

生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述

刘杰云^{1,2,3}, 沈健林^{1,2}, 邱虎森^{1,3}, 王 聪^{1,2,3}, 周 萍^{1,2}, 李 勇^{1,2}, 吴金水^{1,2*}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.中国科学院长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:农田是温室气体重要排放源,降低农田温室气体排放对减缓全球气候变化具有重要意义。生物质炭是生物质在缺氧条件下热解产生的固体物质,因其含碳量高、难于分解、比表面积大、疏松多孔等特性,已成为农田温室气体减排研究中人们关注和研究的热点。通过综述农田添加生物质炭对温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的影响及其机制,以及对温室气体净排放[包括净增温潜势(NGWP)、温室气体净排放(NHGE)和温室气体排放强度(GHGI)]的影响等方面的国内外研究进展,并结合目前国内外生物质炭的研究现状,提出了未来生物质炭在农田温室气体减排领域的研究方向,旨在为生物质炭在农田温室气体减排中的应用提供思路 and 参考。

关键词:生物质炭;农田;温室气体排放;CO₂;CH₄;N₂O

中图分类号:X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0205-08 doi:10.11654/jaes.2015.02.001

Effects of Biochar Amendments on Net Emissions of Greenhouse Gases from Croplands: A Review

LIU Jie-yun^{1,2,3}, SHEN Jian-lin^{1,2}, QIU Hu-sen^{1,3}, WANG Cong^{1,2,3}, ZHOU Ping^{1,2}, LI Yong^{1,2}, WU Jin-shui^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Hunan 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Hunan 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cropland is one of the important sources of greenhouse gas (GHG) emissions. Reducing GHG emissions from croplands is of great significance for mitigating global changes. Biochar is the carbon (C)-rich solid material obtained from biomass pyrolysis in an oxygen-limited environment. Due to its high C content, highly porous structure, large specific surface area and considerable recalcitrancy, biochar has become a hotspot in the study of mitigating GHG emissions from croplands. This paper reviewed the recent progresses in the impacts and mechanisms of biochar amendments on GHG (CO₂, CH₄ and N₂O) emissions from croplands as well as the effects of biochar on net global warming potential (NGWP), net greenhouse gas emissions (NHGE) and greenhouse gas intensity (GHGI). We also proposed further studies on the mitigation of biochar on GHG emissions.

Keywords: biochar; cropland; greenhouse gas emission; CO₂; CH₄; N₂O

农业是温室气体重要排放源,其温室气体年总排放达到 5.1~6.1 Pg (1 Pg=10¹⁵ g) CO₂-eq (二氧化碳当量),占全球温室气体总排放量的 10%~12%,其中农业排放的 CH₄ 和 N₂O 分别占这两种温室气体全球人为排放总量的 52%和 84%^[1]。农田是农业温室气体排放的重要来源,如何降低农田温室气体的排放,已

成为当前国内外研究人员关注的热点^[2]。土壤碳是陆地生态系统最大的碳库,碳储量高达 27 000 亿 t,而其变动往往会对大气 CO₂ 浓度以及碳循环产生重要影响。鉴于土壤碳对温室气体效应的影响,《京都议定书》已将包括土壤在内的陆地生态系统增汇作为减排机制之一。因此,在减少农田温室气体排放的同时,进一步加大农田土壤增汇功能,使农田由温室气体源向温室气体汇转变,对实现农业温室气体减排、减缓气候变化具有重要意义^[3]。

近年来,在农田温室气体减排研究中,生物质炭因其含碳量高、难于分解、比表面积大、疏松多孔等特性,已成为研究农田固碳减排措施中的热点^[4-5]。生物

收稿日期:2014-08-23

基金项目:科技部国际科技合作重大专项(2011DFA30770);国家重大基础研究计划(2012CB417105);国家自然科学基金项目(41101247);湖南省自然科学基金项目(13JJ4114)

