

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.002

朱一, 李晓龙, 吴喆, 等. 生物质炭对不同植被类型土壤温室气体排放影响研究进展. 土壤, 2023, 55(2): 234–244.

生物质炭对不同植被类型土壤温室气体排放影响研究进展^①

朱一, 李晓龙, 吴喆, 陶岳, 王雅杰, 孙宇, 张小凯*, 王震宇

(江南大学环境过程与污染控制研究所, 环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 土壤生态系统是温室气体排放的主要来源之一, 降低土壤温室气体排放对于缓解全球变暖具有重要意义。近年来, 生物质炭在改良土壤性质、提高土壤碳汇和影响土壤温室气体排放方面展现出了巨大的潜力。因此, 关于施加生物质炭对土壤温室气体排放影响的研究已经成为了环境科学和农业生态领域的研究热点。然而, 生物质炭对土壤温室气体净排放的影响是促进还是抑制尚无统一论。不同植被类型条件下土壤温室气体排放也存在较大差异, 故而研究添加生物质炭对不同植被类型土壤温室气体排放的影响至关重要。本文综述了添加生物质炭对林地、农田及设施蔬菜土壤中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的影响, 探讨了生物质炭对土壤温室气体排放的作用机制。总结发现, 不同植被类型土壤添加生物质炭将降低土壤 N₂O 的排放, 并且增加土地对 CH₄ 的吸收, 而对 CO₂ 排放的影响没有统一论。结合国内外生物质炭在该领域的研究现状, 未来需开展生物质炭在土壤温室气体减排领域的长期系统研究, 同时应充分考虑使用生物质炭可能存在的潜在环境风险, 以期能为生物质炭在土壤温室气体减排中的应用提供可靠的科学依据。

关键词: 生物质炭; 植被类型; 温室气体; 影响机理; 减排

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A

Effects of Adding Biochar on Greenhouse Gas Emissions from Soils of Different Vegetation Types

ZHU Yi, LI Xiaolong, WU Zhe, TAO Yue, WANG Yajie, SUN Yu, ZHANG Xiaokai*, WANG Zhenyu

(Institute of Environmental Process and Pollution Control, School of Environment and Civil Engineer, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Soil ecosystems are one of the main sources of greenhouse gas emissions, hence, reducing soil greenhouse gas emissions is of great significance for alleviating global warming. In recent years, biochar has shown great potential in improving soil properties, enhancing soil carbon sinks and affecting soil greenhouse gas (GHG) emissions. Therefore, the study on the effect of biochar application on soil greenhouse gas emissions has become a research hotspot in the fields of environmental science and agroecology. However, there is no consensus on whether the effect of biochar on net GHG emissions from soil is promoting or suppressing. There are also great differences in soil GHG emissions from different vegetation types, so it is very important to study the effect of biochar addition on GHG emissions from different vegetation types. In this review, the effects of biochar addition on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from forest land, farmland and facility vegetable soils were reviewed, and the mechanism of biochar effects on soil GHG emissions was discussed. It was concluded that the addition of biochar to soils of different vegetation types would reduce soil N₂O emissions and increase land absorption of CH₄, while there was no unified conclusion on the effects on CO₂ emissions. Combined with the research status of biochar in this field, it is necessary to carry out long-term systematic research in the field of soil GHG emission reduction in the future, which is aim to provide a reliable scientific basis for the application of biochar in soil GHG emission reduction.

Key words: Biochar; Vegetation types; Greenhouse gas; Mechanism; Emission reduction

①基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42107245)和中国博士后科学基金项目(2021M701455)资助。

* 通讯作者(xiaokai.zhang@jiangnan.edu.cn)

作者简介: 朱一(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事生物质炭的环境功能及环境风险评估研究。E-mail: 6211405100@stu.jiangnan.edu.cn

近年来,随着人们对环境问题的广泛关注,全球气候变化及其对环境与人类生存带来的影响已经成为了学术界的研究热点。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的报告,全球气温预计将在 21 世纪内升高 2 ~ 5 °C^[1]。世界气象组织 2022 年的调查报告显示,过去 7 年是有记录以来最热的 7 年,2021 年全球温度比工业化前水平高出约 1.1 °C^[2]。为了将全球变暖导致的升温控制在 1.5 ~ 2 °C 以内,全球温室气体排放必须达到峰值,然后迅速下降。如图 1 所示,我国的碳达峰时间预计出现在 2030 年,并与世界其他 56 个国家实现占全球温室气体排放量的 60%。因此,如何减少温室气体排放,早日实现碳达峰,缓解温室效应已经成为近些年来世界各国亟待解决的共同问题。

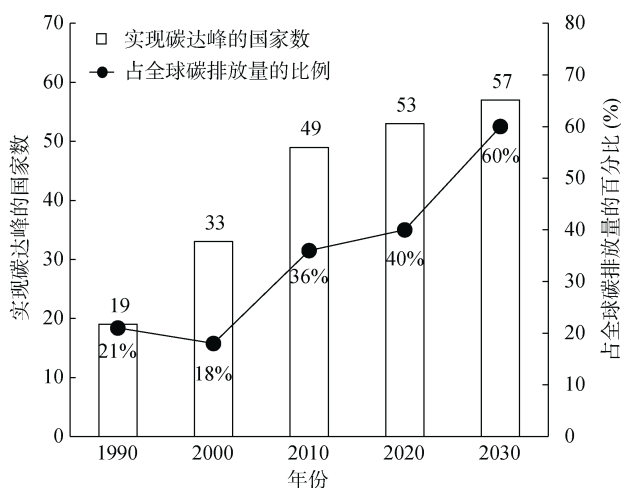


图 1 已达到或承诺达到峰值碳排放量的国家数量

Fig. 1 Number of countries that have reached or committed to peak emissions of carbon

1 土壤碳库及生物质炭的研究意义

众多研究表明,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量达到 $2.2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$ Pg^[3-4],而全球土壤有机碳封存潜力为 CO_2 $2.3 \times 10^9 \sim 5.5 \times 10^9$ t/a^[5]。因此,土壤有机碳封存量的变化将对全球温室效应和气候变化产生重要影响。土壤有机碳的固定、积累和分解影响着全球碳循环。土壤中存储的碳最初都来自大气^[6],这主要是由于植物通过光合作用将 CO_2 转化为有机物,有机物中的碳以根系分泌物、死根或者残叶的形式进入土壤,并在土壤微生物的作用下,转变为土壤有机质存储在土壤中^[6-7]。增加土壤有机碳固存不仅能为植被生长及微生物活动提供碳源,也可维持土壤良好的物理结构,促进土壤中植物可利用态养分的释放与转化,同时也是持续减少大气中 CO_2 等

