

刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 696-706.
LIU Cheng, LIU Xiao-yu, ZHANG Xu-hui, et al. Evaluating the effects of biochar amendment on crop yield and soil carbon sequestration and greenhouse gas emission using meta-analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 696-706.

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

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要:通过搜集公开发表的文献资料,运用整合分析方法(Meta-analysis)研究生物质炭施用对我国农作物产量和土壤固碳减排潜力的影响。结果表明,生物质炭施用显著提高了作物产量,平均增产幅度为15.1%,其中旱作作物平均增产16.4%,水稻增产10.4%。试验土壤和生物质炭材料本身的理化特性与田间管理方式均会影响生物质炭施用下作物的增产幅度。土壤酸碱度和质地是影响增产幅度的重要因素:强酸性土壤中施用生物质炭作物增产幅度显著高于中性和碱性土壤;黏土和砂土中施用生物质炭作物增产幅度显著高于壤土。生物质炭生产过程中的炭化温度对作物产量有重要影响,当炭化温度高于550℃时,作物增产不显著。生物质炭施用显著降低了农田土壤氧化亚氮(N₂O)排放量和稻田甲烷(CH₄)排放量,平均降低幅度分别为13.6%和15.2%。土壤酸碱度和质地显著影响N₂O减排幅度;生物质炭在中性和碱性土壤中的减排效果显著高于酸性土壤,而在强酸性土壤中N₂O减排效果不显著;不同质地土壤中N₂O的减排效果表现为壤土>砂土>黏土,壤土减排量达33.9%。氮肥施用量高于150 kg·hm⁻²时,N₂O减排效果显著。稻田土壤施用生物质炭N₂O减排效果优于旱地。土壤质地和酸碱度显著影响稻田CH₄排放对生物质炭输入响应,强酸性或砂性土壤中施用生物质炭CH₄减排效果明显,其减排幅度分别为46.1%和25.9%。我国农田中施用生物质炭,有利于达到增产和固碳减排的效果。今后生物质炭的农田施用应优先选择施用到酸性、黏性或砂性等肥力较差的土壤中,优先选择旱作农田;生物质炭制备时应将炭化温度控制在550℃以下。

关键词:生物质炭;整合分析;作物产量;温室气体;田间试验

中图分类号:S156.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)03-0696-11 doi:10.11654/jaes.2018-0490

Evaluating the effects of biochar amendment on crop yield and soil carbon sequestration and greenhouse gas emission using meta-analysis

LIU Cheng, LIU Xiao-yu*, ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing, PAN Gen-xing

(Institute of Resources, Ecological and Environment of Agricultural, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In this study, a meta-analysis was conducted to investigate the effect of biochar amendment on crop yield, soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation potential. The dataset was derived from field studies conducted in mainland China. The papers were published in either Chinese or English. This study showed that biochar soil amendment significantly increased crop yield by increased crop yield by 15.1% on average, whereas rice yield was increased by 10.4% and the grain yield of dry land crops was increased by an average of 16.4%. The changes in grain yield following biochar amendment were influenced by soil and biochar properties as well as soil management practices. With regards to experimental soils acidity and texture were important factors influencing the response of crop yield to biochar amendment. Substantially greater yield increases were observed in soil with very low pH and clayey and sandy texture. In addition to soil

收稿日期:2018-04-13 录用日期:2018-08-08

作者简介:刘成(1993—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环与全球变化研究。E-mail:chengliu93@aliyun.com

*通信作者:刘晓雨 E-mail:xiaoyuliu@njau.edu.cn

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAC02B01);国家自然科学基金项目(41501310,41471193);联合国生物质炭与土壤可持续管理项目(B4SS)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAC02B01);The National Natural Science Foundation of China(41501310,41471193);The Biochar and Soil Sustainable Management Program of United Nations(B4SS)

properties, biochar properties also influenced the response of crop yield to biochar amendment. No yield increases were observed when agricultural soils were amended with biochar produced at a high temperature ($>550\text{ }^{\circ}\text{C}$). Biochar amendment decreased nitrous oxide (N_2O) emission by 13.6% in dry crop land and decreased methane (CH_4) emission from paddy soil by 15.2%. Soil acidity and texture were found to be important factors that regulate the response of N_2O emission to biochar amendment. In strongly acid soils, the addition of biochar had no effect on N_2O emission, whereas in neutral or alkaline soils, biochar significantly decreased N_2O emission. In terms of soil texture, the diminishing effects of biochar were in the order of loam $>$ sand $>$ clay. In loamy soils, biochar amendment decreased N_2O emission by 33.9%. Nitrous oxide emission decreased significantly in soils amended with biochar under a nitrogen fertilizer application rate higher than $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. In rice paddies, biochar amendment decreased N_2O emission by 24.4%, which was significantly higher than the value in dry cropland soils. Soil texture and pH significantly affected the response of CH_4 emission to biochar amendment. In strongly acidic or sandy soils, biochar amendment markedly decreased the emission of CH_4 . In soils with a sandy texture, biochar decreased CH_4 emission by 25.9%. In conclusion, our study shows that biochar soil amendment can increase crop yield and decrease greenhouse gas emissions in China's croplands. In the future, we suggest that it will be preferable to apply biochar to soils with lower fertility, such as acidic, clayey, or sandy soils, and to dry crop land rather than paddy soils. Furthermore, biochar produced at a pyrolyzing temperature lower than $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ would be more suitable for the amendment of agricultural soils.

Keywords: biochar; meta-analysis; crop yield; greenhouse gas; field experiment

近年来,将作物秸秆、畜禽粪便、树木枝条等农林废弃物经低温炭化裂解技术制成生物质炭已成为一种新的废弃物处理途径^[1]。将制成的生物质炭再施用到农田土壤中以研究其对土壤肥力、作物生产力及温室气体排放的影响是国际社会关注的热点。生物质炭研究起源于南美洲巴西亚马逊河流域一种非地带性土壤(Terra Preta)的发现。在当地,研究人员发现此种土壤不仅富含大量有机碳,而且还具有较高的养分保持能力,故其比周边土壤有更高的生产力^[2-3]。之后,众多学者提出在全球范围内复制Terra Preta土壤,以应对当前全球气候变化、土壤肥力和质量下降等现实问题^[4-5]。复制Terra Preta土壤的核心内容是将有机废弃物炭化,然后再将其施入到农田土壤中。已有研究也证实,生物质炭施用能够显著改善土壤肥力、增加作物产量^[6-9],同时降低农田温室气体排放^[10-13]。因此,生物质炭化还田在提高土壤质量、增加粮食产量以及应对全球气候变化等方面具有重大意义。

我国是农业大国,农业生产面临多重压力。当前形势下,我国农业生产既要保证粮食安全,还要承担应对气候变化、减少温室气体排放的任务。同时,如何有效利用农业生产过程中产生的作物秸秆,减少其对环境的负面影响也是我国农业与环境领域面临的重大挑战。据估算,2016年我国农作物秸秆生成量达9亿t^[14]。将这些秸秆热裂解制成生物质炭再归还到农田土壤中,既处理了秸秆废弃物又促进农作物增产,同时减少温室气体排放,是一条实现绿色可持续