作者简介:刘杰云(1985—),女,河南安阳人,汉族,博士生,主要从事农田温室气体减排研究。E-mail:liujieyun66@163.com

* 通信作者:吴金水 E-mail:jswu@isa.ac.cn

质炭(Biochar)是生物质(包括秸秆、木材、畜禽粪便、固体垃圾等)在部分或完全缺氧的条件下热解炭化产生的一类具有高度芳香化结构的难溶性有机物^[6],具有高稳定性和高含碳量(一般可达60%以上)的特性,因此可长期封存于土壤中,并通过在土壤有机碳库中的缓慢循环,在减缓全球碳循环及气候变化中发挥重要作用^[7]。此外,生物质炭添加到土壤后,能明显改变土壤的部分理化及微生物学性质,进而影响温室气体排放^[8]。目前,关于生物质炭添加对农田温室气体排放的影响已有大量的研究^[8-12],这些研究表明生物质炭添加对不同温室气体排放的作用效果不尽相同,既有增加某一种或多种温室气体排放的,也有降低其排放的^[9,13-15]。因此,在评价生物质炭添加对温室气体排放的影响时,不但要考虑其对几种主要温室气体(CH_4 、 CO_2 和 N_2O)的单独效应,还要考虑其对这几种温室气体综合排放即净排放的影响。本文在综述生物质炭土壤添加对三种主要温室气体(CH_4 、 CO_2 和 N_2O)影响及其机制的基础上,进一步归纳了生物质炭添加对农田土壤温室气体净排放影响的最新进展,旨在为生物质炭应用于农业生产及温室气体减排提供科学依据。

1 生物质炭土壤添加对温室气体排放的影响及其机理

1.1 对 CO_2 排放的影响及其机理

生物质炭添加可以影响旱地土壤 CO_2 排放,既能增加土壤 CO_2 排放,也能抑制 CO_2 排放,或对 CO_2 排放无显著影响,这种影响效果因生物质炭的来源、制备过程以及土壤类型的不同而异^[9,16-17]。有研究表明,生物质炭添加可增加旱地土 CO_2 的排放^[9,18-19]。如在英国洛桑试验站旱地土中添加生物质炭会使 CO_2 排放增加,尤其在添加初期这种促进作用更明显^[18],引文作者将其归因于生物质炭本身含有的可溶性有机碳(DOC)的分解,且这部分DOC分解较快,一般发生在添加后的36 h^[19]。而Singh等^[20]的研究发现,生物质炭添加到土壤后,本身的有机碳并没有分解,而是促进了土壤原有有机碳(SOC)的分解,即生物质炭对SOC的正激发效应,但随着时间的延续,这种促进作用逐渐减弱。生物质炭巨大的表面积和孔隙度,可为微生物的生存和繁殖提供适宜的环境,且生物质炭本身含有大量的营养元素,可为微生物的生长提供营养^[21-22]。因此,可促进土壤原有有机质的分解^[23]。还有研究^[24]认为,生物质炭可通过提高土壤pH值、CEC值和土壤含

水量等提高微生物活性,从而增强土壤呼吸强度和 CO_2 排放。但也有研究^[17,25-26]表明,生物质炭添加抑制了旱地土 CO_2 排放。在河南封丘的旱地土中添加生物质炭和氮肥,与对照相比,来自于土壤SOC分解产生的 CO_2 排放降低了64.9%~68.8%^[16]。究其原因,可能有以下几种:(1)生物质炭本身含有一些有毒物质,对土壤微生物具有毒害作用^[27];(2)生物质炭巨大的表面积和孔隙度^[28],可吸附土壤中的微生物或酶,使其失活或钝化^[29];(3)生物质炭可吸附土壤中的营养元素或有机物,这些有机物包被于生物质炭的孔隙内,从而抑制其分解^[16],同时,生物质炭吸附有机物后,生物质炭内部的有机碳与周围的微生物隔绝,其分解也被限制^[31];(4)生物质炭施入土壤之后,可参与土壤团聚体的形成^[32],这些团聚体对有机碳和土壤微生物及酶也起到物理隔离的作用,从而抑制土壤原有有机质的分解^[16]。

与旱地土壤的结果一样,生物质炭添加到水稻土中,对 CO_2 排放的影响效果也不一致。如在湖南长沙典型的花岗岩母质发育的双季稻田土壤中添加小麦秸秆制成的生物质炭,与对照相比,添加后的前两个水稻季促进了 CO_2 排放^[14,33],但是在后续的休闲季, CO_2 排放并没有增加,甚至有所降低^[33]。与旱地土类似,添加生物质炭初期,生物质炭本身含有的可溶性有机碳分解,促进了 CO_2 的排放^[18-19],而后这种促进作用逐渐消失。但是,在浙江地区的水稻土中添加水稻秸秆和竹子制成的生物质炭抑制了 CO_2 排放^[16]。生物质炭本身呈碱性,添加到土壤中,可增加土壤pH值^[21],而土壤碱性越强,越有利于 CO_2 溶解于稻田水中,从而降低了 CO_2 向大气中的排放^[6]。然而,在太湖流域的水稻田中,添加小麦秸秆制成的生物质炭,对 CO_2 排放并无影响^[34],引文作者将其归因于生物质炭性质比较稳定,不易被微生物分解。

