

餐厨垃圾厌氧发酵耦合炭化及其在园林绿化中的应用展望

Coupling Anaerobic Digestion and Carbonization of Food Waste and its Application Prospect in Landscaping

王 晨 沈国清* 蒲加军 邢 涛 车 磊 李正元
WANG Chen SHEN Guoqing* PU Jiajun XING Tao CHE Lei LI Zhengyuan

基金项目:

国家重点研发计划项目“都市农区面源污染防控与生态功能提升技术示范”(编号: 2018YFD0800205)

浙江省重点研发计划项目“农业废弃物资源化利用技术研发-农业废弃物干式厌氧消化与热解炭化技术协同利用技术与工程装备开发”(编号: 2019C02063)

湖州市重点研发项目“多种农业废弃物协同资源化利用技术研究及装备开发”(编号: 2018ZD2026)

文章编号: 1000-0283 (2020) 06-014-05

DOI: 10.12193/j.laig.2020.06.014.003

中图分类号: TU986

文献标识码: A

收稿日期: 2020-04-27

修回日期: 2020-05-05

摘要

随着中国垃圾分类工作的持续推进,餐厨垃圾资源化综合利用越来越重要。虽然餐厨垃圾中蛋白质、脂肪和碳水化合物等营养成分含量高,但含水量大、盐分高、干物质少、处理成本高,发展具有高附加值的餐厨垃圾资源化综合利用技术是推进垃圾分类可持续发展的必然途径。文章从餐厨垃圾高值资源化利用的角度,对国内外餐厨垃圾厌氧发酵及生物质热解炭化技术进行综述,提出餐厨垃圾厌氧发酵耦合热解炭化是未来餐厨垃圾高值化综合利用的重要发展方向,并对生物炭在园林绿化中的应用进行了展望。

关键词

餐厨垃圾; 资源化利用; 厌氧发酵; 生物炭; 园林绿化

Abstract

As the garbage classification develops, the comprehensive resource utilization of food waste becomes increasingly essential. Food waste is rich in protein, fat, and carbohydrates, but it also contains a large amount of moisture and salinity with the low dry matter, which leads to the high processing cost. It is inevitable to develop high value-added and comprehensive resource utilization technologies of food waste to promote the sustainable implementation of waste classification. With the perspective of high-value resource utilization, this work reviews the anaerobic fermentation of food waste and biomass pyrolysis carbonization technology. And then, it proposed that coupling anaerobic digestion and carbonization of food waste is a significant development direction for the future high-value and comprehensive utilization of food waste. Finally, the application of biochar in landscaping has prospected.

Key words

food waste; resource utilization; anaerobic fermentation; biochar; landscaping

王 晨

1994年生/男/安徽安庆人/上海交通大学博士在读/研究方向为废弃物资源化利用(上海 200240)

沈国清

1965年生/男/江苏常熟人/博士/上海交通大学教授/研究方向为废弃物综合利用与环境效应(上海 200240)

蒲加军

1979年生/男/安徽怀远人/时科生物科技(上海)有限公司/研究方向为生物炭基肥(上海 201108)

餐厨垃圾(food waste)是餐饮垃圾和厨余垃圾的总称。餐饮垃圾主要来源于餐馆、饭店、单位食堂等的饮食剩余物,以及后厨的果蔬、肉食、油脂和面点等的加工过程废弃物。厨余垃圾主要来源于家庭日常生活中丢弃的果蔬及食物下脚料、剩菜剩饭、瓜果皮等易腐有机垃圾^[1]。从化学组成成分来看,餐厨垃圾虽具水分和盐分含量高、处理难度大的问题,但糖类、蛋白质和脂肪等有机物含量丰富,还含有少量的氮、磷和钾等微量元素^[2],利用价值高^[3-4],

