

生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响

张又弛*, 李会丹

中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门, 361021

摘要: 生物炭是由生物质在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质, 具有改善土壤理化性质、调控营养元素循环、防治重金属、多环芳烃等污染物迁移转化等功能, 因此, 在土壤改良与修复领域具有较好的应用前景。但是, 生物炭的施用将对土壤中的微生物群落结构组成带来影响, 从而改变整个生态系统的物质循环过程。本文综述了近年来国内外有关生物炭对土壤微生物分布影响的研究进展, 探讨了生物炭对土壤微生物生长代谢的作用机制, 阐述了生物炭对于微生物主导的土壤生物地球化学过程产生的影响作用。相关研究发现, 土壤总微生物生物量在生物炭施用后或增加, 或不变, 或呈现下降趋势; 不同种类微生物对于生物炭的响应非常复杂, 从而呈现出各异的土壤微生物群落结构组成。生物炭对微生物生长代谢的影响源于改变 pH 环境、影响水分分布、调节养分循环等多种机制的协同作用, 而生物炭在对环境物质的吸附以及对微生物的直接吸附方面扮演着重要角色。同时, 生物炭对于土壤微生物群落结构组成的影响还会随着时间的推移而发生变化。生物炭对土壤中微生物分布的改变还会进一步影响微生物的生物地球化学功能, 对温室气体排放、碳氮循环和有机污染物降解等生物地球化学过程产生重要影响。因此, 有待开展更多关于生物炭对于土壤微生物分布及其生态功能的影响的深入研究, 以期更全面地评价生物炭对土壤环境质量的影响作用, 为生物炭的实际应用提供依据。

关键词: 生物炭; 微生物群落结构; 生物地球化学过程; 土壤

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.05.027

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 05-0898-08

引用格式: 张又弛, 李会丹. 生物炭对土壤中微生物群落结构及其生物地球化学功能的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 898-905.

ZHANG Youchi, LI Huidan. Influence of Biochar on the Community Structure and Biogeochemical Functions of Microorganisms in Soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 898-905.

作为近年来热门研究领域之一, 源于各种城乡有机废弃物的生物炭不但可以作为碳汇减缓温室效应进程 (Laird, 2008), 其在土壤改良、农作物增产、环境污染治理等方面也具有良好的应用前景, 在废弃物减量化的同时实现了资源的再利用, 带来了巨大的经济效益 (Singh 等, 2010; Sohi 等, 2010; 谢祖彬等, 2011)。生物炭作为土壤改良剂的应用起源于南美亚马逊盆地黑土 (Terra Preta) 的发现及研究 (徐楠楠, 2013), 这种古人类刀耕火种形成的特殊“黑土壤”所含有的有机碳是普通土壤的 3~4 倍, 能够显著改良土壤肥力, 恢复土壤生产力。随着研究的深入, 生物炭在改善土壤理化性质、调控营养元素循环、防治重金属、多环芳烃等污染物迁移转化方面的功能逐渐被人们所认知, 生物炭在土壤改良与修复领域的应用尝试也随之日益增多 (陈温福等, 2011; Yuan 等, 2011; Gaskin 等, 2008; Yao 等, 2010)。

微生物是土壤环境中一个主要组分, 其分布状况以及生物地球化学功能在生态系统平衡、养分物质运移转化、污染物扩散与控制等方面起着重要作用。而生物炭施用到土壤后, 通过各种直接或间接作用, 可能影响了土壤中微生物的生长代谢, 从而作用于土壤环境中的各种生物地球化学过程, 最后对土壤环境质量、作物生长以及人类健康造成显著影响。本文综述了目前国内外关于生物炭对土壤微生物分布及其功能影响的研究进展, 探讨了生物炭对土壤微生物生长代谢的作用机制, 以期为更全面地评价生物炭对土壤环境质量的影响作用, 及生物炭的规模应用提供重要参考。

1 生物炭定义与属性

生物炭 (biomass-derived black carbon 或 biochar) 又称为生物质炭, 是由生物质在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质 (Beesley 等, 2011)。一般生物

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301328); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2012AA06A204-2)

作者简介: 张又弛 (1983 年生) 男, 助理研究员, 博士, 主要从事环境土壤学研究。E-mail: yczhang@iue.ac.cn

收稿日期: 2014-10-14

炭是以农作物秸秆、木质物质、禽畜粪便和其他材料等有机物质作为制备原料，由于原料性质与制备工艺的差异，不同来源的生物炭最终呈现的理化性质与功能不尽相同（武玉等，2014）。

与传统的活性炭等炭材料相比，生物炭的组分中含有大量的芳香族基团，特别是熔解的芳香族基团结构的比例较大（Schmidt 和 Noack，2000），从而呈现高度的稳定性。同时，除了相对稳定的碳组分，生物炭中还含有部分挥发性物质或者化学稳定性较弱、生物利用性较高的物质，在淋溶状态或者微生物代谢影响下，生物炭中的这部分物质会被释放、利用，从而实现部分的矿化作用（Lehmann 等，2009）。