1.2 对 CH_4 排放的影响及其机理

旱地土 CH_4 排放量较少,不少研究结果表明,添加生物质炭对旱地土 CH_4 排放量影响不大^[13,35-36]。如在河南商丘的玉米田中添加小麦秸秆制成的生物质炭,与对照相比,并没有增加或者降低 CH_4 排放^[11]。同样,在加拿大旱地土中添加小麦秸秆制成的生物质炭,与对照相比, CH_4 排放也没有明显变化^[13]。但也有些研究发现,生物质炭添加会增加或者降低旱地土 CH_4 排放。如在德国旱地土中添加水热炭化制成的生物质炭,与对照相比 CH_4 排放显著增加^[35]。引文作者认为,在整个培养阶段,虽然保持了土壤总湿度不变,

但是添加生物质炭后可能会导致土壤水分分布不均,并在局部形成厌氧环境,从而有利于 CH_4 的排放。而在芬兰的小麦田中添加生物质炭, CH_4 的吸收增加了 96%^[25],研究者将其归因为生物质炭具有巨大的比表面积和孔隙度,添加到土壤中后可增加土壤的通气性和田间持水量,而有利于 CH_4 的氧化,从而降低 CH_4 排放^[25]。此外,生物质炭表面含有大量的微孔^[37],这些微孔中贮存着大量的氧气,对改善土壤的通气状况具有重要作用^[8]。

生物质炭对水稻土 CH_4 排放有较显著影响,但是在不同的土壤上其效果也不同。在江苏太湖地区的水稻-小麦轮作体系中,添加小麦秸秆制成的生物质炭 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,水稻季的 CH_4 排放量与对照相比增加了 30.6%^[36],增加的 CH_4 排放可能是由于生物质炭添加后,自身含有的可溶性有机碳可被微生物分解^[37],为 CH_4 的产生提供了底物,从而有利于 CH_4 排放^[38]。同样,在江苏典型的水稻种植区添加小麦秸秆制成的生物质炭,与对照相比, CH_4 排放增加了 34%~41%^[10],这可能是由于生物质炭本身含有一些有毒的化学物质,对 CH_4 氧化菌的活性具有抑制作用^[39]。而 Shen 等^[14]的研究表明,在湖南典型的双季稻田中添加小麦秸秆制成的生物质炭,添加的当季 CH_4 排放降低,但效果并不显著,而在后续的水稻季及休闲季中,生物质炭显著降低了 CH_4 排放^[33]。生物质炭呈碱性,可以中和土壤酸度,而 CH_4 氧化菌活性随着土壤 pH 的增加而增加^[40],因此添加生物质炭导致 CH_4 排放降低可能与生物质炭提高了土壤 pH 有关。同样,在浙江的水稻土中添加竹炭, CH_4 的排放量降低了 58.2%~91.7%^[41],引文作者认为,生物质炭添加增加了土壤孔隙度,改善了土壤通气状况^[8],抑制了产甲烷菌的活性^[6],而为甲烷氧化菌的生长提供了良好的环境^[42]。

1.3 对 N_2O 排放的影响及其机理

与 CO_2 和 CH_4 一样,旱地土中添加生物质炭对 N_2O 排放的影响也出现截然不同的作用效果。大量的研究^[8,11,43]表明,添加生物质炭可降低旱地土 N_2O 的排放。如在南京农业大学实验基地的水稻-小麦轮作体系中添加由水稻秸秆制成的生物质炭,小麦季 N_2O 排放降低了 53%^[44]。同样,在太湖地区的水旱轮作中,添加由小麦秸秆制成的生物质炭,小麦季 N_2O 排放也降低了 37.6%~41.2%^[36]。在河南商丘的玉米田中添加由小麦秸秆制成的生物质炭, N_2O 排放降低了 10.7%~41.8%^[11]。添加生物质炭,土壤 pH 的增加可促进 N_2O 还原酶(nosZ)活性的提高^[43,45],还可抑制参与

由 NO_3^- 和 NO_2^- 向 N_2O 转化的酶活性^[8]。如前文所述,添加生物质炭可增加土壤的通气性,从而抑制了反硝化作用产生的 N_2O 排放^[11]。此外,生物质炭可吸附固定土壤中的 NH_4^+ ^[46],使得反硝化作用的底物减少,从而降低 N_2O 的排放。也有研究^[47-48]表明,生物质炭可吸附 N_2O ,从而减少 N_2O 的排放。而在芬兰南部的小麦田中添加桦木制成的生物质炭,与对照相比,并没有影响 N_2O 排放^[25]。Yanai 等^[43]则认为添加生物质炭,只有在土壤由干转湿的过程中才有 N_2O 排放的显著差异,如果土壤湿度变化不大,则不会出现差异。