温室气体含量的一个有效且可持续的措施^[8]。土壤 CO_2 排放又称土壤呼吸,是土壤有机碳进入大气的主要途径。它是陆地生态系统碳损失导致气候变化的主要机制^[9]。此外, CH_4 和 N_2O 也被认为是主要的温室气体,其单位质量的全球变暖潜势在世纪尺度上分别是 CO_2 的 25 倍和 198 倍^[10]。因此,如何通过改变土壤的物理、化学和生物性质,从而降低土壤的温室气体排放,对缓解全球气候变化危机至关重要。

生物质炭是指农林废弃物在限氧或无氧条件下,通过热解转化产生的含碳量丰富的固体物质^[11]。生物质炭具有稳定的结构、丰富的孔隙度、巨大的比表面积、相对较高的 pH 等特点^[12]。生物质炭的制备材料来源丰富,包括农林废弃物^[13]、生活垃圾、动物粪便等^[14-15]。将生物质炭施加到土壤中后可以改良土壤结构,增加土壤孔隙度、降低容重、增强保水性能、吸附土壤中的污染物,同时还可以促进植物根系的生长以及对水分养料的吸收,及提高植物的抗逆性^[16-18]。在全球气候变暖的背景下,土壤固碳减排是实现碳中和的重要方法。研究发现,生物质炭稳定性强,可在土壤中留存几个世纪^[19-23]。由此可见,土壤中添加生物质炭对于实现土壤碳封存,增加土壤碳储量,实现碳中和具有积极促进作用。

基于生物质炭在土壤固碳减排方面的潜力,近年来,该研究领域已经成为国内外学者的研究焦点^[24-27]。从图 2 可以看出自 2011 年以来关于生物质炭对温室气体排放影响的文章逐年递增,且尤以我国的发文量最大,达到了近 700 篇。然而,关于添加生物质炭促进还是抑制土壤温室气体的净排放仍然没有统一的定论。并且,土壤中添加生物质炭后,不同的植被类型会对温室气体的排放产生不同影响。本文对近年来添加生物质炭对土壤温室气体排放影响的文章进行了综述,以期使相关研究人员对生物质炭的利用有更加深入的认识,从而更好地促进土壤碳汇及减少温室气体减排。

2 不同植被类型土壤中添加生物质炭对温室气体排放的影响

温室气体在大气和土壤中的交换受多种因素的影响,例如植被类型、温度、降水、氮(N)输入和土壤性质(例如土壤质地、土壤 pH 和 C/N 等)。在众多因素当中,植被类型的变化对温室气体排放起关键作用,因为其变化直接影响土壤碳汇^[28]、根系密度、氮输入^[29]和管理^[30]。这进一步影响土壤温度和土壤水分及土壤动物和微生物等,从而影响温室气体排

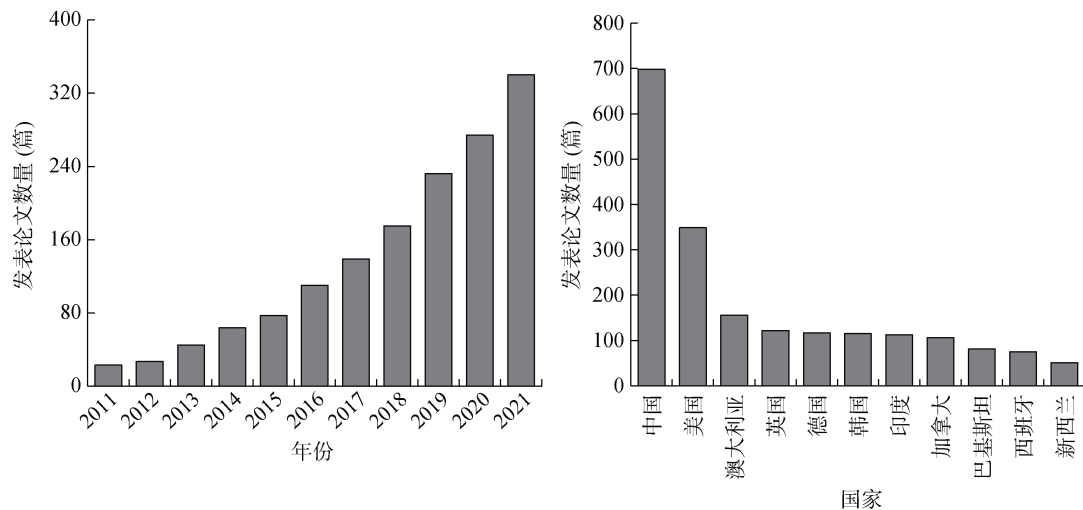


图 2 Web of Science 以“biochar”和“greenhouse gas”为关键词的检索结果

Fig. 2 Search results of keywords “biochar” and “greenhouse gas” in Web of Science

放^[20]。因此, 研究不同植被类型土壤中添加生物质炭对土壤温室气体排放的影响, 对于指导如何合理施用生物质炭意义重大。

2.1 林地生态系统土壤

森林在陆地生态系统碳循环中发挥着关键作用^[31-32]。从 1990 年到 2015 年, 世界森林总面积从 428 亿公顷减少到 39.9 亿公顷, 而同期人工林面积从 1 675 万公顷增加到 2.779 亿公顷^[33]。因此, 人工林

的可持续经营对于提高林地碳汇能力、减缓全球气候变化具有重要意义。表 1 总结了近 5 年通过添加生物质炭对人工林地或森林土壤温室气体排放影响的研究。从表 1 可以看出, 不同研究中生物质炭施用对森林生态系统土壤温室气体排放的影响差异较大。Hawthorne 等^[35]在实验室内, 将不同比例松木生物质炭添加到森林土壤中观察其对土壤排放温室气体的影响, 研究发现, 添加 10% 生物质炭促进了 N₂O 和

表 1 添加生物质炭对人工林地土壤温室气体排放的影响

Table 1 Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions from planted forests soil

