

生物质炭对农田土壤有机碳及其矿化影响的研究进展

张洪培^{1,2}, 李秀云¹, 沈玉芳^{1,2}, 李世清²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤有机碳在生物圈物质循环中起着重要作用, 有机碳矿化将显著影响大气 CO₂ 的浓度, 关系到养分的释放。近年来, 生物质炭农用的土壤生态系统固碳减排功能方面的研究受到广泛关注。但由于研究中所采取的具体方法和研究对象等差异, 目前研究的结果仍然存在争议。本文主要从试验材料、试验条件和驱动因子等角度综述生物质炭对土壤有机碳含量及矿化影响, 并阐述进一步研究值得探索的方向, 以客观评价生物质炭的农田固碳减排效应。

关键词 生物质炭; 有机碳; 碳矿化; 固碳减排

中图分类号 S153.6

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)04-0459-10

在全球气候变化中, 土壤碳所起的作用实际上是有机碳的生物地球化学循环对气候变化的控制作用, 土壤中有机碳含量的变化, 能够对全球生态系统产生潜在的巨大影响^[1], 其动态变化已成为近年的研究热点^[2]。土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程之一, 直接关系到养分的释放以及土壤质量的保持等, 同时影响到温室气体的产生^[3]。农田土壤有机碳矿化释放的 CO₂ 在大气中存留寿命为 5~200 a, 对气候变化的影响尤其引人关注^[4]。

生物质炭(Biochar)是生物质残体在缺氧或低氧环境中经热裂解生成的固体产物, 具高度的芳香化、物理的热稳定性、较高的抵抗生物和非生物降解的能力, 能够长期稳定地封存于土壤中^[5]。近年来, 生物质炭的农田生态系统效应研究受到越来越多的研究者关注^[6]。国际生物质炭协会(IBC)通过综合分析也指出, 生物质炭施加到土壤中具有较高的农业应用价值和环境效益^[7], 甚至可以逆转气候变暖的趋势^[8]。为此, 本文围绕生物质炭对土壤有机碳含量、碳矿化效应及可能的机制进行阐述, 并阐述值得探索的进一步研究的方向。

1 生物质炭的特性

生物质炭一般情况下含碳元素 60% 以上, 还包括氢、氧、氮、钾、钠、钙、硅等元素; 随着炭化温度升高, 所制备的生物质炭中含碳量呈增加趋势, 而其中氢和氧的含量反而降低。生物质炭理化性质受制备材料、制备温度和制备时间等的影响^[9-11], 还与植物生长地的土壤类型、植物种类有关。

1.1 制备原料对生物质炭特性的影响

生物质炭的原材料能够在较大程度影响生物质炭的化学组成和理化性质。通常动物粪便和固体废弃物的生物质炭产率要大于作物秸秆和木质生物质材料^[12], 这主要是由于动物粪便和固体废物含有大量的无机组分, 因而制备成生物质炭之后他们的灰分含量也高于秸秆和木质生物质炭。如表 1 所示, 300 °C 加热时间为 1 h 条件下, 猪粪和牛粪与玉米秸秆相比, 前者的 pH、C/N 比后者的低, 而含氮量和灰分含量却相反^[11, 13-14]。制备温度同样为 300 °C 时, 木薯茎生物质炭, pH 和 C/N 比最高, 而小麦秸秆生物质炭的 pH 较低, 有机碳最高^[15-16]。同样制备条件下, 木本植物生物

收稿日期:2016-03-25 修回日期:2016-07-01

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(YQ2013009);国家自然科学基金(51279197, 50809068);杨凌示范区科技计划(2014NY-30)。

第一作者:张洪培,女,硕士生,研究方向为农田温室气体排放及氮效应。E-mail:hpzhp1991@163.com

通信作者:沈玉芳,女,博士,副研究员,研究方向为旱作农田生态系统水分养分动态过程及其环境效应。E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn

质炭具有较低的 pH、灰分含量和较高的含碳量,如玉米秸秆和小麦秸秆生物质炭的 pH 较高,但 C/N 比却低于用道格拉斯冷杉制备的生物质炭(650 °C 下)^[14,16-17]。研究发现,与一般生物质炭碱性不同,刺槐生物质炭 pH 仅为 6.4,同油松混合制备的生物质炭 pH 增加为 8.38^[18],总有机碳含量也大幅度提高到 66.67%^[19]。将牛粪添加秸秆后制成的生物质炭,在性质上也有较大的差异,pH 从 8.0 提升至 10.1,灰分含量从 20.2% 增加到 38.3%,氮含量增加至 0.3%,但是碳含量和 C/N 比有所降低^[13]。因此可以得出,不同原材料以及不同原材料混合条件的改变对生物炭元素的组成及环境效应均会产生显著影响。