生物质炭添加对水稻土 N_2O 排放的影响也有不一致的效果。有研究表明,在水稻土中添加生物质炭,可增加 N_2O 排放。如在湖南长沙典型的双季稻田中,添加小麦秸秆制成的生物质炭,与对照相比, N_2O 排放增加了 13%~80%,引文作者将增加的 N_2O 排放归因于生物质炭本身含有的 NH_4^+ 或 NO_3^- 的作用^[14]。另一些研究^[8,10,44]则表明,添加生物质炭可抑制水稻土 N_2O 的排放。在江苏太湖地区的水稻田中,生物质炭与氮肥配施和单施生物质炭处理的 N_2O 排放分别降低了 40%~51%和 21%~28%^[10]。在水稻-小麦轮作体系中,添加由小麦秸秆制成的生物质炭,水稻季 N_2O 排放也降低了 39.5%~45.1%^[36]。生物质炭可能促进了 N_2O 还原酶(nosZ)活性^[43,45],抑制了 NO_3^- 和 NO_2^- 向 N_2O 转化的酶活性^[8]。此外,生物质炭添加还可通过提高 N 肥利用率,减少 N 肥损失^[10],从而减少 N_2O 的排放。

2 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响

农田是温室气体的排放源,同时也具有固碳的作用,研究农田温室气体排放的重点之一就是“净排放”的角度综合考虑其“固”与“排”的平衡^[49]。温室气体净排放可用净增温潜势(NGWP)、温室气体净排放(NGHGE)和温室气体排放强度(GHGI)三种方式来表征。NGWP 表征的是 CH_4 和 N_2O 在一定的时间尺度上的综合温室气体效应,而 NGHGE 包含了三种温室气体的综合效应, GHGI 则表征了单位产量的综合温室效应。生物质炭因其较强的稳定性,可长期封存在土壤中,具有土壤“碳汇”的作用,因而生物质炭添加可影响农田温室气体净排放。目前,有关生物质炭添加对温室气体净排放影响方面的研究仍较少。

2.1 生物质炭添加对农田温室气体净增温潜势的影响

由于 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 这三种温室气体具有不同的增温效应(Radiative forcing),它们对全球变暖的影

响也不同。根据 IPCC 报告^[50]提供的数据,在 100 a 的尺度上,单位质量 CH₄ 和 N₂O 的增温效应分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍。CH₄ 和 N₂O 是农田排放的两种主要温室气体,一般用 NGWP 即 CH₄ 和 N₂O 的综合温室气体效应来表示农田排放的这两种温室气体的温室气体效应。其计算公式为:

$$\text{NGWP} = \text{EM-CH}_4 \times 25 + \text{EM-N}_2\text{O} \times 298$$

式中:EM-CH₄ 为研究阶段内 CH₄ 的累积排放量;EM-N₂O 为研究阶段内 N₂O 的累积排放量。

从已发表的生物质炭添加试验结果来看,大多数的生物质炭添加具有显著降低农田 NGWP 的作用,通常其降幅相比对照最高可达 60%。由表 1 可以看出,在旱地土中添加生物质炭可降低 NGWP。如在墨西哥的一种种植小麦的砂壤土中添加 1.5%、3% 和 4.5% 由木材制成的生物质炭,与对照相比各生物质炭处理的 NGWP 分别降低了 2%、33% 和 39%,主要是源于生物质炭添加降低了土壤 N₂O 排放^[51]。同样,在河南商丘的冬小麦-夏玉米轮作体系中,无论是在小

表 1 生物质炭添加对农田温室气体净增温潜势(NGWP)、温室气体净排放(NGHGE)和单位产量温室气体净排放(GHGI)的影响结果汇总

Table 1 A summary of biochar effects on net global warming potential(NGWP), net greenhouse gas emission(NGHGE) and greenhouse gas emission intensity(GHGI) from croplands

