

# 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展

陈颖<sup>1,2</sup> 刘玉学<sup>2,3</sup> 陈重军<sup>4</sup> 吕豪豪<sup>2,3</sup> 汪玉瑛<sup>2,3</sup> 何莉莉<sup>2,3</sup> 杨生茂<sup>1,2,3\*</sup>

(<sup>1</sup>浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江金华 321004; <sup>2</sup>浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021;

<sup>3</sup>浙江省生物炭工程技术研究中心, 杭州 310021; <sup>4</sup>苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009)

**摘要** 近年来由于生物炭具有碳素稳定性强和孔隙结构发达等特性,其在土壤固碳减排方面的作用研究受到广泛关注.然而当生物炭进入土壤环境后最终是增加土壤碳的储存还是促进土壤碳的排放?目前学术界对该问题仍存在争议.生物炭对土壤有机碳的激发效应及其机理研究有待进一步深入开展.本文在分析生物炭自身碳素组分和稳定性、孔隙结构及表面形态特征的基础上,综述了添加生物炭对土壤本底有机碳矿化产生激发效应的研究进展,分别阐述了产生正激发和负激发效应(即促进和抑制矿化)的机制机理,认为正激发效应主要是基于生物炭促进土壤微生物活性增强、生物炭中易分解组分的优先矿化以及由此引发的土壤微生物的共代谢作用,而负激发效应主要是基于生物炭内部孔隙结构和外表面对土壤有机质的包封作用和吸附保护作用、生物炭促进土壤有机-无机复合体形成的稳定化作用、生物炭对土壤微生物及其酶活性的抑制作用.最后对今后相关研究方向进行了展望,以期为生物炭在土壤固碳减排方面的应用提供理论依据.

**关键词** 生物炭; 土壤有机碳; 激发效应; 矿化作用; 固碳

**Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: A review.** CHEN Ying<sup>1,2</sup>, LIU Yu-xue<sup>2,3</sup>, CHEN Chong-jun<sup>4</sup>, LYU Hao-hao<sup>2,3</sup>, WANG Yu-ying<sup>2,3</sup>, HE Li-li<sup>2,3</sup>, YANG Sheng-mao<sup>1,2,3\*</sup> (<sup>1</sup>College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China; <sup>2</sup>Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; <sup>3</sup>Engineering Research Center of Biochar of Zhejiang Province, Hangzhou 310021, China; <sup>4</sup>School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China).

**Abstract:** In recent years, studies on carbon sequestration of biochar in soil has been in spotlight owing to the specific characteristics of biochar such as strong carbon stability and well developed pore structure. However, whether biochar will ultimately increase soil carbon storage or promote soil carbon emissions when applied into the soil? This question remains controversial in current academic circles. Further research is required on priming effect of biochar on mineralization of native soil organic carbon and its mechanisms. Based on the analysis of biochar characteristics, such as its carbon composition and stability, pore structure and surface morphology, research progress on the priming effect of biochar on the decomposition of native soil organic carbon was reviewed in this paper. Furthermore, possible mechanisms of both positive and negative priming effect, that is promoting and suppressing the mineralization, were put forward. Positive priming effect is mainly due to the promotion of soil microbial activity caused by biochar, the preferential mineralization of easily decomposed components in biochar, and the co-metabolism of soil microbes. While negative

本文由国家自然科学基金项目(41701334)、浙江省自然科学基金项目(LY14D010005, LY16D010004)、浙江省重点研发计划项目(2015C03020)、国家公益性行业(农业)科研专项(201303095)和苏州市科技计划项目(SYN201411)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41701334), the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY14D010005, LY16D010004), the Zhejiang Provincial Key Research and Development Program (2015C03020), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303095) and the Suzhou Science & Technology Plan Project (SYN201411).