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: gqsh@sjtu.edu.cn

同时, 重金属等污染物含量低, 后续资源化利用危害小。目前, 常规的焚烧、卫生填埋、生态饲料、厌氧消化、好氧堆肥和蚯蚓堆肥等餐厨垃圾处理方式, 通常存在处理时间长、资源化利用效率和附加值低等不足。随着国内垃圾分类工作的持续推进, 采用具有高附加值的餐厨垃圾资源化综合利用技术是推进垃圾分类可持续开展的必然途径^[6]。文章针对中国餐厨垃圾资源化利用现状, 阐述餐厨垃圾厌氧发酵和生物质热解炭化技术, 展望生物炭在园林绿化中的应用前景, 同时提出餐厨垃圾厌氧发酵耦合热解炭化能够实现能量和沼渣的充分利用, 是未来餐厨垃圾资源化综合利用的重要方向。

1 餐厨垃圾厌氧发酵现状

国内垃圾分类后, 厌氧发酵产沼发电正在成为餐厨垃圾资源化利用的主流发展方向^[6]。垃圾厌氧发酵技术成熟, 有成套处理设备与工艺, 自动化程度高, 消化过程运行稳定, 对环境污染小, 并能产出清洁能源。餐厨垃圾厌氧发酵主要包括水解、酸化、产氢产乙酸和产甲烷^[7-9]四个步骤。与发达国家相比, 中国餐厨垃圾厌氧发酵技术仍处在较低水平, 主要是餐厨垃圾高固体含量、高油脂和高盐分的特性, 导致甲烷产量低。研究表明, 对餐厨垃圾进行预处理, 可以提高沼气产率。

常见的预处理方法有物理法(机械研磨、超声、高压灭菌、微波、热处理等)、化学法(酸化)、生物法(增殖作用)及不同方法的组合。Deepanraj等^[10]采用高压灭菌、微波和超声预处理技术, 研究不同预处理技术对禽粪和餐厨垃圾厌氧发酵沼气产率的影响, 结果表明, 这三种预处理技术对沼气的累积产量分别增加了4.67%、6.43%和10.12%。此外, 将园林废弃物与餐厨垃圾共发酵, 可以提高甲烷产率。陈丽琴^[11]研究校园绿化中废弃的草坪草与餐厨垃圾共发酵体系, 认为草料可平衡发酵底物营养元素和C/N比, 提高厌氧消化系统的稳定性。当餐厨垃圾和草坪草的配比为3:7时, 沼气产率提高了1.44倍。Chen等^[12]用园林中植物枝叶作为底物, 与餐厨垃圾和剩余污泥共发酵, 结果表明, 适量的园林废弃物有助于厌氧发酵体系中有机的降解, 同时还可以改善消化系统的稳定性, 并优化挥发性脂肪酸的组成结构, 从而提高甲烷产率。除甲烷产量低之外, 目前, 国内餐厨垃圾厌氧发酵存在的最大问题是厌氧发酵残余物沼渣处理难度大, 这已经成为垃圾分类可持续发展的一个重要制约因素。新兴的生物炭技术, 为