一般认为，生物炭为强碱性物质，其高 pH 主要源于其组分中的灰分包含的大量 K、Ca、Na 金属矿物。不同来源的生物炭 pH 值不同，比如 Zhang 和 Luo（2014）制备的桉木炭 pH 仅为 7.47（Zhang 等，2014），而 Nellissen 获得的玉米秸秆基生物炭的 pH 达到 9.8（Nelissen 等，2014）。通常高矿物灰分含量的生物炭的 pH 值大于低矿物灰分的生物炭的 pH 值，而相同原料制备的生物炭的 pH 值会随着热解温度的升高而增大。

另外，生物炭还具有丰富的内表面和孔隙结构，其分布受原料来源与制炭工艺影响。生物炭的比表面积既可能不足 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ，也可能高达数百 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。随着炭化温度的升高，相同原料的生物炭的比表面积会随之增大。例如，Chun 等（2004）发现秸秆基生物炭的比表面积从 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 制备时的 $116 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 升至 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 $363 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。当然，对于部分生物炭，如稻壳基生物炭，当热解温度升高到一定数值以上，其比表面积反而可能下降。

2 生物炭对土壤微生物分布的影响

目前，生物炭在土壤改良以及环境修复领域的应用尝试较多。但是，不少报道也发现，当添加生物炭后，土壤中细菌、真菌和古菌的群落组成都发生了变化（O'Neill 等，2009；Khodadad 等，2011）。例如，韩光明等（2012）发现当生物炭施加入菠菜农田后，菠菜根际微生物（细菌、真菌、放线菌）的数量显著增加，其中好氧自生固氮菌与反硝化细菌数量相对对照组分别增加了 4.9 倍和 1.8 倍。Graber 等（2010）报道在辣椒种植土中 *Bacillus* spp.、*Filamentous fungi*、*Pseudomonas* spp. 等微生物菌群的丰度均随着生物炭添加比例增加而显著升高。Ball 等（2010）研究也曾发现土壤中的氨氧化菌对生物炭的施加较为敏感，其数量的增减与生物炭引起的土壤 pH、养分变化趋势显著相关。生物炭的高芳香化表面、孔隙结构及对水肥吸附作用使其可

能为土壤微生物栖息提供良好的“微环境”（Liang 等，2010；Knicker，2007），从而提高土壤微生物量。

但是，生物炭添加入土壤后引起的微生物响应非常复杂（Steiner 等，2008）。由于微生物生长具有各自特定的环境需求，因此，不同种类的微生物对生物炭施用的响应具有多样性（Steinbeiss，2009；Kolton 等，2011），可能导致土壤中微生物生物量各异的变化趋势。比如，Steinbeiss（2009）发现两种生物炭的添加能够分别提高土壤中真菌与革兰氏阴性菌的生物量。但是，也有学者也发现，尽管和未作处理的土壤相比，富含生物炭的亚马逊黑土的细菌的多样性增加了 25%（O'Neill 等，2009），但古菌的多样性却反而显著下降。Grossman 等（2010）发现与周边土壤比较，残留生物炭的亚马逊耕作土壤中的微生物群落结构差异显著，特别是古菌群落组成差异超过 90%，施加生物炭的土壤中含有独特的 *Verruco-microbia*，而没有周边土壤发现的 *Pseudomonas*、*Acidobacteria* 和 *Flexibacter* sp.。宋延静等（2014）发现添加生物炭在一定程度上促进了盐碱土中细菌丰度的增加，但古菌丰度仅在培养中期有所升高，而真菌丰度受生物炭添加的影响并不明显。即使是对于起同一功能的固氮微生物，生物炭能够增加 *Ideonella* 和 *Skermanella* 等属的相对丰度，但固氮螺菌属 (*Azospirillum*) 则基本不受影响（宋延静等，2014）。这是因为生物炭除了直接提供微生物生长场所以外，还可能引起土壤理化特性改变、养分含量与有效性增减等（Glaser 等，2002；Xu 等，2013；Pietikainen 等，2000），这些改变均会诱发不同微生物做出不同的生长代谢反馈，改变某些微生物在土壤中的分布状况，最终使得土壤中总微生物量或不变，或增加，或呈现下降趋势（Castaldi 等，2011；Dempster 等，2011）。