农业的新途径^[15],已于2017年被列入国家十大秸秆处理模式之一^[16]。准确评估生物质炭在作物增产和温室气体减排等方面的潜力是生物质炭大面积推广应用的重要前提。

为了深入探讨生物质炭施用对农田作物产量的影响,Biederman等^[7]、Liu等^[8]和Jeffery等^[17]对前人的研究结果进行了总结,并采用整合分析的方法(Meta-analysis)定量评估了生物质炭施用对作物产量的影响。之后,Cayuela等^[10]和He等^[11]又采用该方法对生物质炭施用后农田土壤温室气体排放变化进行了评估。这些研究结果表明,在全球范围内施用生物质炭可提高作物产量8.4%~15%、降低温室气体排放30%~54%。但这些研究都是基于全球数据库,而对我国的数据分析报道较少。与欧美等发达国家相比,我国农业生产具有肥料、农药等农资投入高、复种指数高、土地利用强度大等特点;且我国幅员辽阔,土壤类型、气候类型多样化,这些因素均可能影响作物产量和温室气体排放对生物质炭施用的响应。在我国开展的一些研究结果(中文文献)未被列入Biederman等^[7]、Cayuela等^[10]和Jeffery等^[17]的研究中,且随着时间推移,有越来越多的文献陆续发表,因此有必要重新评估生物质炭施用对我国农作物产量和土壤固碳减排潜力的影响。

本研究通过收集整理在我国境内开展的田间试验结果(公开发表的中英文期刊资料),运用整合分析的方法,评估生物质炭施用对我国农作物产量和固碳减排潜力的影响,并找出关键影响因素,为我国生物质

炭热裂解产业化和生物质炭合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来源于公开发表在国内外的期刊论文,中文文献来源于“中国知网”,英文文献来源于“Web of Science”。中文文献筛选方法为:分别输入“生物黑炭”“生物炭”或“生物质炭”三个关键词,依照“篇名”进行文献检索。英文文献筛选方法为:在“Web of Science”中输入关键词“Biochar”和“China”进行检索。文献检索截止日期为2017年12月20日。为了避免遗漏,对已经获得的文献中的参考文献进一步核实,筛出符合要求的文献。依照下列筛选条件对检索到的文献进行逐一核实、校对、筛选:

(1) 试验均为在我国境内开展的田间试验,试验中必须有严格的处理和对照:处理组为施用生物质炭,对照组为不施生物质炭,其他变量一致。

(2) 文献中详细描述试验地点、土壤基本性质、试验设计和生物质炭施用量等基本信息。

(3) 至少报道作物产量或温室气体排放,其中温室气体排放观测时间跨度至少为整个作物生长期。

(4) 对于同一试验,有不同年限作物产量报道时,最后进入整合分析的数据是对多年数据的加权平均值。

根据以上标准,最终获得173篇文献,其中报道作物产量的文献117篇,报道温室气体排放的文献44篇。

1.2 数据库建立

从所得文献中逐一提取以下参数:

(1) 作物生长:作物产量、作物类型等。

(2) 试验前土壤基本性质:土壤pH、土壤全氮含量、土壤有机碳含量、土壤质地、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、阳离子交换量及土壤容重等。

(3) 生物质炭:生物质炭生产原料、炭化温度、生物质炭基本性质(pH、全氮、有机碳含量)、生物质炭施用量。

(4) 温室气体:CH₄排放(稻田)、N₂O排放(水田和旱地)、全球增温潜势(GWP)。

(5) 其他:水田或旱地、试验年限、氮肥施用量、试验地点等。

当试验结果以图的形式出现在文献中时,通过Grufula 2.10软件进行数据获取。

1.3 整合分析方法

本研究采用响应比(Response ratio,简称为R)作

为统计量,以比较生物质炭施用对作物产量和温室气体排放的影响。为方便统计检验,使用响应比的自然对数(lnR)作为效应值^[18],即:

$$\ln R = \ln \frac{TR}{CK}$$

式中:TR和CK分别是处理组(施用生物质炭)和对照组(不施用生物质炭)的平均值。lnR等于0,说明施用生物质炭并没有引起处理组与对照组参数之间的差异;lnR大于0,说明施用生物质炭产生了正效应;lnR小于0,表明产生负效应。如果TR和CK均符合正态分布且都大于0时,则lnR也近似满足正态分布,其均值则近似等于实际响应比,其方差为:

$$\theta = \frac{S_{TR}^2}{n_{TR} TR} + \frac{S_{CK}^2}{n_{CK} CK}$$

式中:S_{TR}和S_{CK}分别表示处理组和对照组的标准差;n_{TR}和n_{CK}分别表示处理组和对照组的样本容量。本研究中,全部计算在MetaWin 2.0软件上运行^[19],采用随机效应模型。最终的响应比是由各个独立试验点响应比的加权平均计算得出,其权重(w_i)为R_i方差(θ_i)的倒数。响应比R_i的95%置信区间为:

$$95\% CI = R \pm 1.96S$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}}$$

如果95%置信区间与0重叠,则可以认为处理组和对照组的差异不显著;如果95%置信区间没有与0重叠,则认为它们的差异显著^[20-21]。为方便说明,在结果分析时将lnR转化为相对百分率([R-1]×100%)^[22-23]。若R=1,即百分率为0,表明试验组和对照组没有差异;若R>1,则说明产生了正效应;若R<1,则说明产生了负效应。为了比较不同因素对作物产量和温室气体排放的影响,对所有变量进行分组,具体分组方法见表1。

1.4 数据计算与统计分析

本文采用随机效应模型(Random-Model)分析比较不同组间的差异,如果组间效应P值小于0.05,认为其组间有显著差异。数据处理在MetaWin 2.0上进行,图表制作在Microsoft Excel 2010中进行。

2 结果与分析

2017年12月之前在我国开展的生物质炭施用试验研究点基本覆盖了我国主要农业产区,主要分布在我国中部和东部地区,涉及亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候和热带季风气候,涵盖的土

壤类型有红壤、棕壤、褐土、黑土等。试验作物类型以三大粮食作物和蔬菜为主,还有部分经济作物,如油菜、大豆等(表1)。生物质炭施用量主要集中在0~40 t·hm⁻²,平均施用量22.63 t·hm⁻²。用于试验研究的生物质炭主要原材料是水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆,炭化温度集中在350~550 ℃。

2.1 土壤性质

施用生物质炭后,土壤理化性质发生显著变化(表2)。土壤pH平均比对照提高了0.29个单位;土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量分别比对照提高42.34%、12.27%、19.73%和41.57%;土壤容重平均降低6.05%。而生物质炭施用对土壤阳离子交换量无显著影响。