餐厨垃圾厌氧发酵残余物沼渣资源化利用提供了新的途径。

2 生物炭

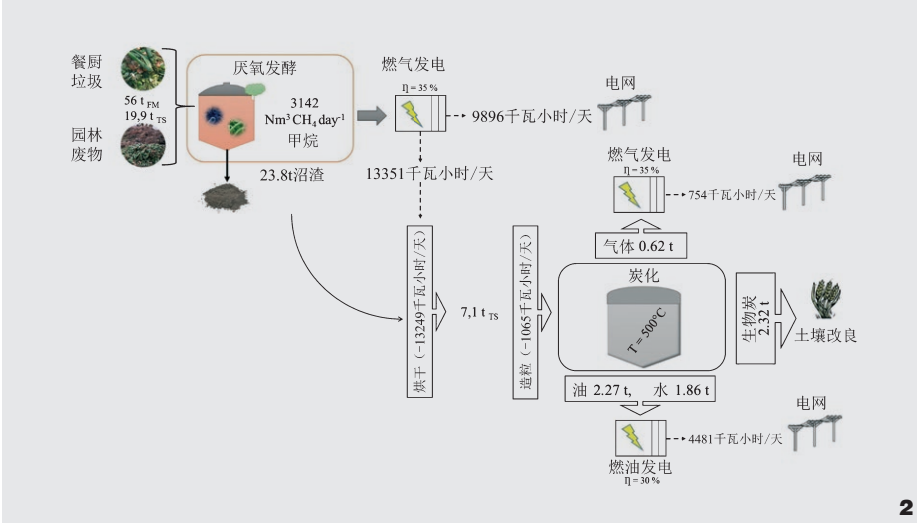
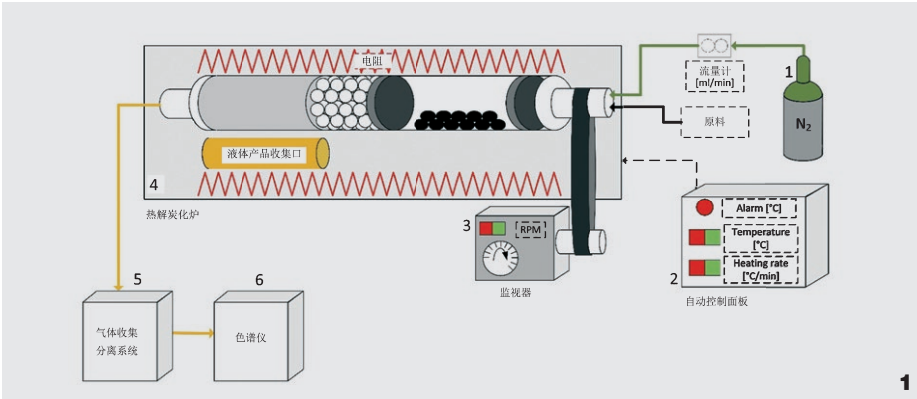
生物炭是由生物质在缺氧情况下, 经高温产生的一类稳定、高度芳香化、富含碳素的固态物质。按制备方法不同, 生物炭主要包括高温裂解生物炭(pyrochar)和水热生物炭(以下简称水热炭, hydrochar)。裂解生物炭是含碳有机生物质在低氧或缺氧条件下经高温热解(<700℃)形成的稳定富碳产物。水热炭是以生物质为原料, 在150℃~350℃和自生压力条件下, 经水热反应得到的以碳为主体、含氧官能团丰富、热值高的黑色固体产物。

2.1 高温裂解生物炭

餐厨垃圾可以通过高温热裂解生成生物炭。钱鹏等^[13]将餐厨垃圾在450℃~600℃下热解制生物炭, 生物炭产率为31%, 热值为17119 MJ·kg⁻¹。Alghashm等^[14]以餐厨垃圾厌氧发酵残余物沼渣为研究对象, 采用限氧热解法, 在400℃~900℃的温度范围内, 制备沼渣生物炭, 对其表面特性和吸附性能与肥效进行了研究, 结果表明, 900℃热解温度条件下制备的生物炭对磷和毒死蜱吸附容量分别达到12.28 mg·g⁻¹和39.18 mg·g⁻¹。盆栽试验表明, 餐厨垃圾厌氧发酵残余物沼渣制备的生物炭施入土壤, 可以提高土壤肥效, 促进农作物的生长。Monlau等^[15]报道的一种沼渣热解炭化回转窑炉是一种外热式反应炉(图1), 通过夹套内的热烟气加热窑壁, 物料随着带有倾角的回转窑转动, 从窑头缓慢移动到窑尾。在移动过程中, 沼渣不断与窑壁接触, 获得热解能源。Tripathi等报道^[16], 在生物炭制备过程中, 还可以添加催化剂提高生物炭的产率和品质, 常见的催化剂包括Na₂CO₃、KCl、FeCl₃、CaO、ZnO和Al₂O₃等。园林废弃物与餐厨垃圾共同热解炭化也可以提高生物炭的性能。Zhang等^[17]用厦门本地的园林废弃物茅草枝条与餐厨垃圾共同热解制备生物炭, 提高了生物炭对重金属离子Cu²⁺、Zn²⁺和Mn²⁺的吸附能力, 并认为, 园林废弃物中木质纤维素结构在热解炭化过程中会导致两种混合物的生物炭产生特定的吸附位点, 改善生物炭表面官能团结构。