2017-02-22 Received, 2017-11-06 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangshengmao@263.net

priming effect is mainly based on the encapsulation and adsorption protection of soil organic matter due to the internal pore structure and the external surface of biochar. Other potential reasons for negative priming effect can be the stabilization resulted from the formation of organic-inorganic complex promoted by biochar in the soil, and the inhibition of activity of soil microbes and its enzymes by biochar. Finally, future research directions were proposed in order to provide theoretical basis for the application of biochar in soil carbon sequestration.

**Key words:** biochar; soil organic carbon; priming effect; mineralization; carbon sequestration.

近年来,关于在农田中施用生物炭以提高土壤肥力并实现土壤固碳的研究受到越来越多的关注.生物炭(biochar)是由生物质在限氧条件下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质<sup>[1]</sup>.由于生物炭特殊的理化性质,其在全球碳生物地球化学循环、气候变化和环境保护中发挥着重要作用.随着研究的深入,生物炭技术逐渐成为实现固碳减排、环境污染修复、土壤改良和农林废弃物处理的一条较为可行的新途径,并成为环境科学和农林科学研究的热点<sup>[2-4]</sup>.

土壤有机碳是影响土壤肥力和作物产量高低的决定性因子.大量研究表明,添加外源有机碳对土壤本底有机碳矿化具有重要影响<sup>[5]</sup>.作为一种富含碳元素、具有高度芳香化结构的新型材料,生物炭对土壤有机碳矿化的影响已经引起有关学者的广泛关注.一方认为当生物炭进入土壤环境后会持续发挥其生物化学稳定性,因而积极发挥其土壤固碳作用,增加土壤碳的储存;而另一方针对生物炭促进土壤有机碳矿化的试验事实,认为这会抵消其自身的固碳效果,因而最终会促进土壤碳的排放.目前学术界对该问题仍存在争议,众说纷纭.关于生物炭对土壤本底有机碳矿化影响的研究结论尚不一致,存在促进(正激发效应)、抑制(负激发效应)和无影响的报道.

鉴于生物炭的碳素稳定性和孔隙结构特征是决定其对土壤有机碳矿化产生激发效应的关键因素,本文以生物炭的碳素组分及稳定性、孔隙结构及表面形态特征等典型特性的分析作为切入点,综述了生物炭对土壤有机碳矿化产生激发效应的最新研究进展,并深入剖析产生正激发效应和负激发效应的机制机理,以期生物炭在农田土壤固碳减排方面的科学应用提供理论依据,并为相关研究提供参考.

## 1 生物炭典型特性分析

### 1.1 生物炭的碳组分及其稳定性

生物炭中的碳素可分为两部分:1) 稳定态碳,即难以氧化降解或难以被微生物利用的芳香化碳,

占主要部分;2) 易分解态碳,即具有异质化学特性<sup>[6]</sup>、可以直接被土壤微生物分解利用的脂肪族碳和氧化态碳,约占 5%~37%<sup>[7]</sup>.以往对生物炭稳定性的研究发现,生物炭具有高度的生物化学和热稳定性<sup>[8-9]</sup>,可在环境中存在数千年<sup>[10]</sup>.这主要是基于其含有大量的烷氧基和芳基等官能团,芳基碳结构含量高达 63%~98.5%,而这些结构都是构成稳定芳香化物质的重要组分.同时,由于其复杂成分中丰富的碳水化合物、长链烯烃等有机大分子,具有与土壤中的矿物质形成有机无机复合体的功能活性,两者结合形成具有物理保护作用的团聚体,从而降低其受到土壤微生物的影响<sup>[11-13]</sup>.土壤团聚体的碳保护能力是土壤发挥其自然固碳潜力的基础<sup>[6]</sup>.而生物炭还可以通过提高土壤阳离子交换量来增加土壤团聚体的稳定性<sup>[14]</sup>.因此,生物炭自身稳定性以及土壤团聚体的物理保护作用是决定生物炭在土壤中存留时间长短的关键因素<sup>[15-16]</sup>.

