

生物质炭的固碳减排与合理施用

谢祖彬, 刘琦

引用本文:

谢祖彬, 刘琦. 生物质炭的固碳减排与合理施用[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 901-907.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果

刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 696-706 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0490>

添加玉米秸秆及其生物质炭对砖红壤N₂O排放的影响

潘凤娥, 胡俊鹏, 索龙, 王小淇, 季雅岚, 孟磊

农业环境科学学报. 2016(2): 396-402 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.026>

集约化菜地N₂O排放及减排——基于文献整合分析

吴震, 陈安枫, 朱爽阁, 熊正琴

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 707-714 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0018>

我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 834-841 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0108>

生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述

刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 王聪, 周萍, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2015(2): 205-212 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢祖彬, 刘 琦. 生物质炭的固碳减排与合理施用[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 901–907.

XIE Zu-bin, LIU Qi. Rational application of biochar to sequester carbon and mitigate soil GHGs emissions: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 901–907.



开放科学 OSID

生物质炭的固碳减排与合理施用

谢祖彬¹, 刘 琦^{2,3}

(1. 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; 2. 南京林业大学林学院, 南京 210037; 3. 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学, 南京 210037)

摘 要:近年来开展了大量短期一次性施用生物质炭对作物产量、土壤碳库和温室气体排放的研究。研究表明生物质炭能增加土壤碳库,但对作物产量、CH₄和N₂O排放的影响受生物质炭性质和土壤类型影响。生物质炭用在酸性土壤上比中性或碱性土壤上更能提高作物产量。草本或木本炭能减少N₂O排放,但畜禽粪便炭不能减少N₂O排放。在热带、亚热带地区生物质炭施用对N₂O的减排作用小于温带地区。生物质炭的固碳减排效应除了受生物质炭类型、稳定性和施用区域影响外,还受制炭能耗和裂解气回收技术影响。在未来发展方向上,提出了亟需加强制炭技术、长期连续施用生物质炭效应和生物质炭性质与土壤类型互作研究。

关键词:生物质炭;土壤碳库;温室气体排放;甲烷;氧化亚氮;综述

中图分类号:X144 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)04-0901-07 doi:10.11654/jaes.2020-0034

Rational application of biochar to sequester carbon and mitigate soil GHGs emissions: A review

XIE Zu-bin¹, LIU Qi^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese of Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In last decade, a lot of work has been done on the effects of short-term and one application of biochar on crop yield, soil carbon sequestration and greenhouse gases emissions. Results show that biochar can increase soil organic carbon. However, the effects of biochar on crop yield, CH₄ and N₂O emissions vary with biochar types and soil properties. Increase magnitude of biochar application in acid soil is higher than that in neutral or alkaline soil. Straw or wood biochar can decrease farmland N₂O emission, however manure biochar can't. The decrease magnitude of biochar application on N₂O emission in tropical and subtropical area is smaller than that in temperate area. In addition, the effects of biochar on greenhouse gas mitigation are also impacted by biochar production technique. Before biochar can be extensively used, the effects of long-term and multi-application of biochar on crop growth and soil greenhouse gases emissions, and interactions of biochar properties and soil types must be investigated. And the biochar production techniques must be explored.

Keywords: biochar; carbon sequestration; greenhouse gases emission; CH₄; N₂O; review

气候变暖和粮食安全是当前人类所面临的重大挑战。自1750年工业革命以来,化石燃料燃烧、土地利用变化等造成大气中温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)浓

度持续上升,致使地表温度升高了0.78℃^[1]。气候变暖会导致海平面上升、极端气候增加、生态系统恶化,给人类的生产和生活带来重大影响。同时,世界人口

收稿日期:2020-01-08 录用日期:2020-03-15

作者简介:谢祖彬(1964—),男,江苏南通人,博士,研究员,主要从事土壤碳氮循环和生物能源研究。E-mail: zbxie@issas.ac.cn

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503137);国家自然科学基金项目(31870500,31901196);江苏省自然科学基金项目(BK20190746)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of Agriculture Public Welfare Profession of China(201503137); The National Natural Science Foundation of China(31870500,31901196); The Natural Science Foundation of Jiangsu, China(BK20190746)

