

生物炭固碳减排作用的研究进展

李飞跃^{1,2} 梁媛^{2,3} 汪建飞¹ 赵玲²

(¹安徽科技学院城建与环境学院,安徽凤阳 233100; ²上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240;

³苏州科技学院环境科学与工程学院,江苏苏州 215011)

摘要:近年来,生物炭(biochar)在土壤改良,污染物修复和固碳等方面受到了国内外研究人员的普遍关注。特别是利用生物质废弃物制备生物炭,被认为是一种非常有前景的并能够实现碳封存和减缓气候变暖目的的管理策略。为此,本文重点概述了生物炭固碳的原理、特点、原因及潜力,并展望了生物炭固碳减排作用的理论研究方向,为生物炭固碳技术的应用和推广提供一定的借鉴。

关键词:生物炭;木炭;温室气体;碳固定;碳减排

气候变暖是当今国际社会普遍关注的全球性问题,也是人类面临的最为严峻的环境问题。近年来,随着经济的发展,我国温室气体排放量大幅增加。2010年《世界银行发展数据小手册》指出从1990-2006年,我国CO₂排放量增长了152.8%^[1]。为了严格控制温室气体的排放量,我国决定到2020年单位国内生产总值CO₂排放量比2005年降低40%~45%^[2]。作为发展中国家,我国面临人口众多、经济发展水平相对较低等问题;同时,工业化、城镇化的步伐不能停止。控制温室气体排放面临着巨大压力和特殊困难,传统的控制温室气体排放的措施和对策也面临挑战,亟待温室气体减排新措施或技术的出现。

近年来,随着科研工作的深入,人们发现生物质在限氧条件下(厌氧或缺氧)热解碳化后产生一类高度芳香化富含碳的固态物质(生物炭)^[3]。生物炭具有高度稳定性,在土壤中的平均停留时间可达1000年^[4]。因此,生物炭的利用将为温室气体减排工作开辟新的途径。

国内学者就生物炭的基本性质^[5-7],在环境中的行为、效应及应用^[8-12],在农业生产中应用^[13-17]等领域已发表了一些综述文章,但关于生物炭固碳减排方面的综述报道还较少^[18],为此,本文对生物炭固碳的原理、特点、原因及潜力进行了简要的概述,并且展望

了生物炭固碳减排作用的理论研究方向。

1 生物炭固碳的原理及特点

1.1 生物炭固碳原理的概念模型

Lehmann^[19]教授关于生物炭削减大气CO₂气体的概念模型中指出植物通过光合作用吸收的CO₂(100%计),50% C经呼吸作用返回大气,剩下50% C储存在植物残体中,如果这些植物残体直接放回土壤,在土壤微生物的作用下,植物残体会很快矿化分解成CO₂返回到大气中,整个大气C削减为零(100% C吸收-50% C呼吸-50% C植物残体=0)(图1左),整个循环过程为碳中性。而如果将植物残体热解转化为生物炭,植物残体中25% C将被转化为生物能,通过消耗全部返回到大气;另外25% C被转化为生物炭放回土壤中,由于生物炭非常稳定,可能仅有大约5% C在土壤微生物的作用下矿化分解成CO₂返回到大气中,因此,整个大气C削减为20%(100% C吸收-50% C呼吸-25% C生物能-5% C生物炭分解=20%)(图1右),整个循环过程为碳负性,且循环次数越多,大气CO₂削减量越大。由此可见,通过生物炭固碳措施,能够将大气中的CO₂源源不断的固定并封存在土壤中,是一种有效的碳汇途径。

收稿日期:2012-07-24 接受日期:2013-01-16

基金项目:国家自然科学基金(21107070),安徽省高等学校省级优秀青年人才基金(2012SQRL149),安徽省长三角联合攻关项目(1101c0603046),安徽省高校重大科研项目(KJ2012ZD04),安徽科技学院自然科学研究项目(ZRC2013373)

作者简介:李飞跃(1983-),男,硕士,助教,主要从事生物炭固碳及其环境效应方面的研究。Tel:0550-6732055;E-mail:lifeyue0523@163.com