2.2 水热生物炭

与其他餐厨垃圾热化学及生物转化技术相比, 水热炭化反应在水中进行, 原料无需干燥, 能耗低, 因此, 高含水率



1. 沼渣热解炭化回转窑炉
2. 厌氧发酵耦合炭化技术与24h运行能量平衡图

的餐厨垃圾制备水热生物炭具有明显优势。金桃^[18]等用餐厨垃圾作为碳源，经水热炭化过程，在180℃下制备出热值为30.18 MJ/kg的水热生物炭，其中炭转化率为54.08%。Li^[19]等用餐厨垃圾制备水热生物炭并研究其燃烧特性，结果表明，餐厨垃圾中脂质含量越高，水热生物炭的着火点和活化能越低，热值越高。水热炭化是放热过程，在水热炭化过程中，生物质发生水解、脱水、脱羧、聚合和芳构化反应^[20]。通常，水热生物炭的炭产率高于热解生物炭^[21]，且含有更多含氧官能团，但比表面积较小^[22]。水热生物炭的产率与热解温度有关。在一定温度范围内，水热炭的炭含量随着温度升高而升高，但水热炭产率和比表面积随之相应降低^[23]。虽然，水热炭化技术在

高含水率餐厨垃圾资源化利用方面展现了很好的应用前景，然而，餐厨垃圾水热炭化技术发展与挑战并存，未来应着力在餐厨垃圾水热炭化条件优化、水热炭化机理以及生物炭改性扩大不同领域应用方面开展深入研究。

3 厌氧发酵耦合热解炭化

Monlau等^[15]报道了一种厌氧发酵耦合热解炭化技术(Coupling Anaerobic Digestion and Pyrolysis Process)，用于制备生物炭及高热值副产物，从而提高厌氧发酵能量利用效率并实现沼渣高效资源化利用(图2)。该技术先将废弃生物质通过厌氧发酵后产生沼气用于发电，发酵过程产生的余热用来烘干沼渣，然

后沼渣经500℃高温炭化生成生物炭、生物油和合成气。厌氧发酵耦合炭化技术中产生的生物油和合成气也可以作为燃料发电，比单独使用厌氧发酵体系的发电量增加42%。此外，在厌氧发酵过程中加入生物炭，可以缓解葡萄糖厌氧消化的酸化^[24]，促进微生物生长代谢^[25]，吸附重金属和氨氮^[26]，从而提高甲烷产率。耦合炭化形成的生物炭不仅可以作为厌氧发酵调理剂，还可以生产高热值的生物煤燃料^[27]；作为吸附剂或活化剂载体去除重金属及有机污染物^[28,29]；作为土壤改良剂，同时提高土壤保水保肥能力^[30]；用作超级电容或微生物燃料电池的高性能电极材料^[31]。

4 餐厨垃圾厌氧发酵耦合炭化技术在园林绿化中的应用展望

将餐厨垃圾厌氧发酵与生物质炭化耦合，可为餐厨垃圾资源化利用可持续发展提供新的技术途径。现有的研究表明，生物炭用于园林绿化可以降低土壤容重，增加土壤孔隙度。生物炭的多孔结构、持水能力以及留存的矿物元素也使其成为绿化土壤微生物的良好栖息环境，为土壤有益微生物特别是菌根真菌提供保护。在日本，生物炭基肥料经常用于园林植物苗圃来达到改良土壤、保护接种菌根真菌的目的。Ogawa^[32]报道了生物炭对黑松(*Pinus thunbergii*)生长的影响。通过将生物炭埋入黑松幼林土壤沟槽中，配施少量磷肥，一段时间后新根从生物炭中长出，松树根以及生物炭中的红菌根真菌(*Rhizopogon rubescens*)数量显著增加，黑松的发芽数量和针叶颜色得到大幅改善，认为这是由于菌根数量的增加有利于黑松吸收土壤中的养分和水分。Zhang^[33]等研究表明，施用20%的生物炭与0.7%的腐殖酸对观赏植物箭羽竹芋(*Calathea insignis*)的生长促进效果明显，能够显著地改善箭羽竹芋枝条鲜重、根鲜重、株高、冠幅、叶数和根长。