持续增长,粮食安全问题也越来越严峻^[2]。

生物质炭(Biochar)在巴西亚马孙流域考古中的发现,引起了人们利用生物质炭来解决气候变化和粮食安全问题的兴趣^[3]。生物质炭是由动植物生物质(秸秆、木屑、畜禽粪便等)在完全或部分缺氧的条件下经高温热解炭化产生的一类高度芳香化的物质,其结构稳定,难以被微生物分解^[4]。亚马孙流域黑土(Terra Preta)有上千年的历史,在远古人类活动的影响下,其积累了大量的因不完全燃烧而产生的生物质炭,这种土壤比周边同样类型但不含生物质炭的土壤具有更高的肥力和碳含量^[5-6]。研究者受此启示,认为向土壤中添加工业化生产的生物质炭可以快速复制出亚马孙流域黑土,不仅可以提高土壤碳库,增加对大气CO₂的固持,而且还能改良土壤,促进作物生产^[7]。

土壤是陆地生态系统中碳储量最大的有机碳库(1550 Pg),是陆地生物圈植被碳储量的3倍和大气圈碳储量的2倍^[8]。因此,增加全球土壤碳库在抑制大气CO₂浓度升高和减缓全球气候变暖具有重要的意义^[9]。

传统的将秸秆等有机物料直接还田的措施对提高土壤碳库的作用微弱,原因是这些物料分解迅速,并且会增加土壤CH₄和N₂O等温室气体的排放^[10-11]。而将秸秆等生物质转化后的生物质炭性质稳定,难以分解,可以有效地“锁”住碳库,减缓其分解回归到大气的速度^[12]。鉴于生物质炭潜在的固碳及增产价值,国际上相继成立了不同的生物质炭研究机构(如International Biochar Initiative),以研究并推广生物质炭在土壤中的应用。此外,IPCC也在2014年的报告中将生物质炭列为一项重要的固碳减排措施^[13]。

然而,也有一些科学家发出了质疑,尤其是来自英国、美国等国家的126个社会团体不久前联名发表了宣言:《生物质炭,人类、土地和生态系统的新威胁》。他们明确表示反对“生物质炭”,认为其对土地、人类和生态系统构成新的巨大威胁。当前一些反对的观点包括:(1)亚马孙流域黑土使贫瘠的土壤变肥沃可能更得益于富含磷元素的骨骼的添加,仅靠生物质炭自身无法做到这一点^[14];(2)工业生物质炭与“亚马孙黑土”差异很大,“亚马孙黑土”是土著居民在数百年甚至数千年的时间变迁中创造的,而生物质炭在短期内可能并不能很好地与土壤“融合”,并发挥作用^[15];(3)生物质炭的碳汇作用还不明确,有研究表明生物质炭可能会激发原土壤有机质的分解^[16]。

生物质炭措施究竟是熠熠生辉,还是会黯然失

色?本文总结了近年来生物质炭对作物生产、土壤碳库、土壤温室气体排放的影响,提出了生物质炭合理施用方案,以期为生物质炭有效实现增产和固碳减排提供科学参考。

1 生物质炭对土壤性质和作物产量的影响

生物质炭对作物产量的影响机制包括3个方面:(1)pH效应,生物质炭在酸性土中能提高土壤pH,降低铝毒^[17];(2)养分效应,生物质炭本身含有一些可利用的养分如P、K、Ca、Mg,能增加土壤肥力和作物养分吸收^[18];(3)结构效应,生物质炭具有多孔结构,能缓解土壤压实,增加田间持水率,从而利于作物根系的下扎和对水分的吸收^[19]。同时,生物质炭具有较大的比表面积,并含有带负电的官能团,能有效提高低CEC土壤的保肥性^[20]。