2.2 作物产量

生物质炭施用后作物产量平均增加15.06%。试验土壤本身的理化性质、生物质炭性质及用量和水肥管理等因素影响了生物质炭施用后作物产量的变化幅度(图1~图3)。

2.2.1 土壤理化性质对产量的影响

生物质炭施用于强酸性土壤中作物增产幅度最大,为33.63%,显著高于酸性和碱性土壤(图1);中性土壤中施用生物质炭增产幅度最小,为9.34%。在土壤有机碳含量低(<5 g·kg⁻¹)的土壤中施用生物质炭,作物的增产幅度最大,为24.65%;而在有机碳含量高于20 g·kg⁻¹的土壤中施加生物质炭作物增产幅度最小,为8.94%。土壤质地也影响作物增产幅度,生物质炭施用于黏土中作物增产幅度最大,为23.73%,其次为砂土,壤土中施用生物质炭作物增产幅度最小。土壤C/N对生物质炭施用后作物增产幅度无显著影响。

2.2.2 生物质炭特性对产量的影响

生物质炭生产原料对农作物的产量有一定影响,除棉花秸秆炭外其他原料来源的生物质炭都有显著增产效果(图2)。在三大粮食作物的秸秆生物质炭中小麦秸秆生物质炭增产幅度最大,为16.79%。生物质炭制备时的炭化温度影响作物产量变化幅度,炭化温度在550 ℃以下时,能够显著增产,当炭化温度高于550 ℃时,生物质炭施用无显著增产效果。生物质炭本身的pH也会影响作物的产量,当pH>9时生物质炭增产效果显著,当pH<9时增产效果相对较小。生物质炭C/N在70~90之间时,作物增产效果最明显,当生物质炭的C/N低于70或高于90时作物增产幅度都降低。

2.2.3 田间管理措施对产量的影响

田间水分管理方式和氮肥施用量显著影响生物质炭施用后作物产量的变化幅度(图3)。生物质炭施用于旱作农田时作物产量增加幅度为16.4%,显著高于水田中水稻产量的增加幅度(10.42%)。对于氮

表2 生物质炭施用对土壤性质的影响

Table 2 The effects of biochar amendment on soil properties

土壤性质	平均变化量/%	95%置信区间	数据对数	P值
pH	2.55	2.20~2.90	298	<0.000 1
有机碳	42.34	39.60~45.13	343	<0.000 1
全氮	12.27	10.24~14.34	253	<0.000 1
容重	-6.05	-6.96~-5.13	170	<0.000 1
有效磷	19.73	14.96~24.69	161	0.000 5
速效钾	41.57	34.05~49.52	137	<0.000 1
阳离子交换量	7.02	4.20~9.92	37	0.175
C/N	25.84	23.16~28.58	219	<0.000 1

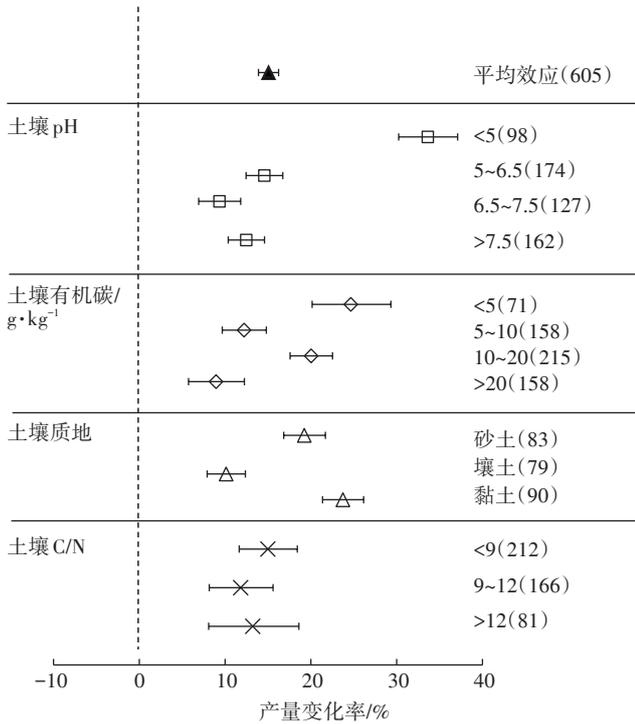
表1 研究变量分组

Table 1 Data grouping of the variables in this study

分类内容	分组							
作物类型	水稻	小麦	玉米	豆类作物	油料作物	蔬菜类	块根块茎类	
原料种类	水稻秸秆	玉米秸秆	小麦秸秆	花生秸秆和壳	棉花秸秆	竹子	园林树枝	NO
炭化温度/℃	0~350	350~550	>550	NO				
土壤pH	<5	5~6.5	6.5~7.5	≥7.5	NO			
施氮总量/kg N·hm ⁻²	0	<150	150~250	>250	NO			
土壤质地	砂土	壤土	黏土	NO				
土壤有机碳/g·kg ⁻¹	<5	5~10	10~20	>20	NO			
生物质炭pH	7~8	8~9	9~10	>10	NO			
生物质炭施用量/t·hm ⁻²	<10	10~20	20~40	>40				
生物质炭C/N	<50	50~70	70~90	90~110	>110	NO		

注:NO表示搜集的文献中未提供参数。

Note:NO indicate that no parameters were provided in the literature.



图中接点和横线分别代表平均值和95%置信区间,括号内的数值代表数据对数。下同

The contact and horizontal lines in the figure represent the mean and 95% confidence intervals, respectively, and the values in parentheses represent the number of data pairs. The same below

图1 试验前土壤基本理化性质对生物质炭施用后作物产量变化的影响

Figure 1 The effects of the basic soil physical and chemical properties on the yield response to biochar addition

肥的施用,在不施氮肥情况下施加生物质炭会显著增加作物的产量,但其增产幅度远低于生物质炭与氮肥配合施用下作物的增产幅度。在高施肥量(>250 kg·hm⁻²)下,作物的增产效果最好,高达16.55%,低施肥量下(0~150 kg·hm⁻²)效果次之,对于中等施肥量处理,增产的效果相对较低。

2.3 温室气体排放

生物质炭施用降低了农田N₂O排放量、稻田CH₄排放量和GWP,平均降低幅度分别为13.6%、15.2%和16.1%(图4)。试验土壤本身的理化性质、生物质炭性质及用量和水肥管理显著影响生物质炭施用后N₂O和CH₄的排放量(表3和表4)。

2.3.1 生物质炭对氧化亚氮(N₂O)排放量的影响

生物质炭施用于酸性、中性和碱性土壤中均显著降低了N₂O排放,但对强酸性土壤中N₂O排放无显著影响(表3)。生物质炭施用于中性土壤中减排幅度最大,为29.55%,其次为碱性土壤,酸性土壤中的减排幅度最小。在砂土和壤土中施用生物质炭显著降