原材料	热解温度 (°C)	植被类型	试验类型	生物质炭添加量	时间	效果	参考文献
竹子	800	森林	田间	10、30 t/hm ²	16 m	对温室气体排放没有显著影响	[34]
松树	420	森林	实验室	10、100 g/kg	25 d	添加 10% 生物质炭促进了 N ₂ O 和 CO ₂ 的排放, 两种添加量的生物质炭均降低了 CH ₄ 的排放	[35]
木材	600	杨树	田间	80、120 t/hm ²	7 a	在杨树系统中施用生物炭 7 a 后, 土壤 N ₂ O 的排放没有减少	[36]
云杉木片	550	云杉	田间	10 t/hm ²	4 a	添加生物质炭使土壤 CH ₄ 消耗和 N ₂ O 释放分别减少了 106% 和 94%, 但对土壤 CO ₂ 排放没有影响	[37]
竹子	500	毛竹	田间	5、20 t/hm ²	2 a	添加生物质炭减少毛竹人工林土壤的 CO ₂ 排放	[38]
油菜秸秆	300、700	森林	实验室	20 g/kg	35 d	300 °C 生物质炭使 CO ₂ 和 N ₂ O 排放量分别增加了 26.9% 和 627.1%, 700 °C 生物质炭使 CO ₂ 排放量减少 27.1%, 生物质炭对 CH ₄ 排放均无影响	[39]
竹叶	500	毛竹	田间	5、15 t/hm ²	2 a	施用生物质炭后温室气体排放总量增加 19.70% 和 21.23%	[40]
竹叶	500	板栗	田间	2、5、10 t/hm ²	2 a	施用生物质炭显著降低了土壤 N ₂ O 排放 (2.60 ~ 2.11 t/(hm ² ·a)), 增加了土壤 CH ₄ 吸收 (3.13 ~ 4.22 t/(hm ² ·a)), 但没有改变土壤 CO ₂ 排放。	[41]
小麦秸秆、柳树枝、椰壳	550	茶园	实验室	20 g/kg	53 d	生物质炭抑制 N ₂ O 的排放, 促进 CO ₂ 的排放	[42]
—	450	森林	田间	10、20 t/hm ²	2 a	添加生物质炭降低了 CO ₂ 的排放	[43]
小麦秸秆、柳树枝、椰壳	600	茶园	实验室	10、30、50、70 g/kg	47 d	添加生物质炭促进了 CO ₂ 和 CH ₄ 排放	[44]

CO₂ 的排放,不同添加量的生物质炭均降低了 CH₄ 的排放。相比之下,孙贇等^[42]通过实验室研究发现,生物质炭抑制了茶园土壤的 N₂O 排放,促进了 CO₂ 的排放。蒋梦蝶等^[44]研究发现,添加生物质炭同时促进了茶园土壤的 CO₂ 和 CH₄ 排放。由此可见,在实验室可控条件下,即便是同一种土壤,生物质炭对其温室气体排放的影响也不一致,这主要与生物质炭的炭化温度和制备原材料相关^[35,42,44]。

由于实验室研究是在可控条件下进行,因此开展田间试验研究生物质炭对自然条件下人工林地土壤温室气体的排放更具有现实意义。Zhou 等^[34]通过 16 个月的长期监测发现,不同添加量的 800 °C 竹炭对森林温室气体排放没有显著影响。而葛晓改等^[43]经过两年的长期定位试验则发现,450 °C 的生物质炭降低了森林土壤的 CO₂ 的排放。Ge 等^[38]经过两年的研究发现,添加 500 °C 生物质炭减少毛竹人工林土壤的 CO₂ 排放。这些研究的差异可能与生物质炭的性质(由于热解温度的差异及制备原材料的不同所造成)、试验时间的长短,以及森林植被和土壤类型密切相关。这些因素的不同造成了不同研究中森林土壤的持水能力、有机质含量、pH、土壤结构以及微生物群落的不同,也最终影响了温室气体的排放^[24]。此外,树木的生物量较大,其进行光合作用所吸收的 CO₂ 量较高,甚至抵消土壤释放的 CO₂ 量,这与其他植被覆盖的土壤系统有较大差异。因此,在研究生物质炭对森林生态系统碳排放的影响时应综合考虑生物质炭的类型、森林植被类型、土壤性质等因素,尽量开展长期定位试验,以便得到更加精准的试验结果。

2.2 农业土壤

自古以来,农业生产在人类社会的发展过程中扮演着必不可少的角色。为了满足日益增长的人口对粮食的需求,大量的农药和化肥被应用到了农业活动中,这些人工合成材料生产及使用过程中大量温室气体被排放到大气中,加剧温室效应。目前,据报道,约 11% 进入大气的人为温室气体排放来自不同的农业活动,这严重危及农业的可持续发展^[45]。而在各种温室气体中,78% 的 N₂O 排放均来自农业土壤^[46-47],这主要是因为农业活动中氮肥的大量施用。此外,对于 CH₄ 来说,农业活动的排放量占 50%^[48-50],而这也主要归咎于氮肥的施用。由于 3 种强效温室气体的源和汇是生态系统中碳估算的主要组成部分,因此,将生物质炭作为土壤改良剂应用到农业土壤中一方面可以改良土壤,另一方面可以作为碳汇抵消人为活

动导致气候变暖的碳排放^[51]。据估计,由 2.2 Gt 的生物质原料生产的生物质炭每年可以从大气中去除 0.49 Gt 的碳,这意味着将生物质炭用作气候变化缓解策略具有更大应用潜力^[52]。

与人工林地生态系统的研究相似,添加生物质炭对农田土壤温室气体排放影响的研究也显示出了不同的结果。尽管大多数的研究表明向农田土壤中施用生物质炭可降低 CH₄ 的排放,仍有实验发现土壤中的生物质炭增加了 CH₄ 的排放量(表 2)。与林地生态系统相比,农业系统在植被类型方面有很大差异,农作物的生物量相对较小,通过光合作用对 CO₂ 的吸收也相对较少^[67-68]。而在农业用地中,旱作和淹水条件下,生物质炭对温室气体排放的影响也各不相同。研究表明,生物质炭在短期内(6 个月)对半干旱地区农田土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放没有显著影响,而显著降低了 CH₄ 的排放^[55],类似的结果在 Wang 等^[63]和 Polifka 等^[64]的研究中也有报道。相比之下,淹水条件的水稻土壤则是农田生态系统中 CH₄ 的主要排放源头。CH₄ 的排放是稻田中产甲烷菌和甲烷氧化细菌共同作用的结果,产甲烷菌生产后部分未被甲烷氧化细菌氧化的 CH₄ 从土壤中释放^[69]。稻田中九成的 CH₄ 是直接通过水稻通气组织传输排放,生物质炭输入可抑制产甲烷菌的生长,减少 CH₄ 的产生,从而降低 CH₄ 的排放^[61]。对于 CO₂ 而言,生物质炭施用的影响也取决于土壤环境和微生物活性,生物质炭的高孔隙率保护了微生物免受捕食者侵害,从而微生物总量得到提高,增加了土壤呼吸^[64],因此多数研究中土壤 CO₂ 的排放量增加的现象与之密不可分。而 Hua 等^[65]在研究生物质炭对土壤碳特性的影响中发现,生物质炭的施用显著降低了土壤中 CO₂ 的排放量,这主要是由于不稳定的生物质炭组分刺激微生物的生长与活性。另一方面,累积 CO₂ 通量值的下降与研究地区农作物生物量的增加之间存在相关性,这表明,生物质炭促进了作物的生长进而增加了其对 CO₂ 的吸收。例如,向实验土壤施加生物质炭后,与对照相比,CO₂ 的排放通量降低,培育的绿豆植株的生物量得到有效提高^[70]。与林地土壤的研究结果一致,生物质炭不同制备材料、热解温度和添加量会造成不一致的结果^[71],这也就带来了研究的不确定性。