Jeffery等^[17]基于文献Meta分析,研究了生物质炭对作物产量的总体效应,结果表明生物质炭能平均增产13%。然而,针对不同的土壤性质、生物质炭种类、环境条件以及田间管理,生物质炭所发挥的效应有较大差别。如Zhu等^[21]研究发现1%的麦秸生物质炭能显著提高红壤玉米产量,但没有提高潮土、娄土、黑土和紫色土的玉米产量,甚至还会降低产量。Abbasi等^[22]观测到禽粪生物质炭能显著提高玉米产量,而白三叶草炭则没有显著的影响。Asai等^[23]发现生物质炭在干旱并且缺磷的土壤中显著增加了作物产量。然而,当田间采用充足的养分和水管理时,生物质炭对作物产量则没有显著影响^[24-25]。3种水稻-小麦轮作和3种小米-小麦轮作土壤连续5 a土柱试验表明,稻秆生物质炭能持续提高水稻、小米和小麦产量^[26]。Zhang等^[27]的稻麦田间试验表明,一次性添加的生物质炭(20~40 t·hm⁻²)在6 a后仍然能显著提高水稻和小麦产量。而对于偏碱性的始成土,Wei等^[28]的8 a田间试验表明生物质炭对小麦和玉米产量没有显著影响。Liu等^[29]的Meta分析表明,生物质炭对作物产量并没有表现出明显的年际效应。总体来说,生物质炭在酸性土(pH≤6.5)中能有效地增加作物产量,而在中性或碱性土壤中效果不显著^[25,30]。此外,生物质炭对作物产量的促进作用通常在质地较差(沙土或黏土)或CEC含量较低的土壤中表现出更好的效果^[30]。畜禽粪便生物质炭比秸秆生物质炭或木材生物质炭对作物产量有更大的增幅^[30]。随着生物质炭添加量的增加,作物产量增幅先上升后下降,过量的生物质炭添加(>80 t·hm⁻²)会抑制作物产量^[30]。

2 生物质炭对土壤碳库的影响

生物质炭的稳定性是决定生物质炭能否有效提升土壤碳库的直接因素。在不同的研究中,基于不同的生物质炭种类及环境条件,生物质炭的稳定性有所不同,其半保留时间短则几十年,长则上千年^[31]。Wang等^[32]通过对24篇文献中128个观测值进行的Meta分析表明:生物质炭中平均约有3%的部分属于易降解成分,其半保留时间平均为108 d,其余的97%为难降解成分,其半保留时间平均为556 a,这说明生物质炭中大部分的碳可以作为稳定的碳库得以保存。通常来说,生物质炭的裂解温度是决定生物质炭稳定性的重要因素,裂解温度越高,其降解越慢。同种生物质炭在不同土壤中的降解速率差异不大^[33]。

生物质炭降解过程包括非生物过程和生物过程:非生物过程主要指生物质炭中少量的以碳酸盐形式存在的碳(约占总碳的0.5%)在酸性条件下的溶解;生物过程主要指微生物对生物质炭中可利用的有机碳进行同化以获取能量和物质^[34-35]。Kuzakov等^[36]发现生物质炭中的糖脂(Glycolipids)、磷脂质(Phospholipids)等脂肪族化合物是微生物利用的主要成分;经过3.5 a的培养,生物质炭中的碳有2.6%被整合到微生物体内,有4.5%被氧化成CO₂释放到大气中;生物质炭在被微生物降解的过程中,会伴随着O和H的增加,C的减少,以及含氧官能团的增加(-COOH、-C=O、-OH)。