3 生物炭对土壤微生物生长代谢的影响机制

3.1 改变微生物生长的 pH 环境

土壤 pH 是影响微生物生长代谢的一个主要因子。当 pH 从强酸性向中性范围变化时，土壤微生物量一般会随着 pH 的升高而增加（Aciego Pietry 和 Brookes，2008）；而且细菌和真菌对 pH 变化的敏感程度不一样。Rousk 等（2010）通过 PLFA 分析发现：当 pH 从 4.0 升至 7.0，细菌丰度会增加，但真菌丰度却可能没有变化；只有当 pH 达到 8.3 时，真菌的生物量才会呈现急剧下降趋势（Rousk 等，2009）。生物炭一般为碱性，当它进入土壤环境后易于促使 pH 升高，最终 pH 增幅受到生物炭添加量以及土壤原始 pH 状况的影响。黄超等（2011）

在酸性红壤中添加生物炭后发现土壤的 pH 增加量最高可达到 1 个单位。Pietikainen 等 (2000) 通过对生物炭添加后土壤中 pH 变化与微生物群落生长率改变的研究, 提出生物炭通过提高土壤 pH 来提高微生物群落的呼吸代谢速率, 改善微生物对基质的利用格局。同时, 不同微生物的生长繁殖将根据其对于 pH 变化的敏感度与耐受范围做出各异的响应。在吕伟波 (2012) 的研究中, 两种酸性土壤的微生物量均随生物炭添加量的增大而升高, 他认为原因之一便是生物炭的添加显著提高了土壤 pH 值, 改善了土壤微生物生长环境, 从而提高了土壤微生物量。

3.2 改善土壤结构

生物炭的添加会改变土壤的容积密度 (Masulili 等, 2010), 特别是生物炭的密度比一些矿物还低, 同时它还具有大量的孔隙结构。据报道, 许多制备成的生物炭的密度范围为 $1.5\sim 2.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 容重在 $0.05\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 这一数值比一般土壤的容重小。Eastman (2011) 在土壤中施用 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的生物炭, 土壤容重从 $1.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降低到 $1.33\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。因此, 生物炭的加入将降低土壤容重 (Busschei 等, 2010), 增加孔隙度, 影响土壤中的水分条件与空气分布, 从而改善了土壤微生物的生长环境。

3.3 影响土壤水分分布状况

生物炭能够很大程度地改善土壤的持水能力和供水能力 (Glaser 等, 2002; Laird, 2008), 抑制土壤蒸发, 延长土壤水分释放的时间 (文曼和郑纪勇, 2012), 保持相对潮湿的孔隙, 在高温、干旱条件下就可以满足微生物对水的需求。特别是新鲜生物炭一般表现出较强的疏水性, 能够显著降低土壤水入渗及初始导水率 (Asai 等, 2009; 齐瑞鹏等, 2014); 随着生物炭表面氧化及羧基基团增多, 生物炭的亲水性会逐渐增强, 其吸水能力和土壤持水量逐渐提高 (Cohen-Ofri 等, 2006), 从而为微生物提供更好的水分供给条件。Malik (1990) 曾用活性炭做过凝固干燥条件下细菌的生长观察, 发现炭提高了几种氧敏感菌的生存能力。但是, 由于细菌与真菌生长过程中对水分的需求差异较大, 如革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌在生长时受水分条件的影响区别很大 (Schimel 等, 2007), 不同种类的微生物生长代谢对生物炭所引起的水分分布变化做出的响应也不尽相同。

3.4 调节养分元素循环

生物炭能够吸附土壤中的氨氮、硝态氮、磷、钾、镁等不同形态存在的营养元素 (刘玮晶等, 2012; 陈心想等, 2014), 同时, 由于施加生物炭之后土壤的持水能力和供水能力得到提高, 水溶性

营养离子的溶解迁移就会减少, 在这两个机制的协同作用下土壤中营养元素的淋失得到了抑制, 并保证其在土壤中持续而缓慢地释放能力 (Steiner 等, 2010), 保证了微生物对于营养元素的需求。Laird 等 (2010) 发现温带农业土壤中添加生物炭后, 滤出液中的 N、P 和 Mg 含量随生物炭添加量的增加而显著降低; 当生物炭的添加量达到 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可溶性 P 滤出量更是显著降低了 69%, 总 N 滤出量也降低了 11%。此外, 生物炭中灰分元素如 K、Ca 和 Mg 等较为丰富, 施进土壤后也作为可溶性养分被微生物所利用 (张阿凤等, 2009), 提高了土壤营养元素供给量, 从而对微生物的生长代谢过程产生影响。Novak 等 (2009) 发现土壤中加入质量分数为 2% 的生物炭 67 d 后, 其 Ca、K、P 含量均明显升高, 从而为微生物生长提供了更高的养分。