1.2 制备温度对生物质炭特性的影响

生物质炭的特性与炭化温度密切相关^[11]。在限制供氧量的条件下,随着炭化温度的升高,植物生物质炭的 pH、电导率、比表面积、孔体积、芳香碳含量、灰分含量等增加,氢和氧含量降低。同样用玉米秸秆作为炭化 1 h,随制备温度从 300 °C 升高到 1 200 °C^[14,20-22],生物质炭中的有机酸热解并不断生成灰分,导致生物质炭的 pH 也随之增大^[23],1 200 °C 制备生物质炭的 pH 达 11.6。而总有机碳含量却不是温度越高越好,研究发现,在 550 °C 条件下,玉米秸秆生物质炭中总有机碳含量和 C/N 比最高^[20],另外玉米秸秆生物质炭总氮含量与制备温度并无线性关系。一般来说,随裂解温度升高,比表面积增加。Keiluweit 等^[24]发现将制备木炭的温度从 200 °C 增加到 700 °C,比表面积从 $2.3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $247 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。Chun 等^[25]研究也发现,300 °C 小麦秸秆炭的比表面积为 $116 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,700 °C 下增加到 $363 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Bruun 等^[26]开展不同裂解条件下小麦秸秆制备的生物质炭的实验室短期培养试验,结果发现,随着裂解温度的升高生物质炭中的纤维素和半纤维素含量逐渐降低,生物质炭的矿化率也随之减小。Nguyen 等^[4]利用定量核磁共振分析 350~600 °C 条件下制得的玉米秸秆生物质炭的稳定性,结果发现,生物质炭的芳香化程度随着制备温度的上升也从 83% 上升到 90%,检测发现其炭层的发展排列变得更加有序。对于畜禽粪便生物质炭,高温裂解制备的生物质炭同样比低温条件下制备的稳定性高。500 °C 下制备的牛粪生物质炭的碳含量为 300 °C 下制备的生物质炭中碳含

量的约 1/4,C/N 比也仅为 1/3^[13];而 300 °C 低温制备的猪粪生物质炭与 500 °C 下制备的生物质炭相比,有较高的土壤阳离子交换量(CEC),可以有效降低营养盐和 pH。总之,生物质炭制备温度对生物质炭特性有显著影响,高温制备的生物质炭具有更丰富的孔隙结构、比表面积,芳香化程度和稳定性、pH 也会增加;而低温条件下制备的生物质炭,却具有较高度度的疏水性,其电导率、芳香碳含量、灰分含量也较高,比高温制备的生物质炭有更高的金属元素有效性^[11]。

2 生物质炭对土壤有机碳含量及其稳定性的影响

2.1 不同原材料生物质炭对土壤有机碳含量及其稳定性的影响

生物质炭含碳 40%~75%,施入土壤能够提高土壤有机碳含量,且土壤有机碳量随着生物质炭施用量的增加而增加^[27-28]。研究发现,生物质炭能够显著($P < 0.05$)降低溶解在土壤中的有机碳(DOC)含量^[21],减弱 DOC 淋溶^[29],这可能主要是由于生物质炭的吸附作用,表明添加生物质炭有利于在短期内土壤有机碳的积累。周桂玉等^[30]研究发现添加 2% 生物质炭 45 d 后使草甸黑土土壤总有机质的含量从 1.62% 增加到 2.92%,同时胡敏酸的色调系数($\Delta \lg K$)降低。

韩玮等^[31]将生物质炭施入水稻土 2 a 后发现,水稻土有机碳的增加总量占投入碳总量的 86.02%~91.77%,同时秸秆还田条件下,该比例仅为 24.88%,这说明炭化的植物残体更有助于土壤碳的增加和长期稳定性。且随着生物质炭用量的增加,腐植酸等活性较高组分(包括胡敏酸和富里酸)的比例逐渐下降,而残留的黑碳和胡敏素等稳定有机物质显著增加^[32]。但花莉等^[33]试验结果却是添加不同量玉米秸秆炭后,黄土的活性有机质质量分数均增加。这可能受不同来源生物质炭芳香化程度和热稳定性差异性的影响。尚杰等^[34]研究发现,在石灰性土壤(黄土母质)中施用果树枝条制成的生物质炭,显著提高土壤总有机碳和微生物碳含量。Domene 等^[35]研究同样发现,秸秆生物质炭对土壤微生物量有促进作用。但 Dempster 等^[36]研究发现,添加木质生物质炭反而会减低土壤微生物碳含量。李明等^[37]的研究结果则表明,添加水稻和玉米制备的生物质炭培养 135 d 后,土壤微生物碳含量受制备温度的