通讯作者:汪建飞(1969-),男,博士,教授,主要从事有机肥研究及产业化开发。Tel:0550-6732317;E-mail:jykwjf@sina.com

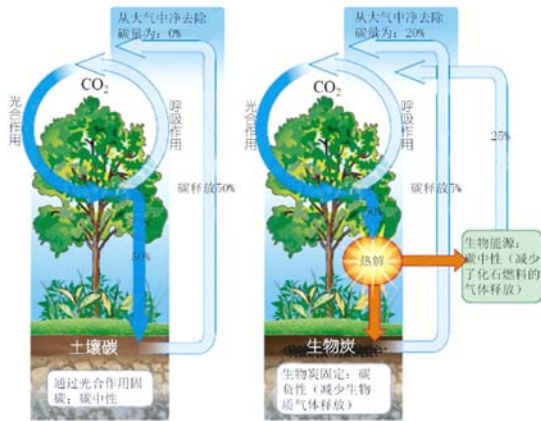


图1 生物炭削减大气CO₂气体的模型
(根据文献[3]翻译和修改)

Fig. 1 Model of CO₂ in the atmosphere reduction by biochar

1.2 生物炭固碳定义及特点

生物炭固碳是指CO₂经由光合作用进入生态系统内,由生物体完成其向生物质的转化,生物质在限氧热解条件下转化为多孔的非常稳定的生物炭(土壤中可以稳定存在几千年),以这种稳定形式将碳素稳定封存在土壤碳库中,是一种有效的碳汇途径,能够起到固碳减排的作用^[19-22]。和传统的物理固碳技术相比,生物炭固碳技术是一种具有原材料来源广泛、生产成本低、高效低耗、生态友好安全、可大面积推广等显著特点的碳削减技术。

2 生物炭固碳减排的原因

2.1 生物炭的高度稳定性

生物炭的稳定性直接决定着生物炭的固碳效果。生物炭高度碳化且主要由芳香环结构和烷基成分组成,这种结构特点决定了它比其它来源的母体碳具有更高的化学稳定性、热稳定性和生物稳定性,具有很强的抵抗微生物的能力,在一定条件下可以在土壤中稳定存在上千年^[11, 23-24]。Shindo^[25]研究发现,经过280d的培养,添加生物炭的土壤与未添加的土壤排放的CO₂相当,说明生物炭分解非常少,在土壤中较为稳定。Kuzakov等^[26]研究结果表明,生物炭的平均停留时间大约为2000年,半衰期约为1400年。培养过程中生物炭矿化降解产生的CO₂量很少,进一步表明生物炭固碳减排的积极作用。

2.2 生物炭降低土壤矿化作用

土壤是陆地生态系统中的重要碳库,对于减缓大气圈中的碳循环具有重要作用;同时,土壤有机碳的矿化作用是土壤排放CO₂的主要途径。因此,生物炭施入土壤后,通过提高土壤的有机碳的含量,降低土壤有机碳的矿化作用强度来实现其固碳减排作用。Liang等^[27]实验发现生物炭施入土壤后,使得土壤有机碳总矿化量下降25.5%。Kim等^[28]研究表明,不加生物炭的土壤释放CO₂的量显著高于添加生物炭土壤。

2.3 生物炭减少CH₄和N₂O的排放

CH₄和N₂O是重要的温室气体,单位质量CH₄和N₂O的全球增温潜势在100年时间尺度上分别为CO₂的25倍和298倍^[29]。生物炭施入土壤后对CH₄和N₂O排放量的影响直接影响到生物炭的最终固碳效率。相关研究表明生物炭施入土壤后能完全抑制CH₄的排放^[30-32]。Liu等^[33]研究表明,和未加生物炭的水稻土壤相比,添加竹炭生物炭和水稻秸秆生物炭的水稻土壤CH₄的排放量分别减少了51.1%和91.2%。Karhu等^[34]也发现添加生物炭能增加96%CH₄吸收量。Feng等^[35]进一步指出,生物炭抑制CH₄的排放并不是抑制产甲烷菌的生长,而是通过增加甲烷氧化菌(嗜甲烷菌)的丰度和减少产甲烷菌和甲烷氧化菌丰度的比例来抑制(减少)CH₄的排放。尽管少数研究报道了生物炭促进土壤N₂O排放^[31, 36-37],一般认为,生物炭施入土壤后能够抑制或是减少N₂O的排放(表1),抑制率可达90%以上^[43]。生物炭降低N₂O排放的机理尚不完全清楚,通常认为生物炭施入土壤后,由于自身理化特性以及和土壤环境的交互作用,影响了相关功能细菌的活性或是丰度,进而减少了土壤中N₂O的产生亦或是加速了土壤中N₂O的还原^[38-52]。