N₂O 是硝化与反硝化的产物,当硝化反应占据主导地位时,土壤 N₂O 的排放量会相应增加^[72]。已有研究表明土壤含水量的变化是主导 N₂O 转化的因素之一^[73],生物质炭可提高土壤持水能力,促进 N₂O 向 N₂ 的转化,这是土壤 N₂O 的排放量降低的重要原

表 2 添加生物质炭对农业土壤温室气体排放的影响
Table 2 Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions from agricultural soils

原材料	热解温度 (°C)	作物 类型	试验 类型	生物质炭 添加量	时间	效果	参考 文献
玉米秸秆	-	春小麦	田间	10 ~ 50 t/hm ²	4 m	生物质炭添加量小于 30 t/hm ² 时, 温室气体排放量随其增加而显著减少; 添加量大于 30 t/hm ² 时, 温室气体排放量随其增加而显著增加	[53]
水稻秸秆	600	水稻	田间	20 t/hm ²	4 m	CH ₄ 的排放呈降低趋势, N ₂ O 的排放总量显著增加	[54]
锯末、槐树皮	550	农田土壤	小区 定位	10、30、50 g/kg	6 m	生物质炭在短期内对土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 的排放没有显著影响, CH ₄ 排放随着生物质炭添加量的增加而降低	[55]
稻草	300、500、 700	水稻	实验室	10 g/kg	2 m	生物质炭显著降低 CH ₄ 的排放, 高温生物质炭效果强于低温生物质炭	[56]
红树	600	水稻	实验室	10 t/hm ²	10 m	比表面积更大的生物质炭对减少 CH ₄ 的排放效果更好	[57]
沼渣	330	水稻	实验室	C 790 mg/pot	4 m	生物质炭的施用显著降低了 N ₂ O 排放并增加了 CH ₄ 排放	[58]
小麦秸秆	500	水稻	田间	48 t/hm ²	6 m	生物质炭降低 CH ₄ 的排放	[59]
小麦秸秆	400	稻、麦	田间	40 t/hm ²	40 m	老化的生物质炭显著降低了季节性 CH ₄ 排放量; 新老生物质炭对 N ₂ O 的季节性排放无显著影响	[60]
红树	600	水稻	田间	10 t/hm ²	8 m	生物质炭显著降低 CH ₄ 的排放	[61]
水稻、竹子	600	水稻	田间	22.5 t/hm ²	2 a	相较于秸秆生物质炭, 竹子生物质炭可更有效减少 CH ₄ 的排放	[62]
玉米秸秆	450	玉米	田间	30 t/hm ²	2 a	生物质炭的施用显著降低了 N ₂ O 排放	[63]
生物质残渣	650	玉米、黑麦、 羽扇豆等	田间	1、40 t/hm ²	38 m	生物质炭增加 CO ₂ 的排放	[64]
玉米秸秆	600	实验土壤	实验室	30、80 g/kg	7 m	生物质炭抑制 CO ₂ 的排放	[65]
稻壳	350	旱地水稻	田间	5、15、25 t/hm ²	4 m	生物质炭显著增加 CO ₂ 的排放	[66]

因^[63]。此外, 含水率提高带来的厌氧环境也增强了反硝化细菌的生理活性。生物质炭对土壤中 N 的吸附, 可以降低可用于硝化反应的 N 的比例, 进而减少土壤中 N₂O 的排放^[74]。尽管如此, 生物质炭的高孔隙率导致土壤中 O₂ 交换量增加, 干扰 N₂O 还原酶的作用, 也存在 N₂O 排放量增加的可能。因此, 基于以上研究, 针对农田土壤添加生物质炭的研究应该进一步区分耕作方式和作物类型开展更加详细的室内及田间试验。同时, 计算作物生长过程中吸收的 CO₂ 的量, 并对比土壤排放量, 从而更加精准地计算 CO₂ 净排放量。

2.3 设施蔬菜土壤

随着世界各地设施农业的兴起, 设施蔬菜产业发展迅速, 尤其以中国的设施蔬菜产业发展最快, 蔬菜的播种面积和产量分别占世界的 43% 和 49%^[75]。因此, 设施蔬菜用地在温室气体减排中的作用也不容忽视。近年来, 国内外学者, 特别是中国, 针对利用生物质炭影响设施蔬菜土壤温室气体排放开展了大量研究(表 3)。不同于森林土壤长期处在植被覆盖的潮

湿环境, 以及农业水稻土的长期淹水环境, 设施蔬菜土壤经常处在干湿交替的环境中, 因此其温室气体排放量和产生机理也与前两者存在差异。

相较于林地植被和农田作物, 设施蔬菜体型较小, 不同条件下生长差异较为明显, 易于观测分析。如表 3 所示, 常研究的蔬菜类型包括莴苣、卷心菜、生菜、辣椒、菜心、苋菜、番茄、大白菜、白萝卜、小白菜、香菜、菠菜等蔬菜。陆扣萍等^[85]研究发现, 竹炭比猪骨炭对土壤中 CO₂ 与 N₂O 排放的抑制效果更佳, 并且, 一次性施用 20 t/hm² 竹炭处理优于分批施用处理。除此之外, 他们还发现一次性施用猪骨炭处理明显促进了两茬空心菜土壤 CO₂ 排放。由此可见, 不同种类的生物质炭对土壤温室气体排放的影响存在较大差异, 这主要是由于猪骨生物质炭含有较多的灰分, 添加到土壤中后引入了大量的易分解有机碳, 为土壤微生物生长提供了碳源, 进而促进了 CO₂ 的排放^[86]。在较高温度条件下或者木料炭化材料(如树枝、竹子等)制备的生物质炭灰分含量较低, 碳含量较高, 其固碳能力优于禾本科植物材料(如秸秆、