生物质炭对土壤碳库的影响除了其本身保留的碳外,还包括其对土壤原有机碳分解增加或减少的量。Wang等^[32]通过对21个研究中116个观测值的Meta分析发现,生物质炭对原土壤有机碳的分解速率总体上有微弱降低的趋势,降幅平均为3.8%。然而,根据具体的生物质炭性质和环境条件的不同,生物质炭对土壤原有机碳的分解表现出不同的效应。一般来说,当使用秸秆生物质炭、快裂解生物质炭或低温裂解的生物质炭时,土壤原有机碳的降解速率会被抑制,其降幅均在20%左右。而当生物质炭添加到沙性土壤中时,其会促进原土壤有机碳分解,增幅为21%^[32]。

生物质炭对土壤有机碳分解产生负激发效应的机制包括:(1)生物质炭中含有一定量的可利用有机碳成分,微生物可能会优先利用这部分碳,从而减少了对原有机碳的分解^[37];(2)生物质炭含有一定量的有毒化合物(酚类),能抑制微生物对有机碳的分解活

性^[38];(3)生物质炭丰富的孔隙结构和比表面积对土壤有机质具有包裹和吸附作用,可能会隔离微生物及其产生的胞外酶与受保护的有机碳的接触,从而降低有机碳的分解^[39];(4)生物质炭促进土壤有机-无机复合体的形成,从而增强土壤有机质的稳定性^[40]。而生物质炭对土壤有机碳分解产生正激发效应的原因可能是由于生物质炭的多孔性及其所含的营养元素为微生物的生长繁殖提供了有利的环境,从而增加微生物的数量和活性,促进其对土壤有机碳的矿化分解^[16]。

总体来说,即使生物质炭对土壤原有机碳的分解表现出正的或负的激发效应,这部分增加或减少的分解量相比于生物质炭所固持的碳量非常小,如在Luo等^[16]的试验中,尽管芒草生物质炭造成了土壤原有机碳中3.3%的损失量,然而这部分量相比于生物质炭自身所固持的碳量仅为0.6%。因此,生物质炭从增加土壤总碳的角度是有效的。

3 生物质炭对土壤CH₄排放的影响

Song等^[41]通过对田间试验数据的Meta分析发现生物质炭在旱地中通常会增加CH₄氧化,增幅平均为114%,这主要得益于生物质炭增加了土壤孔隙度,有利于好氧环境的形成。而生物质炭在水田中对CH₄排放的影响较复杂,通常基于不同的生物质炭和土壤性质而有不同。有研究观测到生物质炭增加了稻田CH₄排放26%~68%^[42-43],其可能的原因包括:(1)生物质炭本身会基于某些特定的裂解条件(如快裂解、低温裂解)而存在一些易降解的有机碳成分,从而为产甲烷菌提供了底物^[43];(2)生物质炭可能会增加微生物生物量以及活性,从而加速原土壤有机质的分解^[44-45]。此外,也有研究发现生物质炭对稻田CH₄有抑制作用,其原因是生物质炭不仅增加了产甲烷菌,也增加了甲烷氧化菌,并且对甲烷氧化菌的增高比例显著高于对产甲烷菌的增高比例,从而降低了CH₄排放^[46]。也有学者认为由于NH₄⁺和CH₄会竞争甲烷氧化菌的生化反应位点,而生物质炭对NH₄⁺有一定的吸附作用^[47],因此,生物质炭会间接地增加CH₄的氧化量,从而降低CH₄净排放量^[41]。从Meta分析结果的总趋势来看,生物质炭对稻田CH₄排放有增加的趋势,增幅平均为19%^[41]。将还田的秸秆转化成生物质炭后再还田,我国每年可减少CH₄排放2400万t CO₂-C^[48]。