农作物	添加量	对温室气体净排放的影响*			备注	文献
		NGWP	NGHGE	GHGI		
小麦	1.5%	-2%	—	—		Aguilar-Chávez et al. 2012 ^[51]
	3.0%	-33%	—	—		
	4.5%	-39%	—	—		
	10 t·hm ⁻²	—	-78%	-46%	水稻-小麦轮作体系	Zhang et al. 2013 ^[36]
	20 t·hm ⁻²	—	-121%	-92%		
	40 t·hm ⁻²	—	-110%	-88%		
玉米	20 t·hm ⁻²	-35%	—	-34%	2012 年,冬小麦-夏玉米轮作体系	Liu et al. 2014 ^[52]
	40 t·hm ⁻²	-35%	—	-37%		
	20 t·hm ⁻²	-10%	—	-24%	2010 年	Zhang et al. 2011 ^[11]
	40 t·hm ⁻²	-42%	—	-48%		
	20 t·hm ⁻²	-21%	—	-22%	2012 年,冬小麦-夏玉米轮作体系	Liu et al. 2014 ^[52]
	40 t·hm ⁻²	-32%	—	-38%		
水稻	20 t·hm ⁻²	53%	—	37%	2009 年,与氮肥配施	Zhang et al. 2010 ^[10]
	20 t·hm ⁻²	-13%	—	24%		
	40 t·hm ⁻²	56%	—	38%	2009 年,与氮肥配施	
	40 t·hm ⁻²	28%	—	41%		
	10 t·hm ⁻²	-19%	—	-35%	2010 年	Zhang et al. 2012 ^[34]
	20 t·hm ⁻²	-11%	—	-12%		
	40 t·hm ⁻²	-7%	—	-21%		
	5%	—	-52%	—	酸性土	Lai et al. 2013 ^[60]
	5%	—	-46%	—		
	10 t·hm ⁻²	—	-42%	-9%	水稻-小麦轮作体系	Zhang et al. 2013 ^[36]
	20 t·hm ⁻²	—	-13%	-3%		
	40 t·hm ⁻²	—	-29%	-4%		
	7.5 t·hm ⁻²	-0.5%	—	-6%	2011 年晚稻	Shen et al. 2014 ^[14]
	22.5 t·hm ⁻²	-24%	—	-24%		
	24 t·hm ⁻²	-3%	—	-11%	2012 年早稻	
	48 t·hm ⁻²	-40%	—	-36%		
	2 t·hm ⁻²	-31%	-1551%	-1452%	2012 年早稻、晚稻和休闲季	Liu et al. 2014 ^[33]
	48 t·hm ⁻²	-36%	-2936%	-2895%		
大豆	7.5 t·hm ⁻²	—	-41%	—		Mukherjee et al. 2014 ^[61]

注:* 相对于无生物质炭添加处理 NGWP、NGHGE 及 GHGI 增加或减少的比例(百分比)。

麦季还是玉米季,添加生物质炭均降低了土壤 N_2O 的排放,因而显著降低了 NGWP^[52]。而在水稻田中添加生物质炭并非都可降低 NGWP。如江苏太湖地区的水稻田中添加由小麦秸秆制成的生物质炭($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),降低了 N_2O 排放,但促进了 CH_4 的排放。添加生物质炭当季,NGWP 均有所升高^[10],而在第二年,添加生物质炭处理的 NGWP 开始表现出较对照降低的趋势^[34]。在湖南的双季稻田中也表现出类似的规律,添加生物质炭当季,2011 年晚稻季添加 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 2012 年早稻季添加 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物质炭处理并没有显著降低 NGWP^[14],但却显著降低了 2012 年全年累积(早稻、晚稻和休闲季)的 NGWP^[33]。这表明生物质炭添加到稻田中,发挥降低 NGWP 的作用需要一个过程,通过长期定位观测的结果来看,生物质炭添加是降低 NGWP 的一种良好措施。

2.2 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响

NGHGE 指的是农田排放或吸收的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 所产生的综合温室气体效应^[53]。农田温室气体净排放综合了农田温室气体排放效应及土壤固碳效应,故能够全面地反映出农田对温室效应的贡献或减缓效果。由于作物当季通过光合作用固定的、存在于作物籽粒和秸秆中的那部分碳不能长久保存,通常采用当季土壤有机碳的变化来表示当季农田的 CO_2 净排放。土壤有机碳的变化可以通过长期定位试验地土壤有机碳的变化来定量,也可以通过土壤有机碳的输入输出平衡来定量^[33,54]。NGHGE 可用下式来计算:

$$\text{NGHGE} = 25 \times \text{EM} - \text{CH}_4 + 298 \times \text{EM} - \text{N}_2\text{O} - \Delta \text{SOC} \times 44/12$$