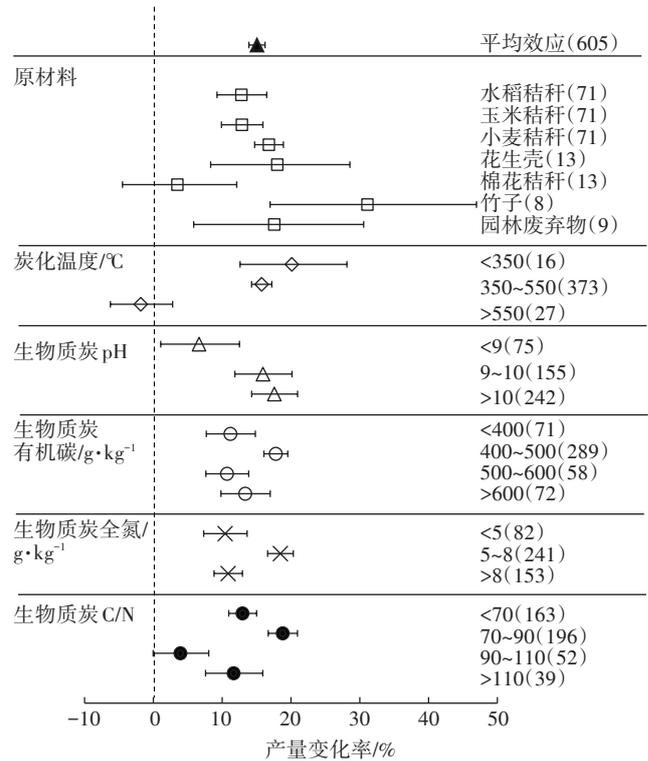


图2 生物质炭性质、原料来源及炭化温度对作物产量的影响

Figure 2 The effects of biochar basic properties, feedstock types and pyrolyzing temperature on crop yield

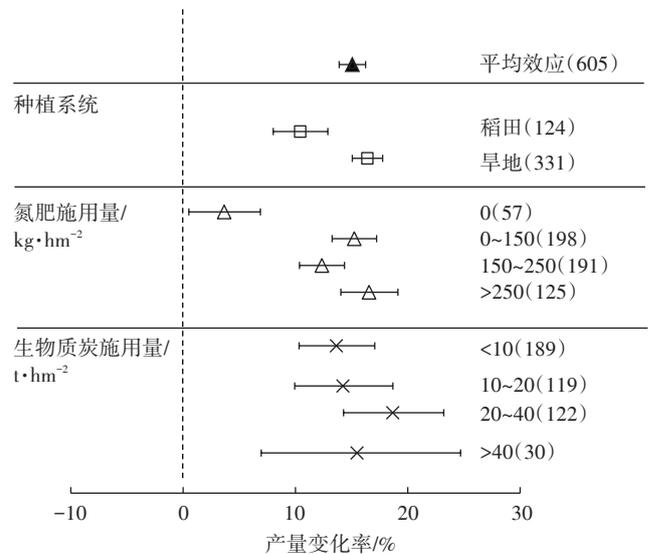


图3 田间水分管理方式、氮肥施用量和生物质炭施用量对作物产量的影响

Figure 3 The effects of water management, nitrogen fertilizer application rate and biochar amendment rate on crop yield

低了N₂O排放量,其中在壤质土壤中效果最佳,减排达到33.86%。随着土壤C/N增加,生物质炭施用后N₂O减排幅度呈增加趋势。生物质炭本身pH和C/N

显著影响 N₂O 减排幅度(表3)。当生物质炭 pH 小于 9 时 N₂O 减排幅度最大,为 27.75%,pH 在 9~10 之间的生物质炭的 N₂O 减排幅度最小。当生物质炭 C/N 小于 70 时,减排幅度最大,为 40.51%;当生物质炭 C/N 在 70~90 之间减排幅度最小。在不施肥情况下,施加生物质炭会显著增加农田土壤 N₂O 排放量,平均增加 23.2%;而低施肥量(0~150 kg·hm⁻²)下,生物质炭对 N₂O 排放量的影响不显著,中高施肥量(>150 kg·hm⁻²)下,显著降低了 N₂O 排放量。农田水分管理方式也是影响 N₂O 排放量的重要因素,生物质炭施用到

表3 土壤理化性质、生物质炭特性及田间管理对土壤 N₂O 排放的影响

Table 3 The effects of soil and biochar properties and field management on the change of N₂O emission

项目	平均变化量/%	95% 置信区间	样本量	
土壤 pH	<5	6.21	-3.32~16.68	21
	5~6.5	-7.14	-12.36~-1.61	49
	6.5~7.5	-29.55	-33.43~-25.45	57
	>7.5	-18.61	-25.72~-10.82	20
土壤有机碳/ g·kg ⁻¹	<5	-21.00	-32.62~-7.37	16
	5~10	-18.65	-25.79~-10.83	43
	10~20	-16.05	-20.45~-11.40	131
	>20	-32.69	-43.77~-19.42	13
土壤质地	砂土	-23.61	-33.25~-12.57	35
	壤土	-33.86	-41.28~-25.50	44
	黏土	-4.56	-15.44~7.71	42
土壤 C/N	<9	-12.69	-19.61~-5.17	55
	9~12	-22.93	-27.99~-17.51	81
	>12	-26.15	-35.51~-15.44	21
生物质炭 pH	<9	-27.75	-32.58~-22.58	49
	9~10	-5.57	-9.87~-1.07	92
	>10	-17.85	-22.12~-13.34	66
生物质炭 C/N	<70	-40.51	-45.69~-34.83	31
	70~90	-7.39	-11.79~-2.78	105
	90~110	-25.96	-31.85~-19.57	43
	>110	-27.45	-38.40~-14.54	11
生物质炭施 用量/t·hm ⁻²	0~10	-20.39	-25.25~-15.23	62
	10~20	-12.42	-17.01~-7.58	82
	20~40	-19.99	-24.73~-14.96	62
	>40	-14.00	-25.16~-1.19	13
氮肥施用量/ kg·hm ⁻²	0	23.20	10.17~37.77	22
	0~150	-5.91	-14.39~3.41	31
	150~250	-24.15	-27.99~-20.11	105
	>250	-24.37	-29.29~-19.1	58
种植系统	水田	-24.35	-28.69~-19.75	70
	旱地	-13.93	-17.16~-10.59	154

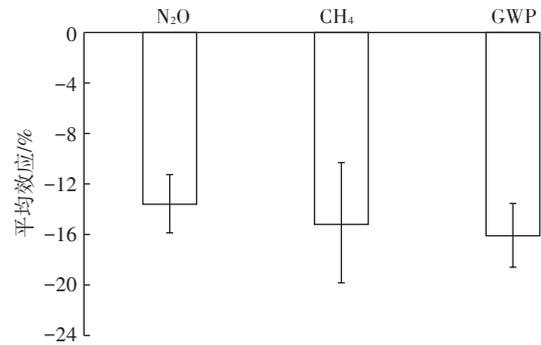


图4 生物质炭施用对 N₂O、CH₄和 GWP 的影响

Figure 4 The effect of biochar amendment on N₂O and CH₄ emission and GWP

表4 土壤理化性质、生物质炭特性及田间管理对土壤 CH₄排放的影响

Table 4 The effects of soil and biochar properties and field management on the change of CH₄ emission