3.5 生物炭自身的矿化潜力

尽管生物炭被认为是较为稳定的添加物质, 新鲜生物炭仍可能释放一定量的有机碳和 N、P 养分, 促进土壤微生物活动, 增强土壤呼吸作用 (Kolb 等, 2009)。Deenik 等 (2010) 和 Zimmerman (2010) 在一个培养实验中发现了在生物炭中具有挥发性的、不稳定的有机碳的量与释放的二氧化碳的量呈正相关关系。Mumme 等 (2014) 发现加入水热炭能够促进产甲烷菌生长, 提高甲烷产量, 其主要原因在于水热炭自身具有一定量的高利用性有机碳, 相反地, 有机碳含量低的热裂解炭则没有这一作用。Hamer 等 (2004) 也曾提出, 生物炭进入土壤能够为某些微生物生长提供一定量的碳源。

3.6 生物炭对微生物的吸附能力

生物炭的高芳香化表面特性和多孔性能够为土壤微生物提供更多附着位点与更大生存空间。特别是生物炭的高芳香化表面具有极高的吸附性, 不仅能够有效吸附各种有机、无机物质, 还能吸附微生物, 而且某些微生物的表面构造也会对生物炭的吸附性有促进作用 (Ron 和 Rosenberg, 2001)。这种吸附能力使得微生物不易被淋溶流失出土壤 (Pietikainen 等, 2000), 从而提高了土壤中微生物丰度。另外, Pietikainen 等 (2000) 还发现生物炭的孔隙结构有利于个体较小且生长速度较快的微生物生长。一些小个体土壤微生物还可能会进入到生物炭的孔隙结构中, 利用孔隙中的养分进行生长代谢。例如芽孢杆菌和不动杆菌, 它们能够进入孔径大小为 $2\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙中生长 (Samonin 和 Elikova, 2004)。

3.7 生物炭对环境物质的吸附性能

生物炭还能吸附分布于土壤环境中的微生物生长因子或毒素 (Akiyama 等, 2005; Kasozi 等,

2010), 从而促进或抑制特定微生物类群的生长代谢, 并引起其竞争菌群的响应反馈。在豆科类根瘤菌的研究中发现, 生物炭通过吸收毒性物质促进了根瘤菌的生长及其生物固氮作用(吕伟波, 2012)。尤其是在遭受污染的土壤中, 添加生物炭后, 不管是镉、铅等重金属离子还是多环芳烃、邻苯二酚等有机污染物均易于被生物炭所吸附(Kasozzi 等, 2010; 朱庆祥, 2011; Oleszczuk 等, 2012), 从而降低了污染物对土壤微生物生长造成的胁迫作用。

3.8 生物炭对于微生物影响的时间演变

生物炭对于土壤微生物分布的影响还会随着时间的推移而发生变化。例如, 尽管生物炭被认为是较为稳定的添加物质, 新鲜生物炭仍可能释放一定量的有机碳和 N、P 养分, 促进土壤呼吸作用(Kolb 等, 2009), 但随着生物炭在土壤中的逐渐转化, 有机碳和 N、P 养分的释放速率和含量也随着时间推移不断变化(Mukherjee 和 Zimmerman, 2013)。同时, 伴随着生物炭与土壤组分的逐步交互作用, 土壤环境 pH、CEC、孔隙度或增加或减少(Pignatello 等, 2006; Joseph 等, 2010), 从而改变了生物炭对土壤中污染物的吸附效果及对微生物生长的作用机制, 土壤微生物的响应也将会随着时间推移而发生变化, 进而呈现出不同的生物地球化学过程。

4 生物炭对土壤微生物生态功能的影响

生物炭进入土壤环境后, 通过各种作用机制影响了微生物的生长代谢, 进而还将改变微生物的生物地球化学功能, 从而影响土壤环境中物质的迁移转化。在生物炭改良农业土壤的应用尝试中, 学者们发现生物炭能够通过促进菌根菌这一类微生物的生长, 特别是提高泡囊丛枝状菌根真菌的侵染与活性(Warnock 等, 2007; Blackwell, 2008), 增加其多糖分泌(如glomalin-球霉菌素)来增加土壤短期固碳量, 提高豆科植物的结瘤、固氮菌侵染及固氮量(Ogawa 和 Okimori, 2010)。但生物炭施用量不宜过高, 否则将会降低固氮量(Rondon 等, 2007), 特别是在养分贫瘠土壤上, 过量生物炭容易抑制固氮菌的生长和结瘤, 需要补充限制性养分磷素或其他养分才可缓解(Yan 等, 2004)

生物炭进入土壤后不仅仅作用于特定菌群, 它可能改变整个土壤微生物群落结构, 而土壤中包括有机物分解过程(Liang 等, 2010)、养分元素循环、甲烷氧化(Yanai 等, 2007)以及污染物的降解转化(Marchal 等, 2013)等在内的诸多生物地球化学过程都会因为生物炭的添加而增强或者减弱, 从而影响整个土壤生态功能体系的运行。当前研究发现, 生物炭进入土壤后将将对微生物介导的碳的矿化