该式中 ΔSOC 为研究期间土壤有机碳变化,它考虑了有机碳(如生物质炭-C)投入、前茬作物的根茬残留、作物净初级生产力、土壤异养呼吸、作物收获带走的 C 等^[49]。

人们在关注温室气体减排的同时,也认识到农田土壤具有巨大的固碳潜力。虽然在不同的种植体系添加生物质炭对 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放影响不一致^[14,36,52],但由于增碳作用较强,生物质炭添加一般可降低 NGHGE。如在江苏太湖地区的稻麦轮作体系中,与对照相比,添加生物质炭降低了 NGHGE,主要是由于添加的生物质炭本身固定了碳和降低了土壤 N_2O 的排放^[36]。此外,在湖南长沙的双季稻田中,添加生物质炭处理($24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与对照相比,全年(早稻季、晚稻季和休闲季)的 NGHGE 降低了 1551%~2936%。这主要是由于添加生物质炭后,生物质炭本身含有的碳分解很少,大部分还仍固存于土壤中,而且

CH_4 排放也较对照有显著的降低^[33],表明生物质炭可作为一种固碳减排措施应用于农田生态系统。

2.3 生物质炭添加对农田温室气体排放强度的影响

GHGI 是指单位作物产量的温室气体净排放(或净增温潜势)^[34,55],其计算公式为:

$$\text{GHGI} = \text{NGHGE}(\text{或 NGWP}) / \text{产量}$$

它是温室效应评价的综合指标,与 NGHGE、NGWP 以及其他评价标准相比,其突出的优势在于将温室效应与作物经济产出相结合,平衡了系统的环境效应与经济效益,因而更有利于决策者制定相关的政策^[56]。

生物质炭添加不仅可影响 NGHGE 或 NGWP,还可影响作物产量。唐光木等^[57]在新疆的玉米田中添加由小麦秸秆制成的生物质炭增加了玉米的生物量,产量增加了 1.31%~2.75%。Albuquerque 等^[58]发现,添加生物质炭后,小麦的产量与对照相比增加了 20%~30%。不仅旱地土如此,在水田中也发现了类似的增产效应。在江西进贤的红壤性水稻土中添加由小麦秸秆制成的生物质炭,水稻产量增加了 5.18%~7.95%^[59]。因此,添加生物质炭可影响 GHGI。如生物质炭添加到冬小麦-夏玉米轮作体系中,添加当季玉米的产量显著增加,而在后续的 4 个生长季,作物产量并没有明显的变化,但因 NGWP 降低,故小麦季和玉米季的 GHGI 均表现出一定的下降趋势^[33]。在水稻-小麦轮作体系中,添加由小麦秸秆制成的生物质炭后,水稻和小麦的产量与对照相比都有所增加,且 NGHGE 降低,故 GHGI 也较对照降低^[36]。但在水稻田中,生物质炭对 GHGI 降低作用的发挥需要一个时间过程。如在江苏太湖地区的单季稻田中添加生物质炭,添加当季,由于生物质炭增加了 NGWP,因而其 GHGI 也较对照增加^[10],但在后续的试验中,生物质炭处理的 GHGI 逐渐表现出降低的趋势^[34]。在湖南的双季稻田中添加生物质炭,对当季水稻产量影响不大,虽然其 GHGI 较对照有所降低,但并不显著^[14]。而生物质炭添加一年后,与对照相比,虽然对水稻产量仍无显著影响,但综合考虑生物质炭的固碳效应与对温室气体(CH_4 和 N_2O)的影响,添加生物质炭显著降低了 NGHGE,因而也显著降低了 GHGI^[33]。

3 结论及展望

综上所述,添加生物质炭可影响农田温室气体排放。生物质炭可通过本身可溶性有机碳的分解以及对土壤原有机碳的激发效应促进 CO_2 排放,但由于生物质炭具有较大的表面积和较强的吸附作用,也可能抑

制土壤有机碳的分解而降低土壤 CO_2 的排放。添加生物质炭可通过影响土壤理化性质(如 DOC、pH、通气性等)、产甲烷菌及甲烷氧化菌的群落组成、丰度及活性来影响农田土壤 CH_4 的排放。添加生物质炭可能对参与硝化和反硝化反应的底物及功能微生物产生影响,进而影响 N_2O 排放,此外生物质炭本身含有的 N 也会影响 N_2O 排放。总之,生物质炭添加对旱地土和水稻土 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放的影响因生物质炭的来源和制备过程以及土壤类型的不同而呈现截然不同的效果。