表 3 添加生物质炭对蔬菜土壤温室气体排放的影响
Table 3 Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions from vegetable soils

原材料	热解温度 (°C)	蔬菜类型	试验 类型	生物质炭 添加量	时间	效果	参考 文献
油菜秸秆	-	茼蒿、卷心菜、 生菜、辣椒	田间	10 t/hm ²	1 a	生物质炭增加 CO ₂ 的排放, 减少 CH ₄ 的排放	[76]
苹果树枝条	450	辣椒	田间	20、40、60、 80 t/hm ²	42 m	CO ₂ 的排放随生物质炭施用量增加而增加; N ₂ O 排放随生物质炭施用量增加先减少后增 加; CH ₄ 的排放被抑制	[77]
玉米秸秆	400	菜心、苋菜	实验室	20、30、40 t/hm ²	3 m	生物质炭抑制 CH ₄ 的排放, 大大降低 N ₂ O 的 排放	[78]
小麦秸秆	550	番茄、大白菜、绿豆	田间	10、20、40 t/hm ²	1 a	生物质炭的施用减少了 N ₂ O 的排放	[79]
小麦秸秆	400	苋菜、白萝卜、小白菜、 香菜、菠菜	田间	20、40 t/hm ²	30 m	生物质炭显著降低 N ₂ O 的排放	[80]
小麦秸秆	400	苋菜、白萝卜、小白菜、 菠菜、香菜	田间	20 t/hm ²	2、7 a	长期生物炭改良可降低 N ₂ O 排放	[81]
小麦秸秆	350~550	空心菜、小白菜、 香菜、茼蒿	田间	20 g/kg	1 a	小麦秸秆生物质炭对 N ₂ O 的排放无影响	[82]
-	-	菊苣、生菜、卷心菜	田间	10 t/hm ²	14 m	施用生物质炭显著降低 N ₂ O 的排放	[83]
花生壳、污泥	550	绿豆	实验室	40 g/kg	3 m	施用生物质炭后 CO ₂ 、CH ₄ 的排放显著降低, N ₂ O 的排放先增加后减少	[70]
白桦	360~380	卷心菜	田间	10、30 t/hm ²	16 m	生物炭显著降低了土壤 CO ₂ 的排放	[84]

稻壳、花生壳等)^[87]。另有研究发现, 即便生物质炭促进土壤中 CO₂ 的排放, 其排放的 CO₂ 的含碳量也仅占生物质炭总量的 0.1%~0.8%, 这还不包括生物质炭促进蔬菜生长从而促进蔬菜对 CO₂ 的吸收量^[88]。

生物质炭通过影响土壤通气效率、pH 和蔬菜生长环境碳氮比来控制氮的转化^[89]。由表 3 可以看出, 在对番茄、大白菜、白萝卜、小白菜、菠菜等主要蔬菜类型的研究中发现, 土壤 N₂O 的排放量随生物质炭的施加而降低的结果较为一致^[80-81]。Zhang 等^[79]通过对种植番茄、大白菜和绿豆的蔬菜土壤研究表明, 添加小麦秸秆生物质炭显著降低了土壤 N₂O 的排放。对于不同作物来讲, N₂O 排放量的减少各不相同, 这表明蔬菜类型的不同也会对生物质炭的效果产生影响。然而, 在对栽培辣椒的土壤研究中发现, 当生物质炭添加量超过一定比例后, 随着生物质炭添加量的增加 N₂O 排放量增加^[77], 这主要是和生物质炭的施用量和蔬菜类型有关。因此, 应该进一步开展针对不同蔬菜类型如何影响土壤温室气体排放的相关机理研究。

与种植水稻淹水农田环境相比, 设施蔬菜培育环境土壤颗粒大团聚体占比较高, 构成嗜甲烷细菌适宜的生长环境, 生物质炭的加入改善土壤碳氮比, 进一步提高嗜甲烷细菌活性, 最终降低土壤中 CH₄ 的排放^[90]。Jia 等^[78]研究发现, 玉米秸秆生物质炭显著

降低了菜心和苋菜土壤中 CH₄ 的排放。Ibrahim 等^[70]发现, 花生壳和污泥生物质炭显著抑制了土壤中 CH₄ 的排放, 他们推测这种抑制作用可能是由于产甲烷菌的活性被抑制所导致。综上所述, 在对生物质炭影响蔬菜用地土壤温室气体排放量评估时, 有必要充分考虑生物质炭的性质以及其与土壤环境共同作用下的作物类型与环境差异。

3 生物质炭影响土壤温室气体排放的机理

土壤中添加生物质炭对不同种类温室气体排放的影响机理如图 3 所示。在生物质炭影响 CO₂ 排放的机理中, 其刺激土壤 CO₂ 排放主要是由于土壤中不稳定碳的矿化或者生物质炭向土壤中释放的无机碳的增加^[91-92]。研究表明, 施加生物质炭可以显著提高土壤有机碳和土壤微生物生物量碳含量, 这将提高微生物活性, 进而促进土壤 CO₂ 排放^[93]。低温条件下制备的生物质炭的无机碳组分含量更高, 从而更容易被微生物利用, 导致 CO₂ 的排放增加^[94-95]。由于生物质炭一般具有较大的吸附能力, 可以吸附土壤中的 CO₂, 降低其排放^[96]。此外, 生物质炭可以通过影响土壤性质包括含水量、孔隙率、聚集度、pH、CEC 和微生物活性从而影响 CO₂ 的排放^[97]。