表 1 生物质炭的种类及特性
Table 1 Types and characteristics of biochar

生物质炭 Biochar	温度/°C Temperature	时间/h Time	pH	灰分/% Ash	C/%	N/%	C/N	参考文献 Reference
玉米秸秆 <i>Zea mays</i>	300	1.0	9.8	16.3	48.9	1.3	39.1	[14]
	350	—	—	9.8	63.5	0.7	89.4	[20]
	450	1.0	10.5	22.3	53.8	1.2	44.1	[14]
	500	1.5	10.1	—	63.9	—	—	[21]
	550	—	—	11.5	71.8	0.8	94.5	[20]
	600	1.0	11.4	27.2	62.9	1.3	49.1	[14]
	1 200	0.7	11.6	39.3	56.1	1.4	42.9	[22]
小麦秸秆 <i>Triticum aestivum</i>	300	4.0	6.9	—	64.3	—	—	[16]
	600	4.0	9.6	—	70.2	—	—	[16]
水稻壳 <i>Oryza sativa</i>	300	12.0	7.5	—	22.6	1.2	18.0	[15]
木薯茎 <i>Manihot</i>	300	12.0	9.8	—	35.0	0.09	389.0	[15]
柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i>	250	—	6.4	26.0	55.3	0.4	128.0	[38]
松木屑 <i>Pinus</i> ssp	400	—	7.8	—	75.9	0.5	140.8	[39]
聚合果属木质材料 <i>Conocarpus erectus</i>	400	2.5	9.7	—	76.8	0.9	88.3	[40]
柳枝木 <i>Eucalyptus saligna</i>	450	0.67	9.8	—	66.8	1.0	64.2	[41]
蓝色小桉树 <i>Eucalyptus globulus</i> Labill	500	—	9.6	—	54.9	1.4	39.5	[8]
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn.	550	0.5~0.7	6.4	—	8.9	—	—	[18]
油松刺槐混交林 <i>Pinus tabulaeformis</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn.	600	2.0	8.4	12.5	66.7	2.2	30.2	[19]
道格拉斯冷杉 <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	650	—	10.1	—	85.0	0.2	568.0	[17]
猪粪 Pig manure	300	1.0	8.6	31.7	44.6	3.6	12.4	[11]
	500	1.0	10.4	44.7	40.5	2.7	15.0	[11]
牛粪 Cow manure	300	1.0	8.0	20.2	3.5	0.2	18.4	[13]
	500	1.0	10.2	43.7	0.8	0.1	6.2	[13]
牛粪和秸秆 Cow manure and straw	300	1.0	10.1	38.3	2.1	0.3	7.5	[13]
	500	1.0	10.1	51.3	0.5	0.1	3.4	[13]
鸡粪和锯末 Chicken manure and sawdust	300	1.0	10.6	34.6	0.4	0.1	3.3	[13]
	500	1.0	10.3	36.0	0.2	0.1	1.7	[13]

影响。由此可见,不同原材料的生物质炭因其不同的性质,而对土壤有机碳含量影响不同,比如秸秆生物质炭的芳香化和稳定性较低,商业黑炭缩合程度和热稳定性较高,松枝类生物质炭则介于二者之间^[30],各类型生物质炭施入土壤后均能增加土壤有机碳含量,对土壤微生物碳含量影响趋势却不相同。

2.2 不同温度制备生物质炭对土壤有机碳含量及其稳定性的影响

韩玮等^[31]向中层砂浆水稻土(pH为7.6)中添加等量(6 t·hm⁻²)玉米秸秆和300、400、500℃温度下制备的生物质炭,种植2 a水稻和冬小

麦后测定轻重组有机碳和微生物量碳,发现生物质炭和秸秆都能在一定程度上增加土壤微生物碳,添加秸秆的处理微生物碳含量最高,生物质炭处理土壤微生物碳提高,不同温度间差异不显著;对土壤轻组有机碳含量的影响也表现随生物质炭裂解温度的升高而增加,500℃生物质炭处理含量最高,且发现总有机碳含量与轻组有机碳含量之间显著正相关。这同管天玉^[42]的研究结果相一致。李明等^[37]向红色黏土(pH为5.32)中分别添加300、400和500℃制备的水稻和玉米秸秆生物质炭,培养135 d,测定发现300℃下制备的2种生物质炭对微生物碳含量没有显著影响,

500 °C 下制备的 2 种生物质炭对其影响却达到显著水平,可能是由于高温制备的生物质炭具有更好地改良土壤理化性质的效应^[43]。而 Maestrini 等^[44]利用同位素标记手段,在培养 158 d 后测定发现,仅有 0.4% 的生物质炭组分在微生物体中被鉴定。因此得知,随着生物质炭制备温度的升高,土壤有机碳含量有所提高,土壤微生物碳含量和轻组有机碳含量也会有所增加。生物质炭可能通过改变土壤的理化性质,对土壤微生物产生间接的影响,但具体的影响机制还需要进一步研究^[45]。

3 生物质炭对土壤有机碳矿化的影响及激发机制

在农田生态系统中,土壤有机碳积累水平主要依赖于输入(如田间作物残体和外源有机物料添加等)与输出(土壤原有有机质分解)之间的平衡,即土壤中有机的腐殖化与矿化之间的平衡^[46]。已有研究认为生物质炭比较稳定,其本身碳的残留时间可超过千年。但尽管它具有较强的稳定性,在自然界中生物质炭仍可与土壤原有有机质间产生相互作用^[28],存在一定激发效应^[47]。生物质炭作为外源有机物料添加到土壤以后,能够通过改变土壤中有有机质腐质化、稳定性和呼吸速率等,产生正或负激发效应,提高或抑制土壤有机碳的分解,从而加速或减少土壤炭的分解释放^[48-50],如表 2 所示,向土壤中添加生物质炭,对土壤原有有机碳产生正激发效应或负激发效应,目前研究结论尚不一致,不同的生物质炭性质、试验土壤条件、试验周期等均会影响施用生物质炭以后土壤有机碳的矿化行为。