2.4 生物炭提高作物产量

生物炭施入土壤后如果能提高作物的产量,就能增加作物固定大气中CO₂的能力,起到固碳减排的目的。尽管有研究报道,生物炭施入土壤作物产量没有促进作用^[53-54],但更多的研究表明生物炭能够提高作物产量(表2)。生物炭中含有丰富的有机大分子和空隙,施入土壤较易形成大团聚体,增加其对土壤养分离子的吸附和保持,减少土壤养分的淋失,为作物生长提供充足的氮素营养^[51]。生物炭加入土壤后,其富含丰富的灰分元素,提高土壤盐基饱和度,提高土壤pH值,特别是酸性土壤,有利于作物增产^[65]。生物炭提高作物产量的原因很复杂,具体还要视农田作物类型、施用量、土壤类型和性质以及施肥情况而定^[18]。

表 1 生物炭抑制土壤 N₂O 排放的相关研究Table 1 Some studies on inhibition effect of biochar on soil N₂O emission

生物炭类型 Biochar types	土壤类型 Soil types	参考文献 References
芒果树木材	酸性、贫瘠氧化土壤	[30]
城市生物废弃物	草地粘壤土	[38]
木屑	粉壤土	[39]
16 种不同有机废弃物	农田、森林和垃圾填埋场土壤	[40]
绿色废弃物和家禽粪便	农田砂质土壤	[41]
木材和家禽粪便	人为土和变性土	[42]
水稻壳	水稻土	[43]
绿色废弃物、家禽粪便、造纸厂废物和生物固体	酸性富铁土	[44]
小麦秸秆	水稻土	[45]
绿色废弃物和家禽粪便	农田砂质土壤	[46]
小麦秸秆	肥沃的农田土壤	[47]
松树	草地粉壤土	[48]
硬木和山核桃	农田土壤	[49]
山毛榉、榛子、橡树、桦树	粉壤土	[50]
水稻秸秆	红壤水稻土	[51]
小麦秸秆	水稻土	[52]

表 2 生物炭提高作物产量的相关研究

Table 2 Some studies on yield increases of crops with biochar addition

作物 Crops	产量 Yields	生物炭添加量 Biochar application rate	文献 References
胡萝卜	+ 100%	30 t·hm ⁻²	[55]
玉米	+ 30%	20 t·hm ⁻²	[30]
玉米	+ 51%	10 t·hm ⁻²	[56]
玉米	+ 50%	15 t·hm ⁻²	[57]
玉米	+ 100%	6 t·hm ⁻²	[58]
黄豆	+ 46%	90 g·kg ⁻¹	[59]
水稻	+ 115 - 320%	7.9 t·hm ⁻²	[60]
水稻	+ 12% , + 14%	10 t·hm ⁻² , 40 t·hm ⁻²	[45]
水稻和高粱	+ 75%	11 t·hm ⁻²	[61]
萝卜	+ 42% , + 96%	10 t·hm ⁻² , 50 t·hm ⁻²	[62]
黑麦草	+ 20% , + 52%	30 t·hm ⁻² , 60 t·hm ⁻²	[63]
水稻	+ 18.4% , + 2.92%	11.25 t·hm ⁻² , 22.5 t·hm ⁻²	[64]

3 我国生物炭固碳减排的潜力

目前,我国 90% 以上的土壤每 1hm² 仅含有机碳在 100t 以下,远低于世界平均值 121 t·hm⁻²[66]。我国土

壤表土有机碳密度为 (50 ± 47) t·hm⁻², 而耕作土壤平均仅为 (35 ± 32) t·hm⁻², 表土平均碳密度略小于全球平均值, 是欧盟平均值的 70% ~ 75%, 而我国旱地平均表土密度更是低于欧盟农地约 1/3^[67], 表明我国土壤碳储存与欧盟还有很大的差距, 我国土壤生态系统