对于 CH₄ 来讲, 生物质炭影响其排放的机理主要有: ①由于生物质炭是碱性材料, 施加生物质炭通

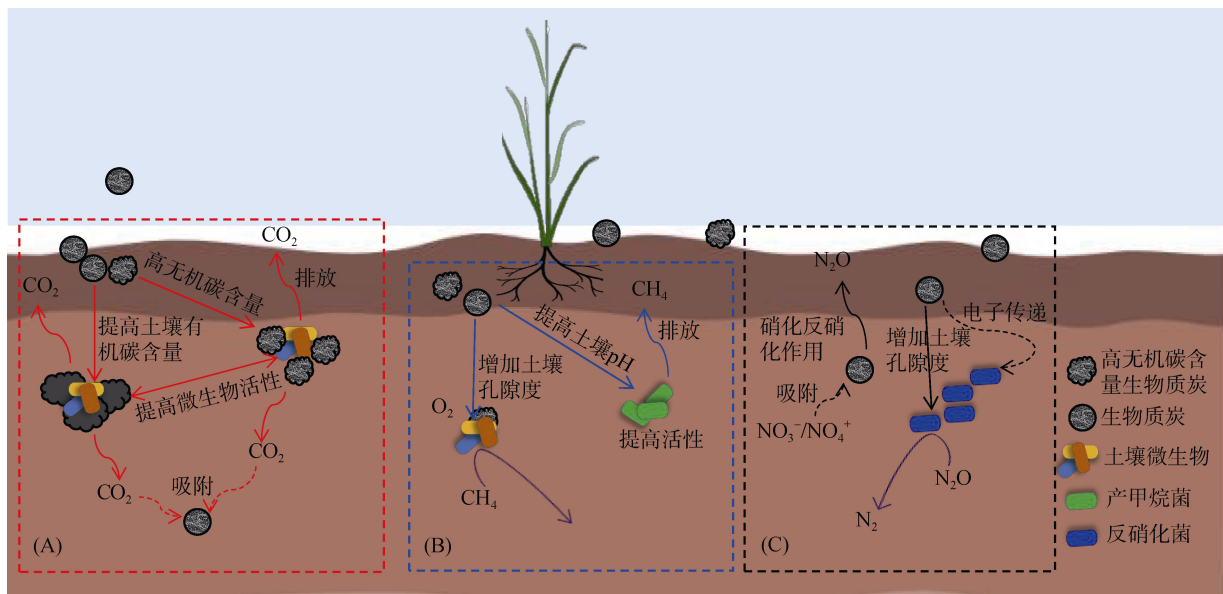


图 3 土壤中添加生物质炭对温室气体 CO_2 (A)、 CH_4 (B)和 N_2O (C)排放的影响机理

Fig. 3 Mechanism of adding biochar on effects of soil greenhouse gas emissions of CO_2 (A), CH_4 (B)and N_2O (C)

常会提高土壤 pH, 这将有利于产甲烷菌的生长, 从而促进 CH_4 的排放^[98]; ②生物质炭的应用可以降低土壤容重和增加土壤孔隙度, 这将有利于提高土壤微生物的活性, 从而有利于微生物对 CH_4 的氧化和吸收^[99]。在这两种机理中前者作用相对较弱, 生物质炭提高土壤 pH 从而间接影响产甲烷菌的生长, 而土壤中微生物种类繁多, 生物质炭同时也可以促进其他微生物的活性, 从而和产甲烷菌产生竞争。而后者则是主要控制机理, 土壤中添加生物质炭必定会增加土壤的通气性和孔隙度, 从而造成土壤中氧气含量的增加, 而 CH_4 的代谢途径是有氧过程, 因此大部分研究证实土壤中添加生物质炭可减少 CH_4 的排放。

土壤中 N_2O 的排放主要是由硝化反硝化过程决定, 土壤中硝化菌和反硝化菌活性的变化直接驱动 N_2O 的释放。添加生物质炭有利于电子向土壤反硝化微生物的传递, 促进 N_2O 向 N_2 的还原, 降低 N_2O 的排放^[100]。生物质炭可以通过自身特殊的性质, 大量吸附土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- , 减少 NH_3 挥发, 或固定氮化合物, 这些过程减少了可用于硝化或反硝化的无机氮源, 从而限制产生 N_2O 作为代谢副产品^[101-102]。此外, 生物质炭能刺激 *nosZ* 的转录(反硝化细菌基因标志物), 这表明通过该方式生物质炭可进一步将 N_2O 还原为 N_2 来减少 N_2O 的排放^[103]。

以上作用机理的提出均是基于大量的室内及田间试验研究, 然而, 3 种温室气体排放的具体机理的进一步阐明还取决于不同植被类型下土壤性质的差异、添加的生物质炭性质的差异, 以及试验时间

的长短。

4 结论与展望

通过对近年来各项相关研究的综述可以发现, 在大部分研究中, 添加生物质炭后都可以降低土壤 N_2O 的排放, 并且增加土壤对于 CH_4 的吸收, 而对 CO_2 的影响没有统一的定论。生物质炭作为新型环境友好材料, 其具备巨大的潜力, 极有可能在未来遏制全球变暖的过程中发挥不可或缺的作用。但是作为一项新兴的技术, 生物质炭的研究仍有许多的不足之处。

1)系统性的研究较少, 一如前文所述, 不同的原料和不同的制备过程都会导致生物质炭的性质有着较大的差异, 而试验过程中不同的植被类型土壤、气候条件、作物种类、当地的土壤性质、土壤中微生物的种类和数量以及最为关键的人类活动等影响因素众多, 同一试验中的变量过多, 这就导致了如今生物质炭的研究成果众多, 但是却并没有统一定论可以直接确定生物质炭的具体效用。因此, 今后应开展系统性的研究, 从原料的种类到制作过程中导致的生物质炭性质差异, 从南方的温暖湿润到北方的寒冷干燥中导致的气候差异, 再从盆地平原的富饶土地到高原沙漠的荒芜土地中土壤性质的差异等, 将这些不同的变量统计并整理, 进行系统性的研究。

2)缺少权威的参考值, 生物质炭对于温室气体排放或吸收的影响是多方面的, 根据具体情况的不同, 会导致产生的结果不同。在同一片土地上, 能够添加的生物质炭的量是有上限的, 然而人们对于生物质炭

能缓解温室效应带来益处的期望是无限的, 所以应当根据地区政策及需求计算生物质炭投入的最优量, 作为权威的参考值以供未来的研究需要。

3) 长期研究较少, 大部分有关生物质炭影响土壤温室气体排放的研究只是短期研究。由于生物质炭技术的兴起时间与研究人员时间和空间上的限制, 一般有关研究只是持续了几个月到几年不等, 很少有对添加生物质炭的土壤的长期观测, 而生物质炭不易分解、毁坏, 其保存时间动辄百年, 所以需要更多长时间的观测与研究来判断其对温室气体排放的影响。

4) 生物质炭对环境负面影响的研究较少, 在生物质炭的施用过程中, 其本身可能携带一定有害物质(如重金属), 这会对土壤环境产生不良影响。此外, 添加到土壤中的生物质炭存在什么样的长期风险尚不明确。因此, 在利用生物质炭时应综合考虑多种因素可能对环境产生的负面影响, 开展生物质炭对环境影响的风险评估并制定相应的解决措施, 从而确保生物质炭的安全使用。