### 1.2 生物炭孔隙结构及表面形态特征

生物炭孔隙结构发达,其孔径大小受到原料类型和制备条件的影响.研究发现,油菜生物炭的孔隙分布以微孔为主,其总孔容积随制备温度的升高呈现先增大后减小的趋势<sup>[17]</sup>.300~600 °C 家禽垃圾生物炭的比表面积为 2.68~5.79 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,且随热解温度的升高而增加<sup>[18]</sup>.而 600 °C 竹质生物炭和栎树生物炭的比表面积较大,分别为 137.7 和 154.6 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>,主要与其发达的微孔结构有关.生物炭丰富的孔隙度可以增加土壤的通气性能和持水能力,改善土壤理化性质<sup>[20]</sup>.同时,其特殊的孔隙结构和巨大的比表面积可以作为微生物生长的载体,进而对土壤微生物的种群丰度和群落结构产生重要影响<sup>[21]</sup>.吴伟祥等<sup>[22]</sup>采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)对生物炭表面基团进行分析,发现水稻秸秆生物炭含氧官能团和脂肪族 C-H 含量随热解温度的升高而逐渐减少,但不同温度条件下始终存在 Si-O 吸收峰,这主要是由于原材料水稻秸秆的 Si 含量较高.Lin 等<sup>[23]</sup>对造纸污泥生物炭和鸡粪生物炭的新鲜样品及其在土壤中的老化样品进行扫描电镜

(SEM)分析,发现两种老化生物炭样品表面都附着有土壤矿物质,但矿物种类显著不同,这说明生物炭会与土壤中的一些有机矿物相互结合形成团聚体,进而发挥其土壤固碳减排等环境效应。

## 2 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应

### 2.1 生物炭促进土壤有机碳矿化

生物炭自身含有大量的碳元素,因而添加至土壤会改变土壤碳库的组成和流动转化。有研究发现,生物炭进入土壤环境后会促进土壤有机碳和生物炭自身的矿化,产生正激发效应,加速土壤有机碳的损失,致使土壤有机碳含量下降,加剧土壤贫瘠化。Major等<sup>[24]</sup>研究表明,添加生物炭后土壤有机碳的矿化作用明显增强,而这部分矿化释放的 $\text{CO}_2$ 主要来源于生物炭自身携带的易分解态碳。Wardle等<sup>[8]</sup>在3个北方森林中长达10年的试验表明,木材生物炭可以促进森林土壤有机碳的分解,这与土壤微生物活性的增强有关。Troy等<sup>[25]</sup>研究发现,添加云杉木质生物炭和水稻秸秆生物炭均能显著提高土壤微生物的呼吸速率和活性,加快土壤有机质的矿化和 $\text{CO}_2$ 释放量。Smith等<sup>[9]</sup>利用 $^{13}\text{C}$ 自然丰度研究添加生物炭对土壤呼吸的影响,证实了生物炭会导致土壤有机碳矿化量的增加。Luo等<sup>[11]</sup>发现芒草生物炭对土壤原有有机碳的矿化也产生正激发效应。

生物炭产生激发效应的强弱与生物炭的制备条件(如热解温度和升温速率)和原料类型有关。低温快速热解生物炭含有较多易降解组分,可为土壤微生物提供更多活性碳源,更容易激发生物炭自身有机碳的矿化作用,释放更多的 $\text{CO}_2$ ,因而其激发效应强于高温慢速热解生物炭<sup>[26]</sup>。Bruun等<sup>[26]</sup>研究发现,快速热解生物炭在经过65 d培养后,其自身碳的矿化量(5.5%)显著大于慢速热解生物炭(2.9%)。此外,植物生物质制得生物炭的激发效应强于家禽粪便生物炭<sup>[27]</sup>。Zimmerman等<sup>[6]</sup>研究表明,250、400和650℃3种温度条件制得的草本生物炭对土壤有机碳矿化的正激发效应显著大于橡木生物炭。