作用、氮的循环转化产生巨大影响。Wardle 等(2008)指出在有生物炭存在的情况下土壤中有机物质的分解作用更强。吕伟波(2012)发现, 加入生物炭能够改变微生物整体活性, 提高土壤呼吸强度, 增强土壤碳素周转速率, 同时, 土壤氮氮含量下降, 氮的净矿化作用削弱。另外, DeLuca 等(2006)发现施加生物炭能够提高土壤中硝态氮含量, 推测其可能机理在于生物炭能够吸附去除土壤中某些硝化作用的抑制剂而缓解了抑制作用, 促进微生物开展硝化作用。Ball 等(Ball 等, 2010)发现生物炭通过提高土壤氨氧化细菌的丰度间接促进 NH_4^+ 向 NO_3^- 催化氧化。Mukherjee 等(2011)分析生物炭能够提高土壤中硝化细菌的活性, 促进了硝化反应的进程。张万杰等(2011)也在研究中发现类似现象。此外, 生物炭具有多孔和低密度的特性, 施用后能改善土壤通气状况, 降低厌氧程度, 从而可能抑制反硝化细菌开展相应的反硝化作用(Laird, 2008; Chen 等, 2010)。但是, Xu 等(2014)发现将生物炭加入种植土壤有助于 *Flammeovirgaceae* 和 *Chitinophagaceae* 等在碳、氮循环中扮演重要角色的微生物的繁殖, 能够同时促进土壤中的硝化作用与反硝化作用。

近年来, 已经开展了不少有关生物炭在温室气体减排领域的应用研究。除生物炭本身起到的固碳作用以外, 其进入土壤后也会通过影响土壤生物地球化学过程而达到抑制温室气体 N_2O 与 CH_4 排放的效果。Rondon 等(2005)发现生物炭的添加使得土壤中 N_2O 的排放减少了 50%, 而当添加量达到 $20 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 时几乎能完全抑制 CH_4 排放。Spokas 等(2009)向土壤中添加生物炭, 发现当添加质量分数大于 20% 时能显著抑制土壤 CO_2 的排放, 同时也能抑制 N_2O 与 CH_4 的产生。Yu 等(2013)报道到, 在低湿度土壤中, 生物炭的添加抑制了甲烷的排放, 但在高湿度土壤中甲烷排放量反而升高。Feng 等(2012)发现尽管生物炭添加入稻田土壤后会增加产甲烷菌的丰度, 但却显著降低了产甲烷菌与甲烷氧化菌的丰度比值, 从而使得整个稻田土壤的甲烷排放量呈现下降趋势。Xu 等(2014)发现生物炭能够增加氮循环过程中 *nosZ* 基因的转录, 加快 N_2O 向 N_2 的转化过程, 从而抑制土壤中 N_2O 的排放。

除此之外, 生物炭也会给微生物对土壤中有机污染物的降解利用过程带来影响。王宁(2012)发现生物炭对土壤中 16 种多环芳烃均有去除效果, 其作用机制除了生物炭自身对多环芳烃的吸附效果之外, 生物炭对土壤微生物活性的提高也促进了多环芳烃的微生物降解过程。Chen 等(2012)也曾

提出运用生物炭固定降解菌能够增强土壤中多环芳烃的生物降解效率。但是,与之相反地, Yang 等(2009)和 Rhodes 等(2010)均曾发现菲降解速率被生物炭所抑制,对土壤中农药降解过程的研究也有类似发现(Yang 等,2006)。Jones 等(2011)发现生物炭会吸附农药西玛津,同时降低西玛津降解菌的活性,从而降低了西玛津的生物降解速率并使其难以随水迁移。生物炭的孔隙结构及其强吸附性能够为在孔隙内生长的微生物提供有机碳源,避免其与生物炭孔隙外部微生物以及土壤环境中其他物种(如线虫、真核生物)竞争有机物质(Pietikainen 等,2000; Hamer 等,2004; Atkinson 等,2010),从而促进了孔隙内微生物的生长及其介导的有机污染物降解过程;但是,这种强吸附性却会降低土壤环境中可利用的有机污染物含量,使得一些具有降解能力的微生物无法代谢利用有机污染物。因此,生物炭对于土壤中有机污染物微生物降解过程的作用效果还受到土壤环境中降解菌群的种类与分布差异的影响。

5 展望

国内外研究进展表明,生物炭在土壤改良与环境修复领域具有较好的应用前景,同时,生物炭在进入土壤环境后会对微生物群落结构组成及其主导的生物地球化学过程带来或利或弊的影响。然而,目前关于生物炭对于土壤微生物生态功能影响的研究还较为匮乏,需要进一步深入开展研究。

(1)多数报道集中在生物炭对农田肥力相关菌群生长代谢或者温室气体排放的影响上,但是土壤中微生物种类繁多,各种生物地球化学过程同时存在,仍需加强对生物炭对于土壤微生物群落结构组成与总体生态功能体现影响的研究,同时还应当针对某些特定环境下的优势菌群与典型生物地球化学过程展开深入研究。

