主要包括黑炭的有机物料的来源、制备过程、温度、时间、颗粒大小等; 外在因素可能有土壤干湿交替、冻融交替, 及土壤中微生物种类、活性和施肥等。在野外田间条件下, 这些因素会影响微生物的活性和黑炭的分解速率, 从而影响其周转时间。另外我们还需要指出的, 公式(1)只是对黑炭周转时间一个大概的推算, 没有考虑黑炭和土壤自身有机质的交互作用。如果需要推算黑炭较精确的周转时间, 还需要同位素标记等方法来验证。

黑炭具有疏松多孔的结构, 许多报道施用黑炭的土壤总孔隙增加, 从而降低土壤体积质量^[3], 有利于水分下渗、提高土壤水分涵养能力^[25]。我们研究土壤抗破碎强度和团聚体水稳定性, 主要探讨黑炭添加对土壤机械稳定性和水稳定性的影响。研究表明黑炭添加到红壤中不能提高土壤抗破碎能力和土壤团聚体稳定性 ($P>0.05$), 甚至在培养初期还降低了团聚体稳定性, 而秸秆则能显著稳定土壤结构 ($P<0.05$)。主要原因是黑炭分解小, 同时分解过程中自身可能不会产生黏液团聚颗粒。由此可见, 黑炭并不能像其他有机物料那样提高土壤结构稳定性。如此一来, 添加黑炭提高了土壤水分含量, 降低了土壤黏结力, 造成土壤易于分散, 可能加剧水土流失的风险。因此, 在实际生产中, 特别是在降雨强度较大的红壤丘陵岗地地区, 黑炭虽然能提高红壤 pH 和作物生长^[26], 但是其综合效应还需进一步的研究。

4 结论

通过室内培养实验发现, 黑炭周转时间很慢, 达千年以上。黑炭在分解过程中不能提高土壤结构稳定性和微生物活性。黑炭在生产实际中的应用中, 还需要大量的工作来对其进行综合评价。

参考文献:

- [1] Antal MJ, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42: 1 619-1 640
- [2] Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*, 2007, 447: 143-144
- [3] Oguntunde PG, Abiodun BJ, Ajayi AE, van de Giesen N. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 591-596
- [4] Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangauthor K, Homma K, Kiyono Y, Inoue Y, Shiraiwa T, Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos. I. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 2009, 111: 81-84
- [5] Oguntunde PG, Fosu M, Ajayi AE, Van De Giesen ND. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39: 295-299
- [6] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizao FJ, Petersen J, Neves EG. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70:1 719-1 730
- [7] Lehmann J, Jose Pereira da Silva Jr, Christoph Steiner, Steine C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal Amendments. *Plant and Soil*, 2003, 249: 343-357
- [8] Preston CM, Schmidt MWI. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. *Biogeosciences*, 2006, 3: 397-420
- [9] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1 301-1 310
- [10] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, De Macêdo JLV, Blum WEH, Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 2007, 291: 275-290
- [11] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327: 235-246
- [12] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen HQ, Bogomolova I, Xu X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 210-219
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 2000: 238-240
- [14] Dexter AR, Kroesbergen. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1985, 31: 139-147
- [15] Le BY. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil*

- Science, 1996, 47: 425–437
- [16] Masiello CA. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 2004, 92: 201–213
- [17] Jeffrey LS, Harold PC, Vanessa LB. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010: 1–3
- [18] Ling BQ, Lehmann J, Solomon D, Sohi S, Thies JE, Shjemstad JO, Luizao FJ, Engelhard MH, Neves EG, Wirick S. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 6 069–6 078
- [19] Novak JM, Busscher WJ, Watts DW, Laird DA, Ahmedna MA, Niandou MAS. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typical Kandiuult. *Geoderma*, 2010, 154: 281–288
- [20] Simone EK, Kevin JF, Mathew ED. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. *Soil science society of America*, 2008, 73: 1 173–1 181
- [21] Barrett J, Burke IC. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1 707–1 716
- [22] Perakis SS, Hedin LO. Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old-growth temperate forest, southern Chile. *Ecology*, 2001, 82: 2 245–2 260
- [23] Vance ED, Chapin IFS. Substrate limitations to microbial activity in taiga forest floors. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 173–188
- [24] 刘建国, 卞新民, 李彦斌, 张伟. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1 027–1 032
- [25] David AL, Pierce F, Dedrick DD, Horton R, Wang B, Karlen DL. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 2010, 158: 443–449
- [26] Peng XH, Ye LL, Wang CH, Zhou H, Sun B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112: 159–166

Effects of Rice Straw-derived Biochar Addition on Soil Structure Stability of an Ultisol

YE Li-li^{1,2}, WANG Cui-hong¹, ZHOU Hu², PENG Xing-hua²

(1 College of Resources and Environment, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: By laboratory experiment under controlled temperature and humidity, the effect of addition of biochar and straw were studied on soil biological and physical properties, such as soil crush resistance and soil aggregate stability. Rice straw-derived biochars were obtained under 400°C charring and with 4 h duration. Five different amendment combinations were selected, i.e., control (CK), 1% biochar (BC), 1% biochar + NPK (BC+NPK), straw, and straw + NPK. The results showed that the decomposition rate of biochar was very slow, and the mean residence time (MRT) of biochar was about 1 400 years by calculation but only 7 years for straw. The decomposition rate could be accelerated by chemical fertilizer, which was proved after 55 d incubation with 25°C temperature and 40% field moisture capacity. However, Biochar could not improve soil tensile strength and soil aggregate stability ($P>0.05$), which indicated that biomass biochar can't improve microbial activity and the stabilization of soil structure as the other organic matters.

Key words: Biomass biochar, Soil respiration, Soil tensile strength, Soil aggregate stability