3.1 生物质炭特性的影响

Liang 等^[51]通过培养试验发现,生物质炭添加量越高,土壤 CO₂ 释放量反而越少。Purakayastha 等^[52]研究也表明,施加玉米秸秆和小麦秸秆生物质炭,可以抑制土壤自身有机碳的降解。Sigua 等^[38]用柳枝稷为原料,分别在 250 °C 和 500 °C 温度下制作生物质炭,添加到典型的高岭湿润老成土(红壤, pH 为 5.6)中进行培养后,发现与柳枝稷直接还田相比,生物质炭处理减少 CO₂ 累积排放量和排放速率;与 250 °C 的生物质炭相比,500 °C 的生物质炭更低,说明生物质炭能够降低红壤的碳矿化,高温制备的生物质炭比低温制备的抑制效果更好。Ameloot 等^[53]发现

350 °C 制备的猪粪生物质炭处理增加 CO₂ 排放量,而 700 °C 生物质炭处理 CO₂ 排放量与对照处理无显著差异;高温热解炭有利于多聚环芳香结构更稳定,不易发生碳的矿化和分解等。Zhao 等^[54]比较新制备的生物质炭和放置一段时间(在密闭黑暗中放置 4 个月和 10 a)后的生物质炭的矿化,发现新制备的生物质炭和放置 4 个月的生物质炭可促进贫瘠土壤短时间内的碳矿化,而放置 10 a 的生物质炭则没有影响。因此可以看出,新制备的生物质炭本身含有可以矿化的易分解碳,施入土壤能被微生物分解利用,提高土壤肥力。

3.2 试验周期的影响

Weng 等^[41]在暗红色铁铝土中添加柳枝木生物质炭(450 °C, 40 min, 3%),种植黑麦草,利用同位素¹³C 进行为期 388 d 的实地研究,试验发现,施入生物质炭后,前期阶段(0~62 d),促进 CO₂ 的排放,表现为正激发效应,从第 62 天以后到培养结束,表现为负激发效应,说明生物质炭施入土壤后的培养周期对碳矿化有重要影响。Zhao 等^[54]在 42 d 的短期培养试验中土样发现生物质炭促进土壤有机碳矿化。Luo 等^[55]在英国洛桑试验站旱地土壤的试验结果也表明添加生物质炭初期会促进农田 CO₂ 排放。生物质炭含有的部分可溶性有机碳,分解较快,在培养前期就能被微生物分解利用应该是增加矿化排放的主要原因^[56]。Bruun 等^[57]认为,生物质炭本身还会含有部分碳酸盐,它们可以在生物和非生物作用下很快发生分解释放 CO₂。因此,试验时间的长短对土壤有机碳矿化也会有明显影响,生物质炭添加到土壤中的正激发效应会随着时间的延续逐渐减弱,田间施加生物质炭 4 a 后,土壤有机碳的矿化速率则会显著降低^[58],表现为负激发效应。

3.3 土壤原有性质的影响

Naisse 等^[59]将生物质炭(550 °C)分别添加到森林土壤和草原土壤,培养 336 d 后发现,生物质炭添加到森林土壤中引起很小的正激发效应,而在草原土壤中则引起超过生物降解的负激发效应。说明激发效应可能与土壤中原有有机碳含量等土壤性质有关。在评定生物质炭对土壤碳的影响时,应当考虑土壤参数。Lu 等^[21]也发现,生物质炭对碳的激发效应与土壤微生物和土壤原有有机质有关。Knoblauch 等^[60]研究也表明,向沼泽土添加生物质炭以后提高碳矿化率,而向草地中添加生物质炭对碳矿化率并无明显影响。

Ahmed 等^[40]研究发现,向钙质砂质土壤中添加聚合果属木质废弃物生物质炭,与家禽粪便还田和植物废弃物还田相比,生物质炭的添加,CO₂的排放量微不足道。但胡云飞等^[61]向黄棕壤中添加茶树枝条制作的生物质炭后,与未添加生物质炭的土壤相比,土壤碳矿化明显增强。Keith 等^[8]用同位素标记方法研究生物质炭对 3 种土壤(红砂土、始成土和铁铝土)根际激发效应的影响结果发现,将 500 °C 下制备的蓝色小桉树生物质炭添加到土壤后,种植植物处理的土壤总呼吸速率明显高于无植物种植的对照处理;在红砂土中,