5) 生物质炭在制备过程中会产生纳米级的颗粒, 称为纳米生物质炭。相比普通生物质炭, 纳米生物质炭具有更大的比表面积和更强的迁移能力。这种类型的生物质炭会对土壤温室气体排放产生何种影响尚不明确, 未来应开展相关研究, 明确纳米生物质炭在土壤固碳减排中的作用。

6) 目前生物质炭类土壤添加剂的成本相对较高, 这大大限制了生物质炭的推广及应用。今后的研究应重点优化生物质炭的制备工艺, 同时降低原材料收集成本, 从而降低生物质炭生产成本, 促进其商业化。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K. Sea level change//Climate change 2013—The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1137–1216.
- [2] WMO. State of the global climate 2020[R]. World Meteorological Organization (WMO), 2021.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156–159.
- [4] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77–91.
- [5] 周璞, 侯华丽, 张惠, 等. 碳中和背景下提升土壤碳汇能力的前景与实施建议[J]. *环境保护*, 2021, 49(16): 63–67.
- [6] 赵鑫. 基于 Meta-analysis 对我国保护性耕作农田土壤固碳减排效应及其潜力的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [7] Ontl T A, Schulte L A. Soil carbon storage[J]. *Nature Education Knowledge*, 2012, 3(10): 35.
- [8] 王树涛, 门明新, 刘微, 等. 农田土壤固碳作用对温室气体减排的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(6): 1775–1780.
- [9] Xu M, Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 203: 16–28.
- [10] Hoegh-Guldberg O, Cai R S, Poloczanska E S, et al. The Ocean/Barros V R, Field C B, Dokken D J, et al. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014, 1655–1731.
- [11] 张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物质炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 970–977.
- [12] Zhang X K, Wang H L, He L Z, et al. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8472–8483.
- [13] Zhang X K, He L Z, Sarmah A K, et al. Retention and release of diethyl phthalate in biochar-amended vegetable garden soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(11): 1790–1799.
- [14] Akdeniz N. A systematic review of biochar use in animal waste composting[J]. *Waste Management*, 2019, 88: 291–300.
- [15] 石永亮. 生物质炭特性及在水中重金属吸附领域的研究进展[J]. *能源与节能*, 2021(11): 11–13, 17.
- [16] Wang H L, Yang X, He L Z, et al. Using biochar for remediation of contaminated soils//Luo Y M, Tu C. Twenty years of research and development on soil pollution and remediation in China[M]. Singapore: Springer, 2018: 763–783.
- [17] Zhang X K, Wells M, Niazi N K, et al. Nanobiochar-rhizosphere interactions: Implications for the remediation of heavy-metal contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 299: 118810.
- [18] 张皓钰, 刘竞, 易军, 等. 生物质炭短期添加对不同类型土壤水力性质的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 396–405.
- [19] Ennis C J, Evans A G, Islam M, et al. Biochar: Carbon sequestration, land remediation, and impacts on soil microbiology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(22): 2311–2364.
- [20] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1315–1324.
- [21] 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.
- [22] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国典型省份小麦和玉米农田化学氮肥施用与生产运输过程的温室气体排放量估算[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 707–713.
- [23] 史冬伟, 刘衍, 孙志华, 等. 施肥方式与施用生物质炭对设施菜地氨排放的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 255–261.
- [24] Li Y F, Hu S D, Chen J H, et al. Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: A review[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(2): 546–563.

- [25] Mukherjee A, Lal R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 313–339.
- [26] van Zwieten L, Singh B, Joseph S, et al. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil, Biochar for environmental management//Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management science and technology[M]. London: Earthscan, 2012: 227–249.
- [27] Zhang C, Zeng G M, Huang D L, et al. Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 902–922.
- [28] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71–90.
- [29] Skiba U M, Sheppard L J, MacDonald J, et al. Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(19): 3311–3320.
- [30] Flechard C, Neftel A, Jocher M, et al. Bi-directional soil/atmosphere N₂O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(12): 2114–2127.
- [31] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320–2322.
- [32] Wood T E, Cavaleri M A, Reed S C. Tropical forest carbon balance in a warmer world: A critical review spanning microbial- to ecosystem-scale processes[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2012, 87(4): 912–927.
- [33] Payn T, Carnus J M, Freer-Smith P, et al. Changes in planted forests and future global implications[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 57–67.
- [34] Zhou G Y, Zhou X H, Zhang T, et al. Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405: 339–349.
- [35] Hawthorne I, Johnson M S, Jassal R S, et al. Application of biochar and nitrogen influences fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a forest soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192: 203–214.
- [36] Liao X L, Chen Y J, Ruan H H, et al. Incapability of biochar to mitigate biogas slurry induced N₂O emissions: Field investigations after 7 years of biochar application in a poplar plantation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148572.
- [37] Cui J L, Glatzel S, Bruckman V J, et al. Long-term effects of biochar application on greenhouse gas production and microbial community in temperate forest soils under increasing temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145021.
- [38] Ge X G, Cao Y H, Zhou B Z, et al. Combined application of biochar and N increased temperature sensitivity of soil respiration but still decreased the soil CO₂ emissions in moso bamboo plantations[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 139003.
- [39] Li J B, Kwak J H, Chang S X, et al. Greenhouse gas emissions from forest soils reduced by straw biochar and nitrapyrin applications[J]. *Land*, 2021, 10(2): 189.
- [40] Xu L, Fang H Y, Deng X, et al. Biochar application increased ecosystem carbon sequestration capacity in a Moso bamboo forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 475: 118447.
- [41] Lu X H, Li Y F, Wang H L, et al. Responses of soil greenhouse gas emissions to different application rates of biochar in a subtropical Chinese chestnut plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 168–179.
- [42] 孙赞, 何志龙, 林杉, 等. 不同生物质炭对酸化茶园土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12): 2544–2552.
- [43] 葛晓改, 周本智, 肖文发, 等. 生物质炭添加对毛竹林土壤呼吸动态和温度敏感性的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(11): 1177–1189.
- [44] 蒋梦蝶, 何志龙, 孙赞, 等. 尿素和生物质炭对茶园土壤 pH 值及 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 196–204.
- [45] IPCC. Summary for policymakers//Shukla P R, Skea J, Buendia E C. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019.
- [46] IPCC. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems: Chapter 1: Framing and context[M]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [47] Shakoor A, Shahzad S M, Chatterjee N, et al. Nitrous oxide emission from agricultural soils: Application of animal manure or biochar? A global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112170.
- [48] Shakoor A, Shahbaz M, Farooq T H, et al. A global meta-analysis of greenhouse gases emission and crop yield under no-tillage as compared to conventional tillage[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 750: 142299.
- [49] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512–523.
- [50] Xu X, Wu Z, Dong Y B, et al. Effects of nitrogen and biochar amendment on soil methane concentration profiles and diffusion in a rice-wheat annual rotation system[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1–13.
- [51] Montanarella L, Lugato E. The application of biochar in the EU: Challenges and opportunities[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 462–473.
- [52] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J].