项目	平均变化量/%	95% 置信区间	样本量	
土壤 pH	<5	-46.06	-63.90~-19.41	6
	5~6.5	-7.41	-19.53~6.54	30
	6.5~7.5	-24.65	-32.92~-15.37	45
土壤有机碳/ g·kg ⁻¹	<5	-46.04	-62.62~-22.11	6
	5~10	14.23	-24.95~73.86	5
	10~20	-24.27	-30.86~-17.07	60
	>20	13.21	-7.76~38.94	13
土壤质地	砂土	-25.87	-34.85~-15.89	28
	壤土	-9.18	-20.68~3.99	23
	黏土	-3.54	-22.80~20.51	10
土壤 C/N	<9	-26.02	-38.24~-11.37	15
	9~12	-22.54	-29.20~-15.25	55
	>12	13.23	-6.60~37.28	13
生物质炭 pH	<9	-24.94	-33.40~-15.41	42
	9~10	-25.02	-37.75~-9.70	18
	>10	14.86	-5.59~39.72	16
	>12	13.23	-6.60~37.28	13
生物质炭 C/N	<90	-5.82	-18.40~8.71	23
	90~110	-23.53	-30.50~-15.31	45
	>110	2.73	-23.93~38.75	7
	>12	13.23	-6.60~37.28	13
生物质炭施 用量/t·hm ⁻²	0~10	-11.93	-22.14~-0.39	38
	10~20	-20.78	-31.85~6.56	26
	20~40	-15.66	-33.25~6.56	14
	>40	-14.00	-25.16~-1.19	13
氮肥施用量/ kg·hm ⁻²	0	57.28	15.87~113.48	6
	0~150	-26.86	-43.37~-5.53	8
	150~250	-27.03	-32.48~-21.15	62
	>250	8.14	-12.24~33.25	10

水田能够减排 N₂O 24.35%,显著高于旱地的 13.93%。生物质炭的施用量对于 N₂O 减排效果影响不显著。

2.3.2 生物质炭施用对甲烷(CH₄)排放量的影响

生物质炭施用后稻田CH₄排放量受土壤性质和生物质炭性质的显著影响(表4)。当土壤pH小于5以及在6.5~7.5时,能够显著减少稻田CH₄排放量,分别可达46.06%和24.65%,而pH在5~6.5时的影响不显著。当土壤有机碳含量较低(<5 g·kg⁻¹)时,稻田CH₄排放量减幅最大,为46.04%,而当有机碳含量在5~10 g·kg⁻¹以及大于20 g·kg⁻¹时,对CH₄排放量的影响不显著。对于土壤质地和土壤C/N,在砂土中,生物质炭施用能够显著降低稻田CH₄排放量,在壤土和黏土中无显著的减排效果;土壤C/N小于12时,能够显著减排,而C/N高于12时,对稻田CH₄排放量影响不显著。生物质炭本身的pH和C/N也是影响稻田CH₄排放量的重要因素。当生物质炭pH小于10时,能够显著降低CH₄排放量,而大于10时,无显著影响。生物质炭C/N在90~110之间,能够显著减少CH₄排放量。在不施用氮肥的情况下,生物质炭施用下CH₄排放量提高57.28%;施氮量小于250 kg·hm⁻²时,生物质炭施用显著降低稻田CH₄的排放量;而施氮量大于250 kg·hm⁻²,对CH₄的排放量无显著影响。

2.3.3 生物质炭施用对全球增温潜势(GWP)的影响

施用生物质炭能够显著降低GWP,平均降低16.08%。土壤pH对于GWP影响表现为碱性>中性>酸性(表5),其中在碱性土壤中,降低幅度高达28.45%。土壤有机碳和土壤质地对GWP变化也有影响。土壤有机碳低于20 g·kg⁻¹时,GWP能够显著降低,高于20 g·kg⁻¹时,对GWP影响不显著;在砂性和壤性土壤中能够显著降低GWP,但在黏性土壤中影响不显著。土壤C/N在小于12时,生物质炭的农田施用能够显著降低GWP,而随着碳氮比高于12后则无显著影响。生物质炭本身性质也能够显著影响GWP的变化幅度(表5)。生物质炭pH在小于10时,能够显著降低GWP,且效果显著优于pH大于10的情况;生物质炭的C/N也是影响GWP的因素之一,当生物质炭C/N小于70时,对GWP的降低幅度最大,达33.28%,显著高于其他生物质炭C/N的影响。

对于生物质炭田间施用量和施肥管理,生物质炭施用量低于40 t·hm⁻²,能够显著降低GWP,其中在10~20 t·hm⁻²时GWP降低幅度最大,为20.53%,而生物质炭施用量在高于40 t·hm⁻²时,对GWP无显著影响;在不施用氮肥时,施用生物质炭显著增加了GWP,达14.95%,而施用氮肥后,GWP显著降低,其中施氮在0~150 t·hm⁻²时,降低幅度最大,为26.83%。

表5 土壤理化性质、生物质炭特性及田间管理对GWP变化的影响

Table 5 The effects of soil physicochemical properties, biochar and field management on the change of GWP

项目	平均变化量/%	95%置信区间	样本量	
土壤pH	<6.5	-6.73	-11.31~-1.92	47
	6.5~7.5	-18.93	-22.94~-14.72	53
	>7.5	-28.45	-32.62~-24.02	32
土壤有机碳/ g·kg ⁻¹	<5	-21.84	-29.84~-12.92	16
	5~10	-23.68	-30.12~-16.64	23
	10~20	-17.90	-21.72~-13.69	81
	>20	2.23	-9.63~15.04	13
土壤质地	砂土	-26.67	-34.82~-17.49	30
	壤土	-23.97	-32.82~-13.89	27
	黏土	-4.67	-16.06~8.26	24
土壤C/N	<9	-17.34	-25.15~-8.72	21
	9~12	-20.18	-23.59~-16.62	88
	>12	-2.39	-10.80~6.81	21
生物质炭pH	<9	-22.09	-26.51~-17.40	44
	9~10	-17.88	-22.06~-13.46	43
	>10	-7.93	-12.34~-3.29	48
生物质炭 C/N	<70	-33.28	-39.21~-26.78	21
	70~90	-9.82	-14.09~-5.35	59
	90~110	-20.22	-24.79~-15.37	48
	>110	-13.02	-22.99~-1.75	11
生物质炭用 量/t·hm ⁻²	0~10	-12.93	-17.56~-8.03	48
	10~20	-20.53	-24.82~-16.00	45
	20~40	-18.82	-23.91~-13.39	33
	>40	-10.06	-20.02~1.14	11
氮肥施用量/ kg·hm ⁻²	0	14.95	5.52~25.22	13
	0~150	-26.83	-31.63~-21.68	20
	150~250	-18.01	-20.97~-14.94	78
	>250	-16.89	-22.21~-11.21	23