有无生物质炭都会产生负的根际激发效应;在始成土中,生物质炭增加负的根际激发效应;而在铁铝土中,生物质炭较小程度影响根际碳矿化。由此得出,生物质炭对土壤有机碳矿化的影响与土壤原有性质有关,但与之相关的土壤因素还未明确,土壤原有有机碳含量与生物质炭用量的比率,对土壤有机碳矿化的影响情况仍未系统的研究结果,其影响的具体途径尚不明确,生物质炭带入土壤的可溶性物质或大分子物质对土壤环境的影响也未报道,这些都需要进一步的研究与探索。

表 2 生物质炭和土壤对有机碳矿化的影响

Table 2 Effects of biomass carbon and soil on mineralization of organic carbon

生物质炭 Biochar	生物质炭 Biochar				土壤 Soil					碳矿化 Carbon mineralization	参考文献 Reference				
	温度/°C Temperature	pH	C/%	N/%	C/N	土壤 Soil	培养周期/d Training period	C/%	N/%			CEC/ (mmol· kg ⁻¹)	pH	C/N	
玉米秸秆 <i>Zea mays</i>	450	—	52.1	—	20.0	粉砂壤土 Silt loam	180	0.8	—	9	7.1	10.6	降低 Decreased	[62]	
	500	10.1	63.9	0.9	72.0	砂壤土 Sandy loam	30	0.7	0.08	—	7.6	8.7	降低 Decreased	[63]	
	600	11.4	62.9	1.3	49.1	潮土 Fluvo-aquic soil	90	0.9	0.06	—	8.3	14.3	降低 Decreased	[14]	
蓝色小桉树 <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	500	9.6	54.9	1.4	39.5	红砂壤 Arenosol	37	1.8	0.2	25	6.4	10.6	降低 Decreased	[8]	
						始成土 Cambisol	37	2.6	0.3	85.7	7.1	10.4	显著降低 Significantly decreased	[8]	
						铁铝土 Ferralsol	37	4.4	0.5	49.6	5.9	9.3	小程度降低 Small decreased	[8]	
柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i>	250	6.4	55.3	0.43	128.0								高温裂解炭比低温裂解炭减碳效果 High temperature pyrolysis than low temperature pyrolysis carbon reduction effect is good	[38]	
	500	9.2	84.4	0.34	248.0	高岭土 Kaolinitic	50	—	—	1.5	5.4			[38]	
柳按木 <i>Eucalyptus saligna</i>	450	9.8	66.8	1.0	64.2	暗红色铁铝土 Rhodic ferralsol	388	4.5	—	—	4.5			前期增加后期降低 Early increased and later decreased	[41]
植物残体 Plant residue	550	—	59.6	2.3	27.1	森林土 Forest	336	7.5	0.4	15.8	4.9	19.0	很小的正激发效应 Little priming effect	[59]	
						草原土 Grassland		11.4	1.0	28.8	4.1	11.0	负激发效应 Negative priming effect	[59]	
茶树枝 <i>Camellia sinensis</i>	350	9.2	67.5	2.7	25.0	黄棕壤 Yellow brown soil	110	1.9	0.1	182.8	4.3	17.8	增加 Increased	[61]	
猪粪 Pig manure	350	10.1	39.7	2.2	18.4	砂壤土 Sandy loam	117	0.7	0.06	—	6.4	11.6	增加 Increased	[53]	
	500	11.6	35.6	1.0	34.5								无明显变化 No significant effect	[53]	

4 生物质炭对中国农田土壤的固碳减排前景

随着全球气候变化,中国越来越重视温室气体减排的重要性,同时中国面临很大的压力。Metting 等^[64]利用 DNDC 模型计算中国农业土壤碳库的变化,发现中国农业土壤有机碳库以每年 7.38×10^{13} g(按碳计算)的速度在消减,而美国则以每年 7.24×10^{13} g(按碳计算)的速度递增。高鹏飞等^[65]利用 MARKAL-MACRO 模型对 2010—2050 年中国的碳边际减排成本进行系

统的研究,结果表明:当温室气体减排率在 0~45% 时,碳边际减排成本在 0~250 美元·t⁻¹,这说明中国未来 CO₂ 减排成本是相当高的。面对 2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放量比 2005 年下降 40%~45% 的承诺,中国发展低碳经济迫在眉睫。

农业生态系统具有巨大的固碳减排潜力。研究表明,全球农业温室气体减排的总潜力按照 CO₂ 计算每年高达 7.30×10^{15} g^[66]。Lehmann^[67]认为,应用生物质炭技术在社会经济上的潜在可行增汇量可达到 9.50×10^{15} g。中国是世界上农业废弃物产出量最大的国家,每年农田