的固碳潜力巨大。

我国具有丰富的生物质废弃物,各种农作物秸秆总产量每年高达7亿t,其中水稻、小麦、玉米主要农作物秸秆在5亿吨左右,每年约有1/4的秸秆被露天焚烧^[68],另一部分生物质秸秆作为有机肥料回归到土壤。施入土壤中的生物质秸秆,在土壤微生物的作用下几年内很快矿化成CO₂释放到大气中,土壤中有机碳的积累比较缓慢;秸秆作物的焚烧处置会产生大量的CO₂。为此,利用生物质废弃物生产生物炭固定在土壤中可起到“既减少固体废弃物又削减温室气体排放”的双重减碳效果。2000年我国CO₂总排放量为33.4亿吨,如果每年能够炭化5亿t农业生物质废弃物,相当于从大气中吸收7.3亿tCO₂(2亿t碳当量),理论上可为国家的社会发展消化相当于2000年国家总体排放的约22%的CO₂^[69],可见,利用生物炭固碳潜力巨大。

4 研究展望

我国学者已经开始注意生物炭在固碳减排方面的作用,生物炭对土壤温室气体排放、作物产量的影响已有相关报道^[33, 35, 43, 45, 52, 64],但仍缺乏较为系统和深入的研究。未来在生物炭固碳方面可以从以下几个方面开展相关研究:

(1)目前有关生物炭的相关标准仍然没有制定,不同生产工艺生产出来的生物炭在结构性质特别是稳定性方面差异较大。应开展生物炭生产工艺方面的研究,研究出产率高、含碳量高、稳定性强的生物炭产品,提高生物炭固碳能力。

(2)生物炭施入土壤后,其稳定性还取决于土壤类型、耕作方式等因素。应尽快开展我国典型土壤、典型耕作方式下生物炭的稳定性研究。

(3)生物炭施入土壤后对温室气体CH₄和N₂O排放的抑制或是促进的机理,对作物产量的增加或是减少,还需要进行大量的试验研究。

(4)开展生物炭还田后土壤环境安全质量标准的研究和制定工作,特别是生物炭还田后对作物产量的影响,直接关系到粮食安全,同时考虑到生物炭还田后对土壤微生物活性及群落结构的影响,应最终确定土壤环境中生物炭施用的阈值,使得固碳量和作物产量最大化。

参考文献:

[1] The little green data book[M]. USA Washington, DC: The Word

Bank Press, 2010: 58

- [2] 我国将在10大领域采取措施实现2020年二氧化碳减排目标[N/OL], [2012-10-25], 人民网. <http://www.people.com.cn/h/2011/0623/c25408-2858810666.html>
- [3] Antal M J, Gronlim M. The art, science and technology of charcoal production [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 2003, 42: 1619-1640
- [4] Swift R S. Sequestration of carbon by soils [J]. *Soil Science*, 2001, 166(11): 858-871
- [5] 章明奎, 王浩, 郑顺安. 土壤中黑碳的表面化学性质及其变化研究[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2009, 35(3): 278-284
- [6] 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
- [7] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 朱春悟. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 857-861
- [8] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 钟哲科, 陈英旭. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977-982
- [9] 李力, 刘娅, 陆宇超, 梁中耀, 张鹏, 孙红文. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(8): 1411-1421
- [10] 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 孟海波. 生物炭应用研究进展[J]. *可再生资源*, 2012, 30(9): 45-49
- [11] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 姜勇, 解宏图, 何红波, 王晶. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349-355
- [12] 韩永明, 曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 125-132
- [13] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 153-157
- [14] 何绪生, 耿增超, 余雕, 张保健, 高海英. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1-7
- [15] 黄剑, 张庆忠, 杜章留, 王一丁. 施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 232-239
- [16] 杨放, 李心清, 王兵, 程建中. 生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J]. *地球与环境*, 2012, 40(1): 100-107
- [17] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 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
- [18] 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
- [19] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 443: 143-144
- [20] Harder B. Smoldered-Earth Policy: Created by ancient Amazonia natives, fertile, dark soils retain abundant carbon [J]. *Science News*, 2006, 169: 133
- [21] Marris E. Black is the new green [J]. *Nature*, 2006, 442: 624-626
- [22] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. *Frontier in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 381-387
- [23] Glaser B, Lehman L, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in tropics with charcoal - a