研究表明,对于不同类型、性质及耕作方式的土壤,添加生物炭均可以产生正激发效应。Singh等<sup>[27]</sup>开展了为期5年的矿化培养试验,发现生物炭在培养的前2.3年里显著促进黏粒土壤本底有机碳(420  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )的矿化,即发生正激发效应,且有机碳损失量多达4~44  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;但进一步观察发现,当培养到2.3年以后,生物炭的正激发效应逐渐减弱,最后土壤有机碳的矿化趋于平稳状态。Maestrini等<sup>[28]</sup>研

究了生物炭对不同性质土壤的激发效应随培养时间的变化情况,也得到类似结论。Hamer等<sup>[29]</sup>利用砂质耕地土壤为基质开展添加生物炭与葡萄糖对土壤有机碳矿化的影响试验,结果表明,玉米秸秆生物炭、黑麦秸秆生物炭和橡木生物炭与土壤的混合均加速了土壤有机碳和生物炭自身的矿化,添加葡萄糖促使橡树生物炭的矿化量由0.3%~0.8%提高到0.6%~1.2%,玉米秸秆生物炭也显著增加了葡萄糖的矿化量。Wang等<sup>[30]</sup>研究也表明,添加生物炭使砂质土壤有机碳矿化量增加了28%,这与Farrell等<sup>[31]</sup>的研究结果相一致。此外,Cross等<sup>[32]</sup>采用 $^{13}\text{C}$ 稳定同位素的试验结果表明,生物炭施入土壤后会促进休耕和耕地土壤中有有机碳的矿化作用。

### 2.2 生物炭抑制土壤有机碳矿化

尽管上述研究结果均表明,生物炭对土壤有机碳产生正激发效应,然而也存在相反的报道。研究发现,生物炭添加至土壤环境后可能会降低土壤有机碳的矿化速率<sup>[7]</sup>,抑制土壤有机碳的矿化<sup>[33]</sup>,即产生负激发效应。Liang等<sup>[34]</sup>发现富含生物炭的亚马逊流域土壤总碳的矿化量要比邻近对照土壤总碳的矿化量低25.5%,这也表明生物炭对土壤有机质矿化具有抑制作用。Herath等<sup>[35]</sup>将玉米秸秆生物炭添加到有机碳含量为4%的淋溶土中,进行为期510 d的培养试验,结果显示生物炭对该土壤有机碳矿化也产生负激发效应。Purakayastha等<sup>[36]</sup>将在400和600℃制备的 $\text{C}_3$ 生物炭(稻壳和小麦秸秆)和 $\text{C}_4$ (玉米秸秆和柳枝稷)生物炭分别添加到两种土壤(松软土和老成土)中培养60 d后,发现600℃小麦秸秆生物炭和玉米秸秆生物炭都显著抑制了本底土壤有机碳的矿化,产生负激发效应,将碳固存在土壤中。

在有其他碳源存在或将生物炭进行改性修饰的条件下,添加生物炭同样可以抑制土壤有机碳的矿化作用。Prayogo等<sup>[37]</sup>研究发现,在添加和不添加枯枝落叶的条件下,添加2%柳树生物炭都显著抑制了土壤的呼吸作用,并使 $\text{CO}_2$ 矿化量分别减少20%和10%。Keith等<sup>[38]</sup>向土壤中添加不同温度制得的桉木生物炭和不同剂量的外源易降解有机物质(甘蔗残渣),发现生物炭显著抑制了土壤的矿化,且该抑制作用随甘蔗残渣添加量的增加而更为明显。Lu等<sup>[39]</sup>研究发现,将无机氮修饰的玉米秸秆生物炭添加到华北平原砂壤土中,显著减少了土壤有机碳的 $\text{CO}_2$ 排放量,这表明添加生物炭对土壤本底有机碳的矿化产生了负激发效应。