土壤是园林植物赖以生存的物质基础，直接关系到绿地景观质量。近年来，随着人类的社会活动加剧，城市绿地土壤退化、透气性差和土壤肥力降低^[34]，已经影响了绿化植物的正常生长和发育。随着中国低碳城市建设的发展，低碳园林受到城市管理者 and 规划人员的重视，但目前低碳园林具体的实施途径还很有限。将园林绿化废弃物与餐厨垃圾共同厌氧发酵，达到平衡营养元素、稀释抑制产物或有害物质，使消化过程高效稳定进行，并将餐厨垃圾厌氧发酵与生物质炭化耦合，对于持续推进垃圾分类工作，促进餐厨垃圾和园林绿化废弃物资源化利用，具有十分重要的意义和广阔应用前景。

5 结语

餐厨垃圾资源化综合利用对于垃圾分类工作的持续推进十分重要。本文围绕餐厨垃圾资源化利用途径，对国内外餐厨垃圾厌氧发酵产沼发电、热解炭化及厌氧发酵耦合炭化技术进行了综述。中国餐厨垃圾含水量大，盐分高，干物质少，处理难度大；传统餐厨垃圾处置方法，虽然操作简单、成本低，但产品附加值低，资源化利用程度不高，易造成二次污染。作为未来餐厨垃圾资源化利用的主流发展技术，餐厨垃圾厌氧发酵产沼发电还存在产甲烷率低、消化系统稳定性差和大量残余物沼渣利用难等问题，倡导餐厨垃圾与园林绿化废弃物共发酵，发展餐厨垃圾厌氧发酵耦合炭化技术，对于餐厨垃圾高值化综合利用具有十分重要的现实意义。随着餐厨垃圾资源化处理技术水平的不断提升与餐厨垃圾管理法规的日益完善，未来应围绕餐厨垃圾资源化利用，开展多种技术融合实践与创新，加快推进餐厨垃圾厌氧发酵耦合炭化技术和产品在园林绿化中的试验示范，同步实行垃圾分类收运与管理，最终实现餐厨垃圾高效资源化利用目标，推进循环经济社会、低碳园林城市建设的快速发展。■

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ184-2012 餐厨垃圾处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 柯壹红, 王晓洁, 汪清环. 餐厨垃圾资源化技术现状及研究进展[J]. 海峡科学, 2018(6): 5-6.
- [3] 胡新军, 张敏, 余俊锋, 张古忍. 中国餐厨垃圾处理的现状、问题 and 对策[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4575-4584.
- [4] Zhang C, et al. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system. *Bioresour Technol*, 2013(145): 10-16.
- [5] 刘文治. 餐厨垃圾高附加值资源化处理的工程技术[C]. 中国能源环境科技协会. 2011年第3届全国餐厨垃圾处理技术与资源利用论坛暨试点城市工作交流大会论文集. 2011: 52-65.
- [6] 吴健, 华银锋, 张海涛, 陈卫华, 沈国清. 高含固餐厨垃圾半干法厌氧发酵系统运行分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 94-99.
- [7] Zhang C, Su H, Baeyens J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 383-392.
- [8] Zhao J, Jing Y, Zhang J, et al. Aged refuse enhances anaerobic fermentation of food waste to produce short-chain fatty acids[J].