4 生物质炭对土壤N₂O排放的影响

Cayuela等^[49]通过数据整合分析发现生物质炭具

有降低土壤 N_2O 排放的潜力,平均降幅约为54%。然而,基于生物质炭制备原料、土壤类型和田间管理方式等条件的不同,其对土壤 N_2O 排放的效应各异。如畜禽粪便制备的生物质炭对 N_2O 排放没有减少作用,而其他植物性材料(如草本和木本)制备的生物质炭能有效减少 N_2O 排放^[50]。生物质炭对强酸性土壤($\text{pH}<5$) N_2O 减排作用较小,对 $\text{pH}>5$ 土壤的 N_2O 减排作用较大^[49-51]。对于水田,生物质炭能有效减少 N_2O 排放^[43],而对于某些旱地,有研究发现生物质炭反而激发了土壤 N_2O 排放^[52]。当土壤有机碳含量 $<5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,生物质炭施用对 N_2O 排放没有显著影响。制炭温度 $<350\text{ }^\circ\text{C}$ 时,生物质炭施用不会显著影响 N_2O 排放。随着生物质炭用量增加,其对 N_2O 的减排作用增强,并当一次生物质炭用量超过 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对 N_2O 的减排作用最大^[30]。Liu等^[53]在黄河沉积物发育土壤上进行了5 a连续施用生物质炭试验,发现生物质炭在前2 a对土壤 N_2O 没有显著效果,然而从第3 a开始显著降低土壤 N_2O 排放,降幅在30%以上。Wu等^[54]从施用6 a生物质炭的试验田里取出老化生物质炭,并进行了培养试验,结果表明老化生物质炭能减少碱性土壤中 N_2O 的产生。但Zhang等^[55]的培养试验表明,老化生物质炭会显著提高酸性土壤 N_2O 排放量的84.8%。

土壤 N_2O 是土壤氮素硝化和反硝化过程的产物^[56-57],生物质炭会调控微生物活性进而影响土壤 N_2O 排放。Sánchez-García等^[58]发现生物质炭能增加土壤氨氧化菌的数量,从而促进土壤硝化过程及相应的 N_2O 产生;而Harter等^[59]发现当土壤中反硝化过程占主导时,生物质炭会增加土壤 N_2O 还原菌的数量,从而加速 N_2O 向 N_2 转化,导致 N_2O 排放减少。此外,也有研究报道生物质炭在某些土壤类型中会对硝化菌或反硝化菌产生毒副作用,从而抑制 N_2O 的产生^[60-61]。这些研究说明生物质炭对土壤 N_2O 排放的影响一方面取决于土壤功能微生物的响应,另一方面取决于土壤中主导的氮转化过程。

Liu等^[62]用机器学习随机森林模型研究表明,生物质炭类型、剂量和气候带是控制生物质炭减少 N_2O 排放的关键因素,同时实验室减排效果好于田间效果。如 $10\sim 20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆炭将平均减少 N_2O 排放16%,而相应剂量的畜禽粪便炭只减少9%,木炭减少13%。在热带、亚热带地区生物质炭施用对 N_2O 的减排作用小于温带地区。在高土壤有机碳、高阳离子交换量和高养分土壤上,生物质炭施用能大幅减少 N_2O

排放。全球农田如果施用生物质炭,每年最多可减少 N_2O 排放96万 $\text{t N}_2\text{O-N}$ (相当于目前全球农田 N_2O 排放的33%)^[62]。

5 生物质炭的固碳减排方案与合理施用

Matovic等^[63]认为,假设将陆地生态系统净初级生产力 $60.6\text{ Gt}\cdot\text{a}^{-1}$ (NPP,即增加的植物生物量)的10%作为生物质炭原料,将得到约 $3\text{ Gt C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的生物质炭(50%的碳保留率),相当于人为碳排放总量($7.2\text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$)的42%。但Matovic等^[63]的估算可能过于乐观,他一方面可能高估了可供应的生物质原料总量,另一方面并没有综合考虑生物质炭所产生的其他效应。Woolf等^[31]认为在不影响粮食安全、土地利用及环境污染的前提下,全球可用来制造生物质炭的秸秆量仅为 $1.0\sim 2.3\text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$,转化为生物质炭后可固持的碳量为 $0.5\sim 0.9\text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外,这些生物质炭所带来的其他效应(如温室气体减排等)又将间接减少 $0.3\sim 0.5\text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$ 的碳。综合以上考虑,Woolf等^[31]估算的生物质炭固碳潜力每年最多仅能抵消12%的人为碳排放。