(2)生物炭来源广泛,性质各异,施用量与土壤环境条件也各不相同,使得已有的报道得出不少相互矛盾的结果。同时,生物炭对于土壤微生物生长代谢的影响可能源于多方面的协同作用,已有研究仍未全面探明生物炭的作用机制及其影响因子,还需要开展一系列系统研究,更加全面地掌握生物炭对土壤微生物的影响机制。

(3)在进入土壤环境后,生物炭对于土壤理化性质以及微生物活动的影响作用会随着时间推移而发生变化。但是,当前多数研究成果都来自于短期实验,亟待开展长期效应研究,以期更全面地评价生物炭对土壤环境质量与生态功能的影响效果,为生物炭的实际应用提供依据。

参考文献:

- ACIEGO PIETRY J C, BROOKES P C. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 1856-1861.
- AKIYAMA K, MATSUZAKI, KI, HAYASHI H. 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Nature*, 4(35): 824-827.
- ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research*, 111(1/2): 81-84.
- ATKINSON C, FITZGERALD J, HIPPS N. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review [J]. *Plant and Soil*, 337(1/2): 1-18.
- BALL P N, MACKENZIE M D, DELUCA T H, et al. 2010. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacteria abundance in dry montane forest soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 39(4): 1243-1253.
- BEESELEY L, MORENO-JIMÉNEZ E, GOMEZ-EYLES J L, et al. 2011. A review of biochar's potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 159(12): 3269-3282.
- BLACKWELL P. 2008. Can biochar help drive biological farming? [J]. *Western Mineral Fertilisers*, 8: 11.
- BUSSCHEI W J, NOVAK J M, EVANS D E, et al. 2010. Influences of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand [J]. *Soil Science*, 175(1): 10-14.
- CASTALDI S, RIONDINO M, BARONTI S, et al. 2011. Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J]. *Chemosphere*, 85(9): 1464-1471.
- CHEN B, YUAN M, QIAN L. 2012. Enhanced bioremediation of PAH-contaminated soil by immobilized bacteria with plant residue and biochar as carriers [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 12(9): 1350-1359.
- CHEN Y, SHINOGI Y, TAIRA M. 2010. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality [J]. *Aust J Soil Res*, 48(7): 526-530.
- CHUN Y, SHENG G, CHIOU C T, et al. 2004. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars [J]. *Environmental Science & Technology*, 38(17): 4649-4655.
- COHEN-OFRI I, WEINER L, BOARETTO E, et al. 2006. Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis [J]. *Journal of Archaeological Science*, 33(3): 428-439.
- DEENIK J L, MECLELLAN T, UEHARA G, et al. 2010. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 74: 1259-1270.
- DELUCA T H, GUNDALE M D, HOLBEN M J, et al. 2006. Wildfire produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests [J]. *Soil Sci Soc AmJ*, 70(2): 448-453.
- DEMPSTER D N, GLEESON D B, SOLAIMAN Z M, et al. 2011.

- Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil [J]. *Plant and Soil*, 354(1/2): 311-324.
- EASTMAN C M. 2011. Soil physical characteristics of an aerice Ochraqualf amended with biochar [D]. Columbus: The Ohio State University.
- FENG Y, XU Y, YU Y, et al. 2012. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 46: 80-88.
- GASKIN J W, STEINER C, HARRIS K, et al. 2008. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. *Transactions of the ASABE*, 51(6): 2061-2069.
- GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. *Biology and Fertility of soils*, 35(4): 219-230.
- GRABER E R, HAREL Y M, KOLTON M, et al. 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. *Plant and Soil*, 337(1/2): 481-496.
- GROSSMAN J M, O'NEILL B E, TSAI S M, et al. 2010. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy [J]. *Microbial ecology*, 60(1): 192-205.
- HAMER U, MARSCHNER B, BRODOWSKI S, et al. 2004. Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation [J]. *Organic Geochemistry*, 35(7): 823-830.
- JONES D L, EDWARDS-JONES G, MURPHY D V. 2011. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(4): 804-813.
- JOSEPH S D, CAMPS-ARBESTAIN M, LIN Y, et al. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 48(6-7): 501-515.
- KASOZI G N, ZIMMERMAN A R, NKEDI-KIZZA P, et al. 2010. Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (biochars) [J]. *Environmental Science and Technology*, 44(16): 6189-6195.
- KHODADAD C L M, ZIMMERMAN A R, GREEN S J, et al. 2011. Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(2): 385-392.
- KNICKER H. 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon: A review [J]. *Biogeochemistry*, 85(1): 91-118.
- KOLB S E, FERMANICH K J, DORNBUSH M E. 2009. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4): 1173-1181.
- KOLTON M, HAREL Y M, PASTERNAK Z, et al. 2011. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants [J]. *Applied Environment Microbiology*, 77(14): 4924-4930.
- LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 158(3-4): 443-449.
- LAIRD D A. 2008. The charcoal vision: a win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality [J]. *Agronomy Journal*, 100: 178-181.
- LEHMANN J, CZIMCZIK C, LAIRD D, et al. 2009. Stability of biochar in soil [M]. *Biochar for environmental management: Science and Technology*: 183-205.
- LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. 2010. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 41(2): 206-213.
- MALIK K A. 1990. Use of activated charcoal for the preservation of anaerobic phototrophic and other sensitive bacteria by freeze-drying [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 12(2): 117-124.
- MARCHAL G, SMITH K E C, REIN A, et al. 2013. Comparing the desorption and biodegradation of low concentrations of phenanthrene sorbed to activated carbon, biochar and compost [J]. *Chemosphere*, 90(6): 1767-1778.
- MASULILI A, UTOMO W H, SYECHFANI M S. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2(1): 39-47.
- MUKHERJEE A, ZIMMERMAN A, HARRIS W, et al. 2011. Surface chemistry variations among series of laboratory produced biochars [J]. *Geoderma*, 63(3): 247-255.
- MUKHERJEE A, ZIMMERMAN A R. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures [J]. *Geoderma*, 193-194: 122-130.
- MUMME J, SROCKE F, HEEG K, et al. 2014. Use of biochars in anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 164: 189-197.
- NELISSEN V, SAHA B K, RUYSSCHAERT G, et al. 2014. Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 70: 244-255.
- NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil [J]. *Soil Science*, 174 (2): 105-112.
- O'NEILL B, GROSSMAN J, TSAI M T, et al. 2009. Bacterial community composition in Brazilian anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification [J]. *Microbial Ecology*, 58(1): 23-35.
- OGAWA M, OKIMORI Y. 2010. Pioneering works in biochar research, Japan [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 48: 489-500.
- OLESZCZUK P, HALE S E, LEHMANN J, et al. 2012. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 111: 84-91.
- PIETIKAINEN J, KIIKKILA O, FRITZE H. 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus [J]. *Oikos*, 89(2): 231-242.
- PIGNATELLO J J, KWON S, LU Y. 2006. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental

- black carbon (char): attenuation of surface activity by humic and fulvic acids [J]. *Environmental Science and Technology*, 40(24): 7757-7763.
- RHODES A H, MCALLISTER L E, CHEN R. et al. 2010. Impact of activated charcoal on the mineralisation of 14C-phenanthrene in soils [J]. *Chemosphere* 79(4): 463-469.
- RON E Z, ROSENBERG E. 2001. Natural roles of biosurfactants [J]. *Environmental Microbiology*, 3(4): 229-236.
- RONDON M A, LEHMANN J, RAMIREZ J, et al. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 699-708.
- RONDON M, RAMIREZ J, LEHMANN J. 2005. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere [R]. *Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry*. Maryland: 208.
- ROUSK J, BROOKES P C, BÅÅTH E. 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(6): 1589-1596.
- ROUSK J, BÅÅTH E, BROOKES P C, et al. 2010. Soil bacterial and fungal communities across a PH gradient in an arable soil [J]. *The ISME*, 4(10): 1340-1351.
- SAMONIN V V, ELIKOVA E E. 2004. A study of the adsorption of bacterial cells on porous materials [J]. *Microbiology*, 73(6): 696-701.
- SCHIMEL J, BALSER T C, WALLENSTEIN M. 2007. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function [J]. *Ecology*, 88(6): 1386-1394.
- SCHMIDT M W I, NOACK A G. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global biogeochemical cycles*, 14(3): 777-793.
- SINGH B P, HATTON B J, SINGH B, et al. 2010. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 39(4): 1224-1235.
- SOHI S, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. 2010. A review of biochar and its use and function in soil [J]. *Advances in Agronomy*, 105:47-82.
- SPOKAS K A, KOSKINEN W C, BAKER JM, et al. 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption /degradation of two herbicides in a Minnesota soil [J]. *Chemosphere*, 77(4): 574-581.
- STEINBEISS S. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(6): 1301-1310.
- STEINER C, DAS K C, MELEAR N, et al. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar [J]. *Environ Qual*, 39(4): 1236-1242.
- STEINER C, DAS KC, GARCIA M, et al. 2008. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic ferralsol [J]. *Pedobiologia*, 51(5/6): 359-366.
- WARDLE D A, NILSSON M C, ZAEKRISSESON O. 2008. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. *Science*, 320(5876): 629.
- WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms [J]. *Plant and Soil*, 300(1/2): 9-20.
- XU G, WEI L L, SUN J N, et al. 2013. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism [J]. *Ecological Engineering*, 52: 119-124.
- XU H J, WANG X H, LI H, et al. 2014. Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape [J]. *Environmental Science & Technology*, (48): 9391-9399.
- YAN G Z, KAZUTO S, SATOSHI F, et al. 2004. The effects of bamboo charcoal and phosphorus fertilization on mixed planting with grasses and soil improving species under the nutrients poor condition [J]. *Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology*, 30(1): 33-38.
- YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(2): 181-188.
- YANG Y, HUNTER W, TAO S, et al. 2009. Effect of activated carbon on microbial bioavailability of phenanthrene in soils [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28(11): 2283-2288.
- YANG Y N, SHENG G Y, HUANG M S. 2006. Bioavailability of diuron in soil containing wheat-straw-derived char [J]. *Science of the Total Environment*, 354(2/3): 170-178.
- YAO F X, CAMPS ARBESTAIN M, VIRGEL S, et al. 2010. Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified soxhlet reactor [J]. *Chemosphere*, 80(7): 724-732.
- YU L, TANG J, ZHANG R, et al. 2013. Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture levels [J]. *Biology and fertility of soils*, 49(2): 119-128.
- YUAN J H, XU R K, ZHANG H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 102(3): 3488-3497.
- ZHANG Y, LUO W. 2014. Adsorptive removal of heavy metal from acidic wastewater with biochar produced from anaerobically digested residues: kinetics and surface complexation modeling [J]. *BioResources*, 9(2): 2484-2499.
- ZIMMERMAN A. 2010. Abiotic and anaerobic oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 44(4): 1295-1301.
- 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 2011. 生物炭应用技术研究[J]. *中国工程科学*, 13(2): 83-89.
- 陈心想, 何绪生, 张雯, 等. 2014. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 32(1): 110-114.
- 韩光明, 孟军, 曹婷, 等. 2012. 生物炭对菠菜根际微生物及土壤理化性质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 43(5): 515-520.
- 黄超, 刘丽君, 章明奎. 2011. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 37(4): 439-445.
- 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 2012. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 31(5): 962-968.
- 吕伟波. 2012. 生物炭对土壤微生物生态特征的影响[D]. 杭州: 浙江大学.