生物质炭通过对温室气体排放及作物产量的影响,也可影响 NGWP、NGHGE 及 GHGI。不同种类的生物质炭添加到不同的土壤中,对不同作物的 NGWP 影响也不同,但大多数的研究表现出降低的趋势。生物质炭因为其特殊的稳定性,不易分解,可长期封存在土壤中,增加土壤有机碳库,因此添加生物质炭可降低农田 NGHGE。鉴于生物质炭可降低 NGWP(或 NGHGE),并有一定的增产效果,生物质炭也可进一步降低农田的 GHGI。

针对生物质炭添加对温室气体净排放的影响,今后需要进一步加强的研究方向有以下几个方面:

(1)在我国典型农区开展生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响试验。目前,关于生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响仅在我国东部的稻麦轮作区、中部的双季稻区开展,为探明生物质炭添加对我国其他典型农区农田固碳减排的效果,有必要在这些农区开展生物质炭添加下的农田温室气体净排放研究。

(2)针对我国主要土壤类型开展生物质炭添加对温室气体排放影响的机理研究。由于生物质炭添加到土壤中后,往往因土壤类型的不同而对土壤物理、化学和生物学性质产生特定的影响,从而对温室气体排放也可能产生不同的影响。目前,在我国开展的生物质炭添加对农田土壤温室气体排放影响的机理研究还很少,有必要从土壤物理、化学和生物学角度来开展这方面的机理研究,为生物质炭的农田温室气体减排应用提供理论依据。

(3)将生物质炭生产、运输过程的温室气体排放纳入到净排放计算过程。由于生物质炭并不属于作物生产必需的生产资料,将农田添加生物质炭作为一种温室气体减排措施时,生物质炭生产、运输过程中产生的温室气体排放也应纳入到净排放的计算过程。今后,有必要针对我国特定的生物质炭生产和运输过

程,对其温室气体排放进行定量研究。

参考文献:

- [1] Smith P, Martino D, Agriculture[R]//Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 王勤花, 曲建升, 张志强, 等. 气候变化减缓技术: 国际现状与发展趋势[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 322-327.
WANG Qin-hua, QU Jian-sheng, ZHANG Zhi-qiang, et al. International climate change mitigation technologies: Advances and outreaches[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(6): 322-327.
- [3] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463.
ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459-2463.
- [4] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [5] 陈温福, 张伟明, 孟 军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 821-828.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Biochar and agro-ecological environment: Review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821-828.
- [6] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 930-939.
- [7] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [8] Zwieter V L, Singh B, Joseph S, et al. Biochar reduces emissions of non- CO_2 GHG from soil[M]//Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management. London: Earthscan Publications, 2009: 227-249.
- [9] Troy S M, Lawlor P G, O'Flynn C J, et al. Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 60: 173-181.
- [10] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [11] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2011, 351(1-2): 263-275.
- [12] 邱虎森, 王翠红, 盛 浩. 生物炭对土壤温室气体排放影响机制探讨[J]. 湖南农业科学, 2012, 11: 49-52.
QIU Hu-sen, WANG Cui-hong, SHENG Hao. Influencing mechanisms of biochar on emission of greenhouse gas from soils[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012, 11: 49-52.
- [13] Wu F P, Jia Z K, Wang S G, et al. Contrasting effects of wheat straw