秸秆年总产量达 7 亿 t^[68],露天焚烧或腐烂处理,会造成可利用资源的浪费和对生态环境的污染。生物质炭制备和还田技术为秸秆有效利用、农田的固碳减排以及生态系统功能改善提供一条新途径。如果每年能够裂解碳化 7 亿 t 农林废弃有机物质,这相当于从大气中吸收 10.22 亿 t CO₂^[69],理论上可减少国家总体排放约 13.8% 的 CO₂。仅 1996 年到 2013 年间,焚烧中国 3 种主要粮食作物(水稻、小麦、玉米)的秸秆约相当于燃烧 7.4 亿 t 标准煤量。生物质炭的固碳效应还体现在通过增加生物量生产和减少肥料施用方面。生物生物质炭可以增加作物生物量,增加作物对大气 CO₂ 的固定和向土壤有机碳的输入;同时生物质炭可以代替或减少肥料的使用,减少化肥生产、运输和施用过程中能源消耗引起的碳排放。研究表明,每施用 1 t 生物质炭可以减少 0.18 t 碳因氮肥施用产生的温室气体排放^[7]。因此,中国农田废弃资源的生物质炭化利用的固碳潜力巨大。

5 总结与展望

生物质炭具有丰富的碳含量和高度的稳定性,添加到土壤中可以增加土壤碳含量且能够切实降低碳排放效应。因此,在中国应用生物质炭固碳减排具有广阔的前景。但目前生物质炭研究还处于起步阶段,仍有诸多问题亟待进一步加强研究。

生物质炭制备方面。截至目前,国际上仍没有统一的标准,如温度的控制、保护气的选择、原材料的选择等方面;应加强生物质炭制备条件与生物质炭特性之间关系研究,以实现通过不同性质的原材料和制备条件组合得到目标需求的生物质炭。

生物质炭的农田土壤碳效应方面。国内外研究者针对生物质炭的稳定性及其对土壤碳库效应方面已经开展大量研究并取得一些进展,但目前对生物质炭在土壤中的稳定性和土壤有机碳影响的研究结果较多来源于短期试验,且不同研究结果之间尚存在争议。而与之相关的土壤因素还没有明确,土壤原有有机碳含量与生物质炭用量的比率,对土壤有机碳矿化的影响情况仍没有系统的研究结果,其影响的具体途径尚不明确,生物质炭带入土壤的可溶性物质或大分子物质对土壤环境的影响也没有报道,这些都需要进一步的研究与探索。因此,应注重全面系统的长期效应研究,

加强对研究结果的可靠性和影响机制的探讨。

生物质炭的土壤—大气—植物体系效应研究。生物质炭农田碳效应受不同的气候条件、特定的土壤环境条件和作物的共同影响。高碳含量生物质炭施入土壤会引起土壤碳氮比的较大波动,可能会对土壤微生物群落结构和功能产生影响,进而影响土壤的碳矿化、碳排放和作物的碳固定功能,因此需要开展生物质炭—土壤—微生物—大气—作物统一连续体的长期作用研究。

另外,生物质炭施用的不可逆性,要求施用前必须充分评估可能的环境风险,并开展较长时间尺度的生物质炭与土壤及其生物环境之间的相互作用关系的研究,为生物质炭的未来规模化生产和应用提供科学依据。

参考文献 Reference:

- [1] 戴 慧. 天童地区不同土地利用类型土壤的碳库特征[D]. 上海:华东师范大学,2007.
DAI H. The characteristic of soil carbon pools among different land use types in Tiantong [D]. East China Normal University,2007.
- [2] JORGE Á F, MARK E, KEITH P. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of Spain northeastern [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 155: 87-94.
- [3] CHRISTOPHER D, WARDELL JOHNSON G W, HARPER R J. Carbon management of commercial rangelands in Australia: Major pools and fluxes [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 148: 44-64.
- [4] NGUYEN B T, LEHMANN J. Black carbon decomposition under varying water regimes [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(8): 846-853.
- [5] GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon; a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41.
- [6] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [7] SOHI S, LOPEZ-CAPEL E, KRULL E, et al. Biochar, climate change and soil: a review to guide future research [J]. *CSRIO Land and Water Science Report*, 2009, 5(10): 17-31.
- [8] KEITH A, SINGH B, DIJKSTRA F A. Biochar reduces the rhizosphere priming effect on soil organic carbon [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 372-379.
- [9] LUA A C, YANG T. Effects of vacuum pyrolysis conditions on the characteristics of activated carbons derived from pis-