2.4 生物质炭的持续效应

本研究探讨了生物质炭施用到农田中对作物产量、N₂O和CH₄排放量的持续影响(图5)。生物质炭对作物的增产效应具有持续性,从第三年开始,不同研究间变异性增加。与作物产量类似,生物质炭对农田土壤N₂O减排效果也能够持续三年,其中第二年减排效果最明显,随着年限增加不同研究间的变异也增加。生物质施用对稻田CH₄的减排效果持续了两年,第三年减排效果消失,不同研究间变异性也增加。

3 讨论

3.1 生物质炭施用对作物产量的影响

通过整合分析发现,生物质炭施用于农田土壤中

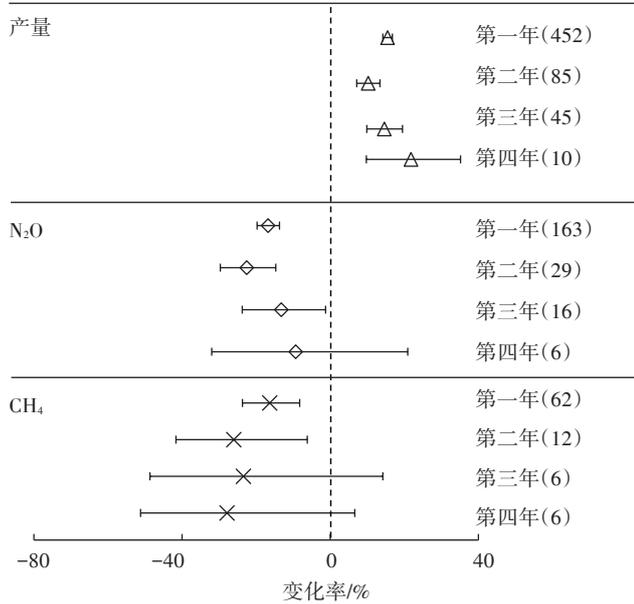


图5 生物质炭施用对作物产量和温室气体排放的持续影响
Figure 5 The persistence effects of biochar amendment on crop yield and greenhouse gases emission

可显著提高作物产量,平均增产幅度为15.1%,该结果与肖婧等^[9]的平均增产量(15.0%)基本一致,但略高于Liu等^[8]和Jeffery等^[17]的研究结果(分别为8.4%和10%)。其原因可能是数据库不同,在Liu等^[8]和Jeffery等^[17]的研究中,整合分析中的数据库是基于在全球开展的试验数据资料,而本文研究只包括在我国境内开展的田间试验数据资料。不同区域间因土壤类型、作物类型、生物质炭类型和土壤管理方式的差异导致作物产量对生物质炭的响应不同。

土壤的基本理化性质会影响作物产量变化幅度(图1)。与Liu等^[8]和肖婧等^[9]的研究结果类似,土壤酸碱度和土壤质地是影响作物产量变化的重要因素。生物质炭施用到酸性土壤后作物增产效果显著。由于生物质炭本身为碱性材料,施用到酸性土壤后会显著提高土壤pH^[24],土壤阳离子交换量也相应增加^[25-26]。土壤阳离子交换量是土壤保肥能力的重要指标,阳离子交换量增加,土壤保肥能力增强。因此,在酸性土壤中施用生物质炭,可显著提升土壤对肥力的固持能力,提高养分元素生物有效性,从而提高作物产量。此外,酸性土壤中施用生物质炭还能够降低土壤溶液中铝离子的含量,减缓其对植物的毒害作用^[27]。在砂性和黏性土壤中,生物质炭的增产效果高于壤土。生物质炭中含有大量的有机碳和孔隙,施用后一方面有利于土壤团粒结构的形成^[28],另一方面可显著提高土壤对养分的固持能力,并且提高

了土壤的保水保肥性^[29],降低养分损失,对于干旱地区具有良好的增产效果。团聚体的形成进一步改善了土壤的结构特性,有利于微生物活动,大幅提高作物产量。而在黏性土壤中,生物质炭能够降低土壤容重,增加土壤孔隙度;生物质炭施用后土壤通气性改善有利于作物根系生长,从而达到增产效果。

生物质炭本身的特性对作物产量有影响显著(图2)。已有研究^[8]表明,生物质炭原料来源是影响作物产量对生物质炭响应的重要因素,来源于畜禽粪便的生物质炭含有更多的养分,其增产潜力大于秸秆和木质炭。本研究中,虽然来源于花生壳、竹子和木质等物质的生物质炭增产幅度较大,但由于数据量较小,不确定性很大。而水稻、玉米和小麦秸秆间作物增产幅度无显著差异。炭化温度是决定生物质炭结构和pH的关键因素,生物质热裂解后,在物理结构上仍保持了原材料的基本形貌,而且在化学组成上也继承了原材料的元素配比特点^[30],其物理结构和化学组成决定着生物质炭对作物产量影响的潜能。本研究发现,当炭化温度较低时(<550℃),作物产量增加显著。较低的炭化温度,能够减少炭化后生物质炭的养分损失,例如氮素^[31],从而达到增产的效果。在一些酸性土壤中,施用pH较高的生物质炭能够显著提高作物产量,这与改善土壤的酸碱度等密切相关^[32]。当生物质炭C/N>90时,增产效果相比于C/N<90时有所减弱,其原因可能是高C/N的生物质炭施用使得土壤的C/N失衡,微生物与作物竞争土壤中的氮素,影响作物正常生长时对有效性氮的吸收^[33],从而影响了作物产量。

水肥管理及生物质炭施用量也是影响作物产量对生物质炭响应的重要因素(图3)。生物质炭施用到旱地土壤的增产效果显著高于水稻田,这与Liu等^[8]的结果一致。在旱地土壤中,生物质炭能够保持土壤水分,从而促进作物生长,同时生物质炭施加在旱地上有利于块根、块茎类作物生长^[34-35]。另外,生物质炭能够减缓旱地土壤养分的淋溶损失,吸附NH₄⁺等,达到增产效果。也有研究结果表明,生物质炭通过改良旱地土壤酸性,提高肥料利用率,促进大豆根瘤的生成来提高大豆产量^[36]。本研究发现在不施氮肥的情况下施用生物质炭也能提高作物产量。生物质炭改变了土壤养分环境并促进了植物生长,而施用肥料和生物质炭时,产量增加幅度更大,这源于肥料消除了生物质炭养分低的缺陷,而生物质炭赋予肥料养分缓释性能的互补和协同作用。生物质炭延缓肥

料在土壤中的养分释放,降低养分损失,提高肥料养分利用率,是肥料的增效载体^[37]。

3.2 生物质炭施用对温室气体的影响

施用生物质炭能够显著减少土壤 N_2O 和 CH_4 的排放量,平均减排量分别为 13.6% 和 15.2%。 N_2O 减排量低于 Cayuela 等^[10]和 He 等^[11]的 54% 和 30.92%,而 He 等^[11]的研究表明生物质炭对 CH_4 排放量影响不显著。这可能是因为一方面我国农田化肥施用量远高于世界平均水平,另一方面我国土壤类型和气候条件多样化,从而导致土壤 N_2O 和 CH_4 排放量不同。