Wu等^[64]基于一次性添加生物质炭的6 a稻麦系统生物质炭试验,综合考虑土壤 CH_4 、 N_2O 排放以及土壤碳库变化,发现添加 $20\sim 40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭能有效降低作物生产过程中土壤的全球增温潜势,降幅为30%~50%。Liu等^[65]通过数据整合发现,生物质炭在旱地土壤中对全球增温潜势的降低作用平均为41%,远大于其在水田中的效果(降幅为17%)。然而,Liu等^[53]5 a连续施用生物质炭的试验表明,如果只考虑土壤温室气体排放以及土壤碳库的变化,生物质炭能有效降低全球增温潜势,但如果进一步将生物质炭加工过程中的耗能及其释放的温室气体考虑进来,则生物质炭对全球增温潜势的降低作用将大打折扣,且会存在因低效的生物质炭制备过程而增加全球增温潜势的风险。

Liu等研究发现生物质炭的固碳效应取决于制炭能耗和裂解气的回收利用。如果裂解气不进行回收利用,生物质炭制备过程中排放的温室气体导致的增温效应将大于生物质炭中所有的碳^[42]。如果要实现生物质炭施用产生的碳排放强度小于不施生物质炭处理,那么制炭净能耗必须小于 $3.4\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干物料^[48]。

我国每年生产秸秆3.25亿 t C ,其中还田和田间焚烧占30%^[66]。如果把还田和田间焚烧的秸秆作为

生产生物质炭的有效秸秆资源,则每年可用于制炭的秸秆为0.975亿t C。根据400℃条件下秸秆碳转化为生物质炭碳的留存率58.5%计算,可生产生物质炭碳5700万t。根据制生物质炭能耗 $0.0078\text{ kg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 原料、裂解气碳抵消率 $0.0151\text{ kg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 原料和100 a后生物质炭碳稳定率86.3%计算,我国土壤有机碳将每年增加5790万t C^[48]。

Liu等^[62]基于随机森林机器学习模型,从全球尺度研究了生物质炭对农田作物产量及土壤氮排放(NH_3 挥发、 N_2O 排放及氮淋溶)效应的空间变异特征。结果表明生物质炭施用需要根据土壤理化性质进行合理匹配,否则会带来粮食安全隐忧或环境风险。对大部分农田,一次性添加 $>80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的木材生物质炭或秸秆生物质炭可能会抑制作物产量;一次性添加 $>40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的秸秆生物质炭或 $>10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的畜禽粪便生物质炭可能会激发土壤氮挥发而造成土壤氮损失增加。尽管生物质炭在热带高度风化的土壤中通常能显著增加作物产量,但由于这些区域具有较弱的pH缓冲能力而容易被高碱性的生物质炭(如秸秆或畜禽粪便生物质炭)引起氮挥发而造成氮损失增加^[62]。Liu等^[62]综合生物质炭效应的空间变异特征,提出了合理施用生物质炭的全球方案建议,即对于低缓冲力土壤($\text{SOC}<1\%$, $\text{pH}<5$, 或黏粒含量 $>30\%$),优先使用木材生物质炭,且单次添加量不能大于 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;对于其他土壤,可选用不同类型的生物质炭,但单次添加木材生物质炭不能大于 $80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,秸秆生物质炭不能大于 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,或畜禽粪便生物质炭不能大于 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;此方案可使全球作物产量平均提升约10%,同时平均减少全球 N_2O 排放约20%。

总之,生物质炭措施对于粮食增产和固碳减排有一定的潜力,但需以清洁高效的生物质炭制备技术为前提,并根据具体的土壤性质选择合适的生物质炭类型以及与剂量进行合理的匹配。