- review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 70 (2): 219 – 230
- [24] 陈小红, 段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 765 – 772
- [25] Shindo H. Elementary composition, humus composition, and decomposition in soil of charred grassland plants [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37(4): 651 – 657
- [26] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, Bogomolova I, Xu X L. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 210 – 219
- [27] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, Thies J E, O'Neill B, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Grossman J, Neves E, Luizão F J. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206 – 213
- [28] Kim Y S, Makoto K, Takakai F, Shibata H, Satomura T, Takagi K, Hatano R, Koike T. Greenhouse gas emissions after a prescribed fire in white birch – dwarf bamboo stands in northern Japan, focusing on the role of charcoal [J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, 130: 1031 – 1044
- [29] IPCC. *Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [M]. Cambridge, United Kingdom; Cambridge University Press, 2007: 63 – 67
- [30] Rondon M, Molina D, Hurtado M, Ramirez J, Lehmann J, Major J, Amezquita E. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils [C]//*Proceedings of the 18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2006: 138 – 168
- [31] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, Kimber S, Van Zwieten L. Effect of biochar amendment on the soil – atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia [J]. *Plant Soil*, 2011, 345: 47 – 58
- [32] Rennert R. Rethinking biochar [J]. *Environment Science and Technology*, 2007, 41: 5932 – 5933
- [33] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, Wang H L, Chen Y X, Wu W X. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11: 930 – 939
- [34] Karhu K, Mattila T, Bergström I, Regina K. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity – results from a short-term pilot field study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140: 309 – 313
- [35] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, Xie Z B, Lin X G. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46: 80 – 88
- [36] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, Condon L M, O'Callaghan M, Sherlock R R, Wells N S. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine – urine – amended pasture soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74: 852 – 860
- [37] Kim, Y S, Makoto K, Takakai F, Shibata H, Satomura T, Takakai K, Hatano R, Koike T. Greenhouse gas emissions after a prescribed fire in white birch – dwarf bamboo stands in northern Japan, focusing on the role of charcoal [J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, 130: 1031 – 1044
- [38] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effect of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53: 181 – 188
- [39] Spokas K A, Ksokinen W C, Baker J M, Reicosky D C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. *Chemosphere*, 2009, 77: 574 – 581
- [40] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production [J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 179 – 193
- [41] Cayuela M L, Kuikman P J, Oenema O, Groenigen J W. Bioenergy residues as soil amendments: climate-relevant C and N dynamics during decomposition [C]. Australia, Brisbane: 19th world congress of soil science, soil solutions for a changing world, 2010: 5 – 8
- [42] Singh B P, Hatton B J, Singh B, Cowie A L, Kathuria A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1224 – 1235
- [43] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, Liu P L, Pan G X. Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from two paddy soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47: 887 – 896
- [44] Zwieten V L, Kimber S, Morris S, Downie A, Berger E, Rust J. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from Ferrosol [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48: 555 – 568
- [45] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, Li L Q, Hussain Q, Zhang X H, Zheng J W, Crowley D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2010, 139: 469 – 475
- [46] Cayuela M L, Oenema O, Kuikman P J, Bakker P R, van Groenigen J W. Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions [J]. *GCB Bioenergy*, 2010, 2: 201 – 213
- [47] Bruun E W, Stöver D M, Ambus P, Nielsen H H. Application of biochar to soil and N_2O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry [J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62: 581 – 589
- [48] Toosi A T, Clough T J, Condon L M, Sherlock R R, Anderson C R, Craigie R A. Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40: 468 – 476
- [49] Rogovska N, Laird D, Cruse R, Fleming P, Parkin T, Meek D. Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 871 – 879
- [50] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, Espostio F R, Marzaioli R, Vaccari F P. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J].