- tachio-nut shells [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 276(2):364-372.
- [10] GUNDALE M J, DELUCA T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1):86-93.
- [11] ZORNOZA R, MORENO-BARRIGA F, ACOSTA J A, *et al.* Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments [J]. *Chemosphere*, 2016, 144:122-130.
- [12] ENDERS A, HANLEY K, WHITMAN T, *et al.* Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114(3):644-653.
- [13] CELY P, GASCÓ G, PAZ-FERREIRO J, *et al.* Agronomic properties of biochars from different manure wastes [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 111:173-182.
- [14] WANG X B, ZHOU W, LIANG G Q, *et al.* Characteristics of maize biochar with different pyrolysis temperatures and its effects on organic carbon, nitrogen and enzymatic activities after addition to fluvo-aquic soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538:137-144.
- [15] KONGTHOD T, THANACHIT S, ANUSONTORNPERM S, *et al.* Effects of biochars and other organic soil amendments on plant nutrient availability in an ustoxic quartzipsamment [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(5):790-798.
- [16] SUN J A, WANG B CH, XU G, *et al.* Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1):43-47.
- [17] IQBAL H, GARCIA-PEREZ M, FLURY M. Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 521-522:37-45.
- [18] ABUJABHAH I S, BOUND S A, DOYLE R, *et al.* Effects of biochar and compost amendments on soil physicochemical properties and the total community within a temperate agricultural soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 98:243-253.
- [19] HAN F P, REN L L, ZHANG X CH. Effect of biochar on the soil nutrients about different grasslands in the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2016, 137:554-562.
- [20] HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M, *et al.* Fate of biochar in chemically- and physically-defined soil organic carbon pools [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 73(3):35-46.
- [21] LU W W, DING W X, ZHANG J H, *et al.* Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76(1):12-21.
- [22] VENTURA M, ALBERTI G, VIGER M, *et al.* Biochar mineralization and priming effect on SOM decomposition in two European short rotation coppices [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7(5):1150-1160.
- [23] 宓少锋, 雷竹叶. 生物炭制备及其对微囊藻毒素 MCLR 吸附作用 [D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
- YAN SH F. Adsorption of microcystin-LR on the leaves-*Phyllostachys praecox*-derived biochar and its preparation [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [24] KEILUWEIT M, NICO P S, JOHORSON M I, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4):1247-1253.
- [25] CHUN Y, SHENG G Y, CARY T C, *et al.* Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(17):4649-4655.
- [26] BRUUN E W, HAUGGAARD-NIELSEN H, IBRAHIM N, *et al.* Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3):1182-1189.
- [27] ZIMMERMANN M, BIRD M I, WURSTER C, *et al.* Rapid degradation of pyrogenic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11):3306-3316.
- [28] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5):1009-1015.
- ZENG A, LIAO Y CH, ZHANG J L, *et al.* Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1009-1015.
- [29] EYKELBOSH A J, JOHNSON M S, COUTO E G. Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149:9-16.
- [30] 周桂玉, 奚森, 刘世杰, 等. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10):2075-2080.
- ZHOU G Y, DOU S, LIU SH J, *et al.* The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):2075-2080.
- [31] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(18):5838-5846.

- HAN W, SHEN SH H, XIE Z B, *et al.* Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5838-5846.
- [32] 黄超, 刘丽君, 章明奎, 等. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- HUANG CH, LIU L J, ZHANG M K, *et al.* Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth [J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences)*, 2011, 37(4): 439-445.
- [33] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2489-2492.
- HUA L, ZHANG CH, MA H R, *et al.* Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2489-2492.
- [34] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509-517.
- SHANG J, GENG Z CH, CHEN X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 509-517.
- [35] DOMENE X, HANLEY K, ENDERS A, *et al.* Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 10-17.
- [36] DEMPSTER D N, GLEESON D B, SOLAIMAN Z M, *et al.* Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354 (1/2): 311-324.
- [37] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1361-1369.
- LI M, LI ZH P, LIU M, *et al.* Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361-1369.
- [38] SIGUA G C, NOVAK J M, WATTS D W, *et al.* Impact of switchgrass biochars with supplemental nitrogen on carbon-nitrogen mineralization in highly weathered Coastal Plain Ultisols [J]. *Chemosphere*, 2016, 145: 135-141.
- [39] MUKHERJEE S, TAPPE W, WEIHERMUELLER L, *et al.* Dissipation of bentazone, pyrimethanil and boscalid in biochar and digestate based soil mixtures for biopurification systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 192-202.
- [40] AHMED H EL-NAGGAR, ADEL R A USMAN, ABDUL RASOUL AL-OMRAN, *et al.* Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar [J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 67-73.
- [41] WENG Z, ZWIETEN L V, SINGH B P, *et al.* Plant-biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90: 111-121.
- [42] 管天玉. 秸秆还田方式对土壤有机碳组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- GUAN T Y. Effect of straw manuring on soil organic carbon fractions [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [43] AMELOOT N, SLEUTEL S, DAS K C, *et al.* Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 7(1): 135-144.
- [44] MAESTRINI B, HERRMANN A M, NANNIPIERI P, *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.
- [45] MUHAMMAD N, DAI Z M, XIAO K C, *et al.* Changes in microbial community structure due to biochars generated from different feedstocks and their relationships with soil chemical properties [J]. *Geoderma*, 2014, 226(1): 270-278.
- [46] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
- PAN G X, ZHOU P, LI L Q, *et al.* Core issues and research progresses of soil science of C sequestration [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-337.
- [47] GUENET B, NEILL C, BARDOUX G, *et al.* Is there a linear relationship between priming effect intensity and the amount of organic matter input? [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(3): 436-442.
- [48] SINGH B P, COWIE A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralization in a low carbon clayey soil [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3): 3687.
- [49] FANG Y Y, SINGH B P, SINGH B. Temperature sensitivity of biochar and native carbon mineralisation in biochar-amended soils [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191: 158-167.
- [50] FANG Y Y, SINGH B, SINGH B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 136-145.
- [51] LIANG B Q, LEHMANN J, SOHI S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206-213.