- and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil[J]. *Biology of Fertility and Soils*, 2013, 49(5):555–565.
- [14] Shen J L, Tong H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188:264–274.
- [15] Spokas A K, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3:179–193.
- [16] 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 & Biochemistry*, 2014, 76:12–21.
- [17] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(6):1169–1179.
- [18] 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 & Biochemistry*, 2011, 43(11):2304–2314.
- [19] 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 & Biochemistry*, 2011, 43(8):1723–1731.
- [20] Singh B P, Cowie A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil[R]. Scientific Reports, 2014, Doi: org/10.1038/srep03687.
- [21] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):779–785.
- YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779–785.
- [22] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 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 Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. 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.
- [23] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon; downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4):1366–1379.
- [24] 何飞飞, 荣湘民, 梁运珊, 等. 生物炭对红壤菜田土壤理化性质和 N₂O、CO₂ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1893–1900.
- HE Fei-fei, RONG Xiang-min, LIANG Yun-shan, et al. Effects of biochar on soil physiochemical properties and N₂O, CO₂ emissions from vegetable-planting red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1893–1900.
- [25] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1):309–313.
- [26] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanism and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 32:1485–1498.
- [27] Liu Q S, Liu Y, Show K Y, et al. Toxicity effect of phenol on aerobic granules[J]. *Environmental Technology*, 2009, 30(1):69–74.
- [28] 李坤权, 李烨, 郑正, 等. 高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能[J]. 环境科学, 2013, 34(1):328–335.
- LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, et al. Preparation, characterization and adsorption performance of high surface area biomass based activated carbons[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1):328–335.
- [29] Zimmerman A. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4):1295–1301.
- [30] 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.
- [31] Kasozi G N, Zimmerman A R, Nkedi-Kizza P, et al. Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (biochars)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16):6189–6195.
- [32] Liang B. Black carbon Biogeochemistry in soils[M]. New York: Cornell University, 2008.
- [33] Liu J Y, Shen J L, Li Y, et al. Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 65:30–39.
- [34] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, 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 Crop Research*, 2012, 127:153–160.
- [35] Malghani S, Gleixner G, Trumbore S E. Chars produced by slow pyrolysis and hydrothermal carbonization vary in carbon sequestration potential and greenhouse gases emissions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 62:137–146.
- [36] Zhang A F, Bian R J, Hussaina Q, et al. Change in net global warming potential of a rice-wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 173:37–45.
- [37] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):127–137.
- ZHANG Ming-kui, Bayou W D, TANG Hong-juan. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):127–137.
- [38] 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 & Biochemistry*, 2011, 43(9):1768–1778.
- [39] 冯虎元, 程国栋, 安黎哲. 微生物介导的土壤甲烷循环及全球变化研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4):411–419.
- FENG Hu-yuan, CHENG Guo-dong, AN Li-zhe. Microbial mediated methane cycle in soils and global changes: A review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4):411–419.
- [40] Hütsch B W, Webster C P, Powlson D S. Methane oxidation in soil as

- affected by land use, soil pH and N fertilization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(12):1613–1622.
- [41] 王欣欣, 邹平, 符建荣, 等. 不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1):198–204.
WANG Xin-xin, ZOU Ping, FU Jian-rong, et al. Effects of bamboo biochar amendments on methane and nitrous oxide emission from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):198–204.
- [42] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46:80–88.
- [43] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2):181–188.
- [44] Wang J Y, Pan X J, Liu Y L, et al. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1–2):287–298.
- [45] Zwieter L V, Singh B P, Kimber S W L, et al. An incubation study investigating the mechanisms that impact N₂O flux from soil following biochar application[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191:53–62.
- [46] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11:403–427.
- [47] Cornelissen G, Rutherford D W, Arp H P H, et al. Sorption of pure N₂O to biochars and other organic and inorganic materials under anhydrous conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14):7704–7712.
- [48] Cayuela M L, Zwieter L V, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191:5–16.
- [49] 黄坚雄, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田温室气体净排放研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8):87–94.
HUANG Jian-xiong, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. Research progress of net emission of farmland greenhouse gases[J]. *China Population, Researches and Environment*, 2011, 21(8):87–94.
- [50] Forster P, Ramaswamy V. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [51] Aguilar-Chávez A, Díaz-Rojas M, Cárdenas-Aquino M R, et al. Greenhouse gas emissions from a wastewater sludge-amended soil cultivated with wheat (*Triticum* spp. L.) as affected by different application rates of charcoal[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52:90–95.
- [52] Liu X Y, Ye Y X, Liu Y M, et al. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China[J]. *Agricultural Systems*, 2014, 129:22–29.
- [53] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in Northeastern Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4):1584–1598.
- [54] Jia J X, Ma Y C, Xiong Z Q. Net ecosystem carbon budget, net global warming potential and greenhouse gas intensity in intensive vegetable ecosystems in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 150:27–37.
- [55] Ma Y C, Kong X W, Yang B, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164:209–219.
- [56] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):210–216.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):210–216.
- [57] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1797–1802.
TANG Guang-mu, GE Chun-hui, XU Wan-li, et al. Effect of applying biochar on the quality of gray desert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9):1797–1802.
- [58] Albuquerque J A, Salazar P, Barron V, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(3):475–484.
- [59] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物质炭对小麦产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3):288–293.
QU Jing-jing, ZHENG Jin-wei, ZHENG Ju-feng, et al. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3):288–293.
- [60] Lai W Y, Lai C M, Ke G R, et al. The effects of woodchip biochar application on crop yield, carbon sequestration and greenhouse gas emissions from soils planted with rice or leaf beet[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, 44:1039–1044.
- [61] Mukherjee A, Lal R, Zimmerman A R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487:26–36.