- Chemosphere, 2011, 85: 1464-1471
- [51] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 田发详, 霍莲杰, 朱坚. 生物黑炭还田对晚稻 CH₄ 和 N₂O 综合减排影响研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20: 1620-1625
- [52] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, Li L Q, Cui L Q, Hussain Q, Li L Q, Zheng J W, Zheng J F, Zhang X H, Han X J, Yu X Y. Effects of biochar amendent 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
- [53] Kishimoto S, Sugiural G. Charcoal as a soil conditioner [J]. Int Achieve Future, 1985, 5: 12-23
- [54] 邓万刚, 吴鹏豹, 赵庆辉, 漆智平, 吴薇东. 低量生物炭对 2 种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J]. 草地学报, 2010, 18(6): 844-847
- [55] Rondon M, Ramirez A, Hurtado M. Charcoal additions to high fertility ditches enhance yields and quality of cash crops in Andean hillsides of Colombia[R]. Colombia: CIAT Annual Report, 2004
- [56] Van Zwieten L, Kimber S, Sinclair K, Chan K Y. Dowine. Biochar: potential for climate change mitigation, improved yield and soil health [EB/OL]. [2012-10-20] <http://grasslandnsw.com.au/news/wp-content/uploads/2009/07/Van-Zweiten-Kimber-Sinclair-Chan-Downie-2008.pdf>
- [57] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F, Anshiori S, Ogawa M. Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia [J]. Soil Science and Plant Nutrition 2006, 52: 489-495
- [58] Kimetu J M, Lehmann J, Ngoze S O, Mugendi D N, Kinyangi J M, Riha S, Verchot L, Recha J W, Pell A N. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient[J]. Ecosystems, 2008, 11: 726-739
- [59] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, Hurtado M. Biological nitrogen fixation by common beans (Phaseolus vulgaris L.) increases with bio-char additions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(6): 699-708
- [60] Nehls T. Fertility improvement of a terra firme oxisol in central amazonia by charcoal applications [D]. Germany: university of Bayreuth, 2002
- [61] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, Nehls T, Vasconcelos de Macêdo J, Blum W, Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. Plant and Soil, 2007, 291(1-2): 275-290
- [62] Chan K Y, Zwieten V L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46(5): 437-444
- [63] Baronti S, Alberti G, Genesio L, Gennaro F D, Liu J, Miglietta F, Peressotti A, Vaccari F P. Effects on soil fertility and on crops production[EB/OL]. [2012-10-22]. http://www.biochar-international.org/images/Baronti_poster_newcastle_C2.pdf
- [64] 张伟明, 张庆忠, 陈温福. 镉污染土壤中施用秸秆炭对水稻生长发育的影响[J]. 北方水稻, 2009, 39(2): 4-7
- [65] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neil B, Skjemstad J O, Thies J, Luizão F J, Petersen J, Neves E G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 1719-1730
- [66] Batjes N H. Carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163
- [67] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 282-289
- [68] 马骥. 中国农户秸秆就地焚烧的原因: 成本收益比较与约束条件分析-以河南省开封县杜良乡为[J]. 农业技术经济, 2009(2): 77-84
- [69] 黄少鹏. 启动生物炭碳汇工程开辟节能减排新途径[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 18

Biochar to Sequester Carbon and Mitigate Greenhouses Emission: a Review

LI Fei-yue^{1,2} LIANG Yuan^{2,3} WANG Jian-fei¹ ZHAO Ling²

¹ College of Urban Construction and Environment Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100;

² School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

³ School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011)

Abstract: Recently, much attention is focused on biochar in terms of soil amendment, pollution restoration and carbon sequestration. Especially, turning biomass waste into biochar has been proposed as a promising management strategy for carbon sequestration and warming mitigation. Therefore, in this paper, principle, characteristic, cause and capacity of carbon sequestration by biochar were introduced. Moreover, we briefly reviewed and discussed research direction in theory to the effect of biochar on carbon sequestration, which provides perspectives on applications and promotions of carbon sequestration technology by biochar.

Key words: Biochar; Charcoal; Greenhouse gas; Carbon sequestration; Carbon emission reduction