- 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 2014. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 25(8): 2281-2288.
- 宋延静, 张晓黎, 龚骏. 2014. 添加生物炭对滨海盐碱土固氮菌丰度及群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 33(8): 2168-2175.
- 王宁. 2012. 生物炭对复合污染土壤植物修复效果的影响[D]. 济南: 山东大学.
- 文曼, 郑纪勇. 2012. 生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响[J]. 水土保持研究, 19(1): 46-51.
- 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 2014. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 29(1): 68-79.
- 谢祖彬, 刘琦, 朱春悟, 等. 2011. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 43(6): 857-861.
- 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 2013. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. 农业环境与发展, 30(4): 29-34.
- 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 2009. 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, 28(12): 2459-2463.
- 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 2011. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 30(10): 1946-1952.
- 朱庆祥. 2011. 生物炭对 Pb、Cd 污染土壤的修复试验研究[D]. 重庆: 重庆大学.

Influence of Biochar on the Community Structure and Biogeochemical Functions of Microorganisms in Soils

ZHANG Youchi^{*}, LI Huidan

Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Biochar, a solid material containing high fractions of aromatic functional groups, is produced through thermal degradation of biomass in the absence of oxygen or with limited oxygen. Biochar amendment can improve the physio-chemical properties of soils, regulate cycling of nutrient elements, and control transfer of pollutants, including heavy metals and poly-aromatic hydrocarbons. Although biochar can be potentially used for soil amendment, it influences the microflora in the soil environment, leading to changes in element cycling within the ecosystem. This paper summarizes recent advances about the effect of biochar on the distribution of soil microorganisms, discusses the mechanisms of biochar on the growth and metabolism of microbes, and illustrates the influence of biochar on the biogeochemical processes regulated by soil microorganisms. Previous studies demonstrated that the total biomass of soil microbes may increase, remain constant, or even decrease after biochar application to the soil environment. Different microorganisms show complex responses to biochar amendment, resulting in formation of unique microbial community structures in different soils. The influence of biochar on the growth and metabolism of microorganisms originated from the interrelated effects of several mechanisms, including pH changes, water distribution, and manipulation of nutrient cycling. In these mechanisms, adsorption of inorganic/organic compounds and microbial thallus by biochar play important roles. The effect of biochar on microbial community structure changes over time. Biochar also influences the eco-functions of microorganisms, resulting in changes in biogeochemical processes, such as emission of greenhouse gas, cycling of carbon and nitrogen, and degradation of organic pollutants. Further studies must be conducted to elucidate the effect of biochar on soil quality and provide useful information for biochar application in soil amendment.

Key words: biochar; microbial community structure; biogeochemistry; soil