- Bioresource technology, 2019, 289: 121547.
- [9] Jin Y, Lin Y, Wang P, et al. Volatile fatty acids production from saccharification residue from food waste ethanol fermentation: Effect of pH and microbial community[J]. Bioresource technology, 2019, 292: 121957.
 - [10] Deepanraj B, Sivasubramanian V, Jayaraj S. Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017(42): 26522-26528.
 - [11] 陈丽琴. 餐厨垃圾和草坪草共混发酵制备沼气技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
 - [12] Chen Y, Zhu R, Jiang Q, et al. Effects of green waste participation on the co-digestion of residual sludge and kitchen waste: A preliminary study[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 838-849.
 - [13] 钱鹏, 汪华林, 王剑刚. 餐厨垃圾的混速热解实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(05): 508-511.
 - [14] Alghashm S, Qian S Y, Hua Y F, Wu J, Zhang H T, Chen W H, Shen G Q. Properties of Biochar from Anaerobically Digested Food Waste and Its Potential Use in Phosphorus Recovery and Soil Amendment[J]. Sustainability, 2018, 10(12): 4692.
 - [15] Monlau F, Sambusiti C, Antoniou N, et al. A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process[J]. Applied Energy, 2015: 32-38.
 - [16] Tripathi M, Sahu J N, Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 467-481.
 - [17] Zhang Y, Tang X, Luo W. Metal removal with two biochars made from municipal organic waste: adsorptive characterization and surface complexation modeling[J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 2014, 96(10): 1463-1475.
 - [18] 金桃, 颜炯, Michael, 等. 餐厨垃圾制生物煤试验初探[J]. 可再生能源, 2014(4): 505-511.
 - [19] Li Y, Liu H, Xiao K, et al. Combustion and pyrolysis characteristics of hydrochar prepared by hydrothermal carbonization of typical food waste: influence of carbohydrates, proteins, and lipids[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(1): 430-439.
 - [20] Oliveira I, Blöhse D, Ramke H G. Hydrothermal carbonization of agricultural residues[J]. Bioresource technology, 2013, 142: 138-146.
 - [21] Kambo H S, Dutta A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 359-378.
 - [22] Liu Z, Zhang F S, Wu J. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment[J]. Fuel, 2010, 89(2): 510-514.
 - [23] Mumme J, Eckervogt L, Pielert J, et al. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage[J]. Bioresource technology, 2011, 102(19): 9255-9260.
 - [24] Lü F, Luo C, Shao L, et al. Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching Methanosaeta and then Methanosarcina[J]. Water research, 2016, 90: 34-43.
 - [25] Fabbri D, Torri C. Linking pyrolysis and anaerobic digestion (Py-AD) for the conversion of lignocellulosic biomass[J]. Current opinion in biotechnology, 2016, 38: 167-173.
 - [26] Qiu L, Deng Y F, Wang F, et al. A review on biochar-mediated anaerobic digestion with enhanced methane recovery[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109373.
 - [27] Bazargan A, Rough S L, McKay G. Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel[J]. biomass and bioenergy, 2014, 70: 489-497.
 - [28] Zeng L, Lin X, Zhou F, et al. Biochar and crushed straw additions affect cadmium absorption in cassava-peanut intercropping system[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 167: 520-530.
 - [29] Mao Q, Zhou Y, Yang Y, et al. Experimental and theoretical aspects of biochar-supported nanoscale zero-valent iron activating H₂O₂ for ciprofloxacin removal from aqueous solution[J]. Journal of hazardous materials, 2019, 380: 120848.
 - [30] Li H, Li Y, Xu Y, et al. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125471.
 - [31] Li Q, Bai X, Meng Q, et al. Porous biochar generated from natural Amorphophallus konjac for high performance supercapacitors[J]. Applied Surface Science, 2018, 448: 16-22.
 - [32] Ogawa M, Okimori Y. Pioneering works in biochar research, Japan[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 489-500.
 - [33] Zhang L, Sun X, Tian Y, et al. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant Calathea insignis[J]. Scientia horticulturae, 2014, 176: 70-78.
 - [34] Shen X, Yang F, Xiao C, et al. Increased contribution of root exudates to soil carbon input during grassland degradation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020: 107817.