土壤酸碱度和质地是影响 N_2O 排放量的重要因素(表3)。土壤 pH 值可通过影响氮相关功能微生物的活性及改变相应的氮素转化过程而影响 N_2O 的排放量。本研究结果显示,在极酸性土壤(pH<5)中,施用生物质炭对 N_2O 排放量无显著影响,与 Cayuela 等^[10]的研究结果相似。氮相关功能微生物比较适宜生存在中性或弱碱性环境中,在酸性土壤中,土壤 pH 值过低对 N_2O 还原酶的活性产生不利影响^[38],减少了 N_2O 的还原量,而生物质炭的施用无法消除极酸性土壤的酸性环境,使得在极酸性土壤中,生物质炭施用对 N_2O 排放量无显著影响。生物质炭施用到砂性和壤性土壤中能够显著减少 N_2O 排放量,而在黏性土壤中无显著影响,可能是由于黏土本身含水率较高,土壤通气性能差,氧气浓度较低,而生物质炭的施用改善了黏土通气性,土壤氧气含量增加,增加了硝化作用,土壤 N_2O 排放量增加;而在砂土和壤土中,生物质炭起到保持水分作用,土壤孔隙充水,减少土壤因硝化作用产生的 N_2O ,另外,生物质炭促进砂土团粒结构形成,减少氮素损失,从而显著减少土壤 N_2O 排放量。

生物质炭本身的特性和田间水肥管理也会影响土壤 N_2O 排放量(表3)。在不施用氮肥的情况下,生物质炭显著增加了 N_2O 排放量,可能原因是生物质炭自身携带的氮素会成为土壤氮源,通过硝化作用生成 N_2O ;施用氮肥显著增加了土壤中铵态氮和硝态氮的含量,增强了硝化作用和反硝化作用强度,促进了土壤 N_2O 的产生和排放^[39],而施加的生物质炭改善了土壤微环境,调控土壤微生物群落组成和多样性,降低土壤中氮相关的微生物菌群丰度,抑制土壤 N_2O 的产生^[40]。表3显示,生物质炭施用于稻田对 N_2O 减排效果优于旱地,可能原因是稻田在晒田期 N_2O 排放量会剧增,达到峰值,而生物质炭在晒田期间能够改善土壤通气状况,增加氧气含量,明显减少反硝化作用产生的 N_2O ^[41]。

土壤基本理化性质对 CH_4 排放量有显著影响。本研究结果显示在砂土中施用生物质炭显著减少稻田 CH_4 排放量,而壤土和黏土中施用生物质炭对 CH_4 排放量影响不显著(表4)。He 等^[11]整合分析结果显示:在砂性土壤中,生物质炭显著减排,在壤土中不显著,而在黏土中有增加排放趋势。也有研究表明,土壤砂粒含量越高,土壤 CH_4 排放通量就越高,反之土壤黏粒含量越高 CH_4 排放量越小^[42-43]。蔡祖聪等^[43]研究表明,黏质土壤中 CH_4 排放量显著低于砂质土壤;生物质炭施用到黏质土壤中,增加了土壤通气性,加速了土壤有机质的分解,提高产甲烷菌活性,增加 CH_4 排放量。在砂土中施用生物质炭,显著减少 CH_4 排放量,达 25.87%,可能是生物质炭施用到砂土中,促进了土壤团粒结构的形成,土壤有机质分解速率减缓,产甲烷菌活性受到抑制^[43]。土壤 C/N 也是影响土壤 CH_4 排放的重要因素之一(表4),生物质炭自身 C/N 高,施用到高 C/N 的土壤中,为土壤提供含碳有机物,增加产甲烷菌活动的底物,促进 CH_4 排放^[44]。

在不施肥的情况下,施加生物质炭会增加稻田 CH_4 的排放量,高达 57.28%,与赵红等^[13]研究结果一致,可能原因是施用生物质炭,增加了土壤中易分解的含碳有机小分子,而这些有机小分子正是产甲烷菌的底物^[44],增加了 CH_4 的排放量。而施用氮肥时,Sun 等^[45]研究表明, CH_4 作为甲烷氧化菌唯一的碳源和能量源,当土壤中存在大量易分解碳时,甲烷氧化菌的活性和数量大幅提高^[46],导致 CH_4 在未排放之前被氧化,减少了 CH_4 的排放量。

本文是对国内已发表的有关农田作物产量、固碳减排文献的整合分析,有些大田试验结果可能具有一定的条件适应性,并且生物质炭的复杂多样,以及生物质炭与土壤微生物、农田管理方式等交互作用还需要进一步探究。尽管如此,本文的定量分析结果能够为我国今后的生物质炭推广应用以及生物质炭产业化发展提供科学依据。

4 结论

生物质炭农田施用能够显著提高作物产量,减少温室气体排放量,增加土壤碳库储量,其增产和减排的幅度与土壤理化性质、生物质炭本身的特性及农田水肥管理措施等因素密切相关。在强酸性土壤和有机碳含量低的土壤中施用生物质炭,增产幅度更为明显,且砂性和黏性土壤的增产幅度显著高于壤土;当生物质炭的 C/N 较低或炭化温度较低时,更

有利于农田作物的增产;生物质炭的旱地施用增产效果优于水田。

生物质炭在中性土壤、砂土和壤土以及水田中施用对 N_2O 的减排效果更明显;而对于稻田,生物质炭施用到极酸性、有机碳含量较低、质地为砂性土壤时,更有利于 CH_4 的减排;在施肥的情况下农田施用生物质炭显著减少 N_2O 、 CH_4 的排放量,降低了全球增温潜势。今后我国在农田生物质炭应用中,优先选择施用到酸性、黏性或砂性等肥力较差的土壤中,优先选择旱作农田;生物质炭制备时应将炭化温度控制在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,从而达到理想的效果。

参考文献:

- [1] 潘根兴,卞荣军,程琨.从废弃物处理到生物质制造业:基于热裂解的生物质科技与工程[J].科技导报,2017,35(23):82-93.
PAN Gen-xing, BIAN Rong-jun, CHENG Kun. From biowaste treatment to novel bio-material manufacturing: Biomaterial science and technology based on biomass pyrolysis[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(23):82-93.
- [2] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7):669-678.
- [3] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. *Nature*, 2006, 442(7103):624-626.
- [4] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change*, 2006, 11:395-419.
- [5] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141):143-144.
- [6] 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*, 2012, 351(1/2):263-275.
- [7] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. *Glob Chang Biol Bioenergy*, 2013, 5(2):202-214.
- [8] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, 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, 377(1/2):583-594.
- [9] 肖婧,徐虎,蔡岸冬,等.生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J].中国农业科学,2017,50(10):1827-1837.
XIAO Jing, XU Hu, CAI An-dong, et al. The characteristics of biochar and the meta-analysis of the effects of application management measures on crop yield[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2017, 50(10):1827-1837.
- [10] 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 and Environment*, 2014, 191:5-16.
- [11] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, et al. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9:743-755.
- [12] 罗晓琪,冯浩,刘晶晶,等.生物质炭施用下中国农田土壤 N_2O 排放的Meta分析[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1254-1265.
LUO Xiao-qi, FENG Hao, LIU Jing-jing, et al. Meta analysis of N_2O emission in Chinese farmland under biochar[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9):1254-1256.
- [13] 赵红,孙滨峰,逯飞,等. Meta分析生物质炭对中国主粮作物痕量温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2017,33(19):10-16.
ZHAO Hong, SUN Bin-feng, LU Fei, et al. Meta analysis on impacts of biochar on trace greenhouse gases emissions from staple crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19):10-16.
- [14] 农业部新闻办公室.我国主要农作物秸秆综合利用率超过80%.[DB/OL].[2016-05-26]http://www.moa.gov.cn/zwl/m/zwdt/201605/t20160526_5151375.htm.
Department of Agriculture Information Office. The comprehensive utilization rate of straw is more than 80%.[DB/OL].[2016-05-26]. http://www.moa.gov.cn/zwl/m/zwdt/201605/t20160526_5151375.htm.
- [15] 潘根兴,张阿凤,邹建文,等.农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):394-400.
PAN Geng-xing, ZHANG A-feng, ZOU Jian-wen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendment to croplands: An option for low carbon agriculture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):394-400.
- [16] 农业部办公厅.关于推介发布秸秆农用十大模式的通知[DB/OL].[2017-04-28].http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503_5593248.htm.
General Office of the Ministry of Agriculture. Notice on the promotion and release of ten models of straw farming[DB/OL].[2017-04-28]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201705/t20170503_5593248.htm.
- [17] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 144(1):175-187.
- [18] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80, 1150-1156.
- [19] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. MetaWin: Statistical software for meta-analysis[M]. Version 2.0. Sunderland: Sinauer, 2000.
- [20] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26(8):1317-1328.
- [21] Curtis P S, Wang X. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. *Oecologia*, 1998, 113(3):299-313.
- [22] Ainsworth E A, Davey P A, Bernacchi C J, et al. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8):695-709.
- [23] 郑凤英,彭少麟.植物生理生态指标对大气 CO_2 浓度倍增响应的

- 整合分析[J]. 植物学报, 2001, 43(11):1101-1109.
- ZHENG Feng-ying, PENG Shao-lin. Meta-analysis of the response of plant ecophysiological variables to doubled atmospheric CO₂ concentrations[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(11):1101-1109.
- [24] Yao F X, Arbustain M C, Virgel S, et al. Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified soxhlet reactor [J]. *Chemosphere*, 2010, 80(7):724-732.
- [25] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol[J]. *Soil Use Management*, 2011, 27(1):110-115.
- [26] Yuan J H, Xu R K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China[J]. *Soil Research*, 2012, 50(7):570-578.
- [27] 应介官, 林庆毅, 张梦阳, 等. 生物炭对铝富集酸性土壤的毒性缓解效应及潜在机制[J]. 中国农业科学, 2016, 49(23):4576-4583.
- YING Jie-guan, LIN Qing-yi, ZHANG Meng-yang, et al. Mitigative effect of biochar on aluminum toxicity of acid soil and the potential mechanism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23):4576-4583.
- [28] 付琳琳. 生物质炭施用下稻田土壤有机组分、腐殖质组分及团聚体特征研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- FU Lin-lin. Study on characteristics of soil organic components, humus components and aggregates in paddy soil with biochar[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [29] 吴崇书, 邱志腾, 章明奎. 施用生物质炭对不同类型土壤物理性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2014(10):1617-1619, 1623.
- WU Chong-shu, QIU Zhi-teng, ZHANG Ming-kui. Effects of biochar on physical properties of different types of soil[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2014(10):1617-1619, 1623.
- [30] Alexis M, Rasse D, Rumpel C, et al. Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82(2):201-216.
- [31] 邱良祝, 朱脩玥, 马彪, 等. 生物质炭热解炭化条件及其性质的文献分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6):1622-1630.
- QIU Liang-zhu, ZHU Xiu-yue, MA Biao, et al. Literature analysis on properties and pyrolyzing conditions of biochars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6):1622-1630.
- [32] 李九玉, 赵安珍, 袁金华, 等. 农业废弃物制备的生物质炭对红壤酸度和油菜产量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2):334-339.
- LI Jiu-yu, ZHAO An-zhen, YUAN Jin-hua, et al. Amelioration effects of crop residue-derived biochars on soil acidity and canola yield in red soil[J]. *Soil*, 2015, 47(2):334-339.
- [33] Liang B, 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.
- [34] 王贺东, 吕泽先, 刘成, 等. 生物质炭施用对马铃薯产量和品质的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5):888-892.
- WANG He-dong, LÜ Ze-xian, LIU Cheng, et al. Effects of biochar on potato yield and quality[J]. *Soil*, 2017, 49(5):888-892.
- [35] 陈雪娇, 杨丹丹, 李贵桐, 等. 不同温度生物质炭复混肥对小白菜和樱桃萝卜产量及硝酸盐的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(34):30-34.
- CHEN Xue-jiao, YANG Dan-dan, LI Gui-tong, et al. The effects of biochar complex fertilizer under different temperatures on the yield and nitrate content of *Brassica chinensis* and *Raphanus sativus* var. *radculus*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(34):30-34.
- [36] Yu L, Lu X, He Y, et al. Combined biochar and nitrogen fertilizer reduces soil acidity and promotes nutrient use efficiency by soybean crop[J]. *J Soils Sediments*, 2017, 17(3):599-610.
- [37] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15):16-25.
- HE Xu-sheng, ZHANG Shu-qing, SHE Diao, et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15):16-25.
- [38] Liu B, Mørkved P T, Frostegård Å, et al. Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N₂O and N₂ production as affected by soil pH[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2010, 72(3):407-417.
- [39] He F F, Jiang R F, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5):1666-1672.
- [40] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20):4128-4138.
- GU Mei-ying, LIU Hong-liang, LI Zhi-qiang, et al. Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20):4128-4138.
- [41] Dong Y, Scharffe D, Qi Y C, et al. Nitrous oxide emissions from cultivated soils in the north China Plain[J]. *Tellus B*, 2001, 53(1):1-9.
- [42] 陈中云, 闵航, 陈美慈, 等. 不同水稻土甲烷氧化菌和产甲烷菌数量与甲烷排放量之间相关性的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9):1498-1505.
- CHEN Zhong-yun, MIN Hang, CHEN Mei-ci, et al. Studies on relationships among methane emission and methane-oxidizing and methanogenic bacteria in three types of rice-field soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9):1498-1505.
- [43] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2):145-153.
- CAI Zu-cong, SHEN Guang-yu, YAN Xiao-yuan, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emission from rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2):145-153.
- [44] 葛慧敏, 陈璐, 于一帆, 等. 稻田甲烷排放与减排的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3):160-166.
- GE Hui-min, CHEN Lu, YU Yi-fan, et al. Research progress on methane emission and emission reduction in rice fields[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(3):160-166.
- [45] Sun B F, Zhao H, Lv Y Z, et al. The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(2):440-450.
- [46] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6):930-939.