- Nature Communications, 2010, 1(1): 1–9.
- [53] 宋敏, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放日变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1300–1309.
- [54] 陈峰, 刘娟, 郑梅群, 等. 生物质炭和腐殖质对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 368–374.
- [55] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3393–3400.
- [56] Cai F, Feng Z J, Zhu L Z. Effects of biochar on CH_4 emission with straw application on paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(2): 599–609.
- [57] Sriphiro P, Chidthaisong A, Yagi K, et al. Effects of biochar particle size on methane emissions from rice cultivation[J]. Journal of Renewable Materials, 2020, 8(10): 1199–1214.
- [58] Singla A, Inubushi K. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emission from soils vegetated with paddy[J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(1): 239–243.
- [59] Chen D, Wang C, Shen J L, et al. Response of CH_4 emissions to straw and biochar applications in double-rice cropping systems: Insights from observations and modeling[J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 95–103.
- [60] Wu Z, Zhang X, Dong Y B, et al. Microbial explanations for field-aged biochar mitigating greenhouse gas emissions during a rice-growing season[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(31): 31307–31317.
- [61] Sriphiro P, Chidthaisong A, Yagi K, et al. Effects of biochar on methane emission, grain yield, and soil in rice cultivation in Thailand[J]. Carbon Management, 2021, 12(2): 109–121.
- [62] Dong D, Yang M, Wang C, et al. Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(8): 1450–1460.
- [63] Wang X, Lu P, Yang P L, et al. Effects of fertilizer and biochar applications on the relationship among soil moisture, temperature, and N_2O emissions in farmland[J]. PeerJ, 2021, 9: e11674.
- [64] Polifka S, Wiedner K, Glaser B. Increased CO_2 fluxes from a sandy Cambisol under agricultural use in the Wendland region, Northern Germany, three years after biochar substrates application[J]. GCB Bioenergy, 2018, 10(7): 432–443.
- [65] Hua L, Lu Z Q, Ma H R, et al. Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014, 33(3): 941–946.
- [66] Olaniyan J O, Isimikalu T O, Raji B A, et al. An investigation of the effect of biochar application rates on CO_2 emissions in soils under upland rice production in southern Guinea Savannah of Nigeria[J]. Heliyon, 2020, 6(11): e05578.
- [67] 耿元波, 董云社, 孟维奇. 陆地碳循环研究进展[J]. 地理科学进展, 2000, 19(4): 297–306.
- [68] 田新程. 森林碳汇: 中国的努力[J]. 中国林业, 2010(1): 8–10.
- [69] Vishwakarma P, Singh M, Dubey S K. Changes in methanotrophic community composition after rice crop harvest in tropical soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(5): 471–479.
- [70] Ibrahim M, Li G, Khan S, et al. Biochars mitigate greenhouse gas emissions and bioaccumulation of potentially toxic elements and arsenic speciation in Phaseolus vulgaris L[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(24): 19524–19534.
- [71] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, et al. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(4): 695–702.
- [72] 郑翔, 刘琦, 曹敏敏, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对氮输入的响应研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1190–1203.
- [73] 曹开勋, 赵坤, 金王飞飞, 等. 水氮互作对稻田温室气体排放的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1386–1396.
- [74] 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.
- [75] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [76] Huang R, Wang Z F, Xiao Y, et al. Increases in temperature response to CO_2 emissions in biochar-amended vegetable field soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(33): 50895–50905.
- [77] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3634–3641.
- [78] Jia J X, Li B, Chen Z Z, et al. Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N_2O and CH_4 [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(4): 503–509.
- [79] Zhang Y J, Wang H, Maucieri C, et al. Annual nitric and nitrous oxide emissions response to biochar amendment from an intensive greenhouse vegetable system in southeast China[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 879–886.
- [80] Li B, Bi Z C, Xiong Z Q. Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China[J]. GCB Bioenergy, 2017, 9(2): 400–413.
- [81] Zhang Q Q, Zhang X, Duan P P, et al. The effect of long-term biochar amendment on N_2O emissions: Experiments with $\text{N}^{15}\text{-O}^{18}$ isotopes combined with specific inhibition approaches[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144533.
- [82] Wang J, Chen Z, Xiong Z, et al. Effects of biochar amendment on greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget and properties of an acidic soil under intensive vegetable production[J]. Soil Use and Management, 2015,

- 31(3): 375–383.
- [83] Yi Q, Tang S H, Fan X L, et al. Effects of nitrogen application rate, nitrogen synergist and biochar on nitrous oxide emissions from vegetable field in South China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(4): e0175325.
- [84] Bovsun M A, Castaldi S, Nesterova O V, et al. Effect of biochar on soil CO₂ fluxes from agricultural field experiments in Russian far east[J]. *Agronomy*, 2021, 11(8): 1559.
- [85] 陆扣萍, 郭茜, 胡国涛, 等. 竹炭和猪炭对空心菜-小青菜轮作土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1547–1554.
- [86] 张继宁, 周胜, 孙会峰, 等. 生物质炭在我国蔬菜地应用的研究现状与展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(4): 543–550.
- [87] Zhang J N, Lü F, Luo C H, et al. Humification characterization of biochar and its potential as a composting amendment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2): 390–397.
- [88] 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.
- [89] 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 & Environment*, 2010, 139(4): 469–475.
- [90] Huang W, Zhao Y J, Wu J T, et al. Effects of different influent C/N ratios on the performance of various earthworm eco-filter systems: Nutrient removal and greenhouse gas emission[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, 30(1): 109–118.
- [91] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2345–2347.
- [92] 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 and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169–1179.
- [93] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(2): 392–406.
- [94] Hale S E, Lehmann J, Rutherford D, et al. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(5): 2830–2838.
- [95] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typic kandiudult[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 281–288.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] Jeffery S, Verheijen F G A, Kammann C, et al. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101: 251–258.
- [99] Brassard P, Godbout S, Raghavan V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 484–497.
- [100] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, et al. Biochar and denitrification in soils: When, how much and why does biochar reduce N₂O emissions?[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1–7.
- [101] Clough T, Condon L, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275–293.
- [102] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from ferrosol[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 555.
- [103] Xu H J, Wang X H, Li H, et al. Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9391–9399.