6 未来研究方向

根据我们对发表文献的分析,绝大多数试验采取一次性添加生物质炭的模式。在时间尺度上,大部分研究没有超过1 a, 2 a以上的文献仅占5%。另外生物质炭的固碳减排效应还与生物质炭的生产技术、生物质炭性质和土壤性质有关。在生物质炭大规模推广运用之前,还需要加强以下几方面研究:

(1)低耗能循环制炭技术研究。目前大部分的制炭技术能耗都比较高,平均耗能达 $4.04\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干给

料。而且还有很多采用小土窑、柴油桶、火烧+水浇(盖土)等极其简单的工艺制备生物质炭,质量不稳定、二次污染严重。现有结果表明生物质炭制备技术影响固碳减排效果,亟需加强生物质炭生产技术研究。

(2)目前已有结果大量来自于短期、一次性、大量生物质炭施用试验,并且一致认为生物质炭能增加土壤碳库,但对 CH_4 、 N_2O 排放的影响不完全一致。也开展了一些机理方面的研究和少量老化生物质炭的工作,但多年老化生物质炭表现出的结果与新鲜生物质炭不同,亟需加强研究。

(3)生物质炭类型与土壤类型互作研究。生物质炭性质和土壤性质都影响生物质炭的固碳减排效果,目前结果显示同一种生物质炭在不同土壤上的固碳减排效应不同,不同生物质炭在同一种土壤上的效应也不同,亟需加强比较研究,尤其是连续长期施用效应研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]// Stocker T F, Qin D, Plattner G, et al. New York: Cambridge University Press, 2013: 5–6. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- [2] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model inter-comparison[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3268–3273.
- [3] Sohi S P. Carbon storage with benefits[J]. *Science*, 2012, 338(6110): 1034–1035.
- [4] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7174): 143–144.
- [5] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The ‘terra preta’ phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Die Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37–41.
- [6] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [7] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of bio-char systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2): 827–833.
- [8] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981–990.
- [9] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological applications*, 2000, 10(2): 423–436.

- [10] Xie Z, Liu G, Bei Q, et al. CO₂ mitigation potential in farmland of China by altering current organic matter amendment pattern[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(9): 1351–1357.
- [11] Xia L, Wang S, Yan X. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice–wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197:118–127.
- [12] Grutzmacher P, Puga A P, Bibar M P S, et al. Carbon stability and mitigation of fertilizer induced N₂O emissions in soil amended with biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:1459–1466.
- [13] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]//Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [14] Tenenbaum D J. Biochar: Carbon mitigation from the ground up[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117:A70–A73.
- [15] Mukherjee A, Lal R. The biochar dilemma[J]. *Soil Research*, 2014, 52: 217–230.
- [16] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, et al. 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(11): 2304–2314.
- [17] Jeffery S, Abalos D, Prodana M. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 053001.
- [18] Silber A, Levkovitch I, Graber E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: Agronomic implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9318–9323.
- [19] Liu Q, Liu B, Zhang Y, et al. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 8–17.
- [20] Liang B, Lehmann J, Solomon D. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [21] Zhu Q, Peng X, Huang T. Contrasted effects of biochar on maize growth and N use efficiency depending on soil conditions[J]. *International Agrophysics*, 2015, 29(2): 257–266.
- [22] Abbasi M K, Anwar A A. Ameliorating effects of biochar derived from poultry manure and white clover residues on soil nutrient status and plant growth promotion–greenhouse experiments [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0131592.
- [23] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2009, 111(1/2):81–84.
- [24] Haeefe S M, Konboon Y, Wongboon W. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 430–440.
- [25] Sun H, Zhang H, Xiao H, et al. Wheat straw biochar application increases ammonia volatilization from an urban compacted soil giving a short-term reduction in fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 1624–1631.
- [26] Bi Y C, Cai S Y, Wang Y, et al. Assessing the viability of soil successive straw biochar amendment based on a five-year column trial with six different soils: Views from crop production, carbon sequestration and net ecosystem economic benefits[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 173–186.
- [27] Zhang Q, Song Y, Wu Z, et al. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice–wheat rotation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118435.
- [28] Wei W, Yang H, Fan M, et al. Biochar effects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 702: 134423.
- [29] Liu X, Zhang A, Ji C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2):583–594.
- [30] Liu Q, Zhang Y, Liu B, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2018, 426: 211–225.
- [31] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate[J]. *Nature Communications*, 2010, 1:56.doi: 10.1038/ncomms1053.
- [32] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512–523.
- [33] Liu B, Liu Q, Wang X, et al. A fast chemical oxidation method for predicting the long-term mineralization of biochar in soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 137390.
- [34] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1295–1301.
- [35] 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.
- [36] Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 229–236.
- [37] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: Critical review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 115–131.
- [38] Freddo A, Cai C, Reid B J. Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 171:18–24.
- [39] Lu W, Ding W, Zhang J, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2014, 76: 12–21.
- [40] Lehmann J, Liang B, Solomon D, et al. Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon

- particles[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1).
- [41] Song X, Pan G, Zhang C, et al. Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: A meta-analysis[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(2): e01202.
- [42] 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(9): 1768–1778.
- [43] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153–160.
- [44] O'Neill B, Grossman J, Tsai M, et al. Bacterial community composition in Brazilian Anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58(1): 23–35.
- [45] 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(6): 1301–1310.
- [46] Feng Y, Xu Y, Yu Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 80–88.
- [47] Liang B, Lehmann J, Solomon D. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [48] Liu Q, Liu B, Ambus P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment: A case study in a Chinese rice cropping system[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(1): 148–159.
- [49] Cayuela M L, Van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 5–16.
- [50] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55: 20–27.
- [51] Obia A, Cornelissen G, Mulder J, et al. Effect of soil pH increase by biochar on NO, N₂O and N₂ production during denitrification in acid soils[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0138781.
- [52] Chen J, Kim H, Yoo G. Effects of biochar addition on CO₂ and N₂O emissions following fertilizer application to a cultivated grassland soil [J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0126841.
- [53] Liu Y J, Bi Y C, Xie Y X, et al. Successive straw biochar amendments reduce nitrous oxide emissions but do not improve the net ecosystem economic benefit in an alkaline sandy loam under a wheat-maize cropping system[J]. *Land Degradation and Development*, 2019: 1–16.
- [54] Wu Z, Zhang Q Q, Zhang X, et al. Biochar-enriched soil mitigated N₂O and NO emissions similarly as fresh biochar for wheat production [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134943.
- [55] Zhang X, Duan P P, Wu Z, et al. Aged biochar stimulated ammonia-oxidizing archaea and bacteria-derived N₂O and NO production in an acidic vegetable soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 433–440.
- [56] Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and denitrification: A review[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1). doi: 10.1029/2004GB002282
- [57] Freney J R. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 1–6.
- [58] Sánchez-García M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, et al. Biochar increases soil N₂O emissions produced by nitrification-mediated pathways[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2014. doi: 10.3389/fenvs.2014.00025
- [59] Harter J, Krause H M, Schuettler S, et al. Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8: 660–674.
- [60] Spokas K A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios[J]. *Carbon Management*, 2010, 1: 289–303.
- [61] Anderson C R, Condron L M, Clough T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 4: 309–320.
- [62] Liu Q, Liu B, Zhang Y, et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: Options and mitigation strength in a global perspective[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2077–2093.
- [63] Matovic D. Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective[J]. *Energy*, 2011, 36(4): 2011–2016.
- [64] Wu Z, Zhang X, Dong Y, et al. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: Six-year field observation and meta-analysis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107625.
- [65] Liu X, Mao P, Li L, et al. Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 969–976.
- [66] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16–23.
- SHI Yuan-chun. China's resources biomass feedstock[J]. *Strategic Study of CAE*, 2011, 13(2): 16–23.