- [52] PURAKAYASTHA T J, KUMARI S, PATHAK H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues [J]. *Geoderma*, 2015, 239-240: 293-303.
- [53] AMELOOT N, NEVE S D, JEGAJEEVAGAN K, *et al.* Short-term CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57(3): 401-410.
- [54] ZHAO R, COLES N, WU J. Carbon mineralization following additions of fresh and aged biochar to an infertile soil [J]. *Catena*, 2015, 125: 183-189.
- [55] LUO Y, DURENKAMP M, DE NOBILI M, *et al.* Short term soil priming effects and the mineralization of biochar following its incorporation to soils of different pH [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(11): 2304-2314.
- [56] JONES D L, MURPHY D V, KHALID M, *et al.* Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(8): 1723-1731.
- [57] BRUUN S, CLAUSON-KAAS S, BOBULSKA L, *et al.* Carbon dioxide emissions from biochar in soil: role of clay, microorganisms and carbonates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65: 52-59.
- [58] AMELOOT N, SLEUTEL S, CASE S D C, *et al.* C mineralization and microbial activity in four biochar field experiments several years after incorporation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 195-203.
- [59] NAISSE C, GIRARDIN C, DAVASSE B, *et al.* Effect of biochar addition on C mineralisation and soil organic matter priming in two subsoil horizons [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 825-832.
- [60] KNOBLAUCH C, MAARIFAT A A, PFEIFFER E M, *et al.* Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1768-1778.
- [61] 胡云飞, 李荣林, 杨亦扬. 生物炭对茶园土壤 CO₂ 和 N₂O 排放量及微生物特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1954-1960.
- HU Y F, LI R L, YANG Y Y. Effects of biochar on CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of tea garden soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1954-1960.
- [62] KERRE B, HERNANDEZ-SORIANO M C, SMOLDERS E. Partitioning of carbon sources among functional pools to investigate short-term priming effects of biochar in soil: A 13C study [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 30-38.
- [63] LU W W, ZHANG H L. Response of biochar induced carbon mineralization priming effects to additional nitrogen in a sandy loam soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 165-171.
- [64] METTING F B, SMITH J L, AMTHOR J S, *et al.* Science needs and new technology for increasing soil carbon sequestration [J]. *Climate Change*, 2001, 5(1): 11-34.
- [65] 高鹏飞, 陈文颖, 何建坤. 中国的二氧化碳边际减排成本 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(9): 1192-1195.
- GAO P F, CHEN W Y, HE J K. Marginal carbon abatement cost in China [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(9): 1192-1195.
- [66] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, *et al.* Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(4): 6-28.
- [67] LEHMANN J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447(10): 143-144.
- [68] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展 [J]. *中国农业科技导报*, 2006, 8(1): 6-13.
- SUN ZH J, SUN Y M. Situation and development of agricultural residues as energy resource utilization in rural areas in China [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006, 8(1): 6-13.
- [69] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展 [J]. *核农学报*, 2013, 27(5): 681-686.
- LI F Y, LIANG Y, WANG J F, *et al.* Biochar to sequester carbon and mitigate greenhouses emission: a review [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(5): 681-686.

Review of Effect of Biochar on Soil Organic Carbon in Cropland and Its Carbon Mineralization

ZHANG Hongpei^{1,2}, LI Xiuyun¹, SHEN Yufang^{1,2} and LI Shiqing²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract Soil organic carbon plays an important role in the biosphere cycle, and the mineralization of organic carbon will significantly affect the concentration of CO₂ in the atmosphere, also relate to the release of nutrients in the soil. In recent years, the research of carbon sequestration function in farmland soil ecosystem of the biochar amendment has been widely concerned. However, due to the differentiation of specific methods and research objects that have been adopted during these researches, the results of the present research are still controversial. This paper mainly reviewed the effects of biochar on content of soil organic carbon and mineralization from aspects test materials, test conditions, driving factors, etc. And also the paper stated the worthy direction for further research, so as to objectively evaluate the effect of biochar on carbon sequestration and emission in the soil of farmland

Key words Biochar; Organic carbon; Carbon mineralization; Carbon emission and mitigation

Received 2016-03-25

Returned 2016-07-01

Foundation item Funds for Central Universities (No. YQ2013009); the National Natural Science Foundation of China (No. 51279197, No. 50809068); Science and Technology Planning Project of Yangling Demonstration Zone of Agricultural Hi-tech (No. 2014NY-30).

First author ZHANG Hongpei, female, master student. Research area: gas emissions of farmland greenhouse and nitrogen effect. E-mail: hpzhp1991@163.com

Corresponding author SHEN Yufang, female, Ph. D, associate research fellow. Research area: water nutrient dynamic process of dry farmland ecosystem and its environmental effects. E-mail: shenyufang@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑: 史亚歌 Responsible editor: SHI Yage)