生物炭对土壤有机碳矿化的影响,与生物炭自身特性、土壤理化性质及两者反应时间有关。一般情况下,生物炭添加至土壤后,在培养前期往往会促进土壤本底有机碳的矿化,这可能是生物炭中不稳定组分的快速降解引起的;随着培养时间的延长,生物炭对土壤本底有机碳矿化的激发效应由正激发效应逐渐变为负激发效应,可能是由于生物炭使土壤本底有机碳变得更加稳定的缘故<sup>[40]</sup>。Kerré 等<sup>[41]</sup>将 450 ℃ 玉米秸秆生物炭添加到土壤中进行为期 180 d 的室内培养试验,结果表明,生物炭减少了土壤本底有机碳的矿化,同时促进了土壤团聚体的物理保护作用。此外, Jones 等<sup>[42]</sup>采用 <sup>14</sup>C 对土壤有机碳进行长期标记,发现生物炭会显著抑制土壤本底有机碳的分解,而这部分被抑制的有机碳正好抵消生物炭自身降解所释放的 CO<sub>2</sub>。而 Naisse 等<sup>[43]</sup>研究发现,将 550 ℃ 黑麦草生物炭添加到森林土壤中,并未对森林土壤本底有机碳的矿化产生显著影响。

### 3 生物炭对土壤有机碳产生激发效应的机制机理

#### 3.1 正激发效应产生的机制(促进矿化)

土壤有机碳的矿化作用受到土壤微生物的影响,而土壤微生物的活动与土壤理化性质有关。添加生物炭会直接改变土壤的理化性质,并间接影响土壤微生物的生命活动,从而改变土壤碳素流转<sup>[44]</sup>。添加生物炭促进土壤有机碳矿化的机制机理主要表现在 3 个方面:

1) 添加生物炭有利于土壤微生物的生长繁殖,促进土壤微生物活性增强,直接引起土壤有机碳矿化的增加。生物炭发达的孔隙结构可对土壤微生物的生存和栖息起到保护作用,从而有利于土壤微生物的生长和繁殖,并促进其对土壤有机碳的矿化分解,即产生正激发效应。

2) 生物炭含有的易分解态碳组分可作为碳源优先被土壤微生物利用,从而促进生物炭自身的矿化。生物炭因其含有易分解态碳而成为补充土壤可利用态有机碳的理想材料,添加至土壤后少部分易分解态碳优先被土壤微生物利用<sup>[25]</sup>,同化为土壤微生物生物量碳并储存于微生物体内,因此在培养前期生物炭可促进土壤有机碳的矿化,且土壤呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 主要来源于生物炭中易分解态碳<sup>[6,45]</sup>。与高温生物炭相比,低温生物炭含有较多易分解态碳,可为土壤微生物提供更多活性碳源,因而更容易激发有机碳的矿化作用,释放更多 CO<sub>2</sub><sup>[25]</sup>。土壤微生物还可通过酶降解和螯合作用等机制促进生物炭直接

降解与利用,即:生物炭可刺激土壤中漆酶等胞外酶活性的增强,使其产生可以促进生物炭降解的产物<sup>[46]</sup>;生物炭中含有丰富的可利用态金属离子可与土壤中某些真菌产生的螯合剂形成金属螯合物<sup>[47]</sup>,促进生物炭的降解。综上所述,添加生物炭对土壤有机碳矿化的促进作用主要来源于生物炭自身携带的易分解态碳。

3) 生物炭由于其多孔性及含有多种营养元素而对土壤微生物产生有利影响,由此引发土壤微生物的共代谢作用,促进土壤本底有机碳的分解<sup>[48]</sup>。添加生物炭会在短期内为土壤微生物提供一定的外源易分解态碳供其分解利用<sup>[45]</sup>,并由此促进土壤微生物的共代谢作用<sup>[5]</sup>,增加土壤微生物生物量和活性,增强土壤呼吸和酶活力,从而显著增加土壤有机碳的矿化速率,加速土壤本底有机碳的分解<sup>[8-13]</sup>,所以在培养初期土壤碳的矿化损失量比较明显。但随着时间的延长,土壤微生物共代谢所需外源有机碳的不断减少<sup>[27]</sup>可能会导致土壤呼吸作用减弱,生物炭还可能引起土壤有机碳和矿物质的互相作用,进而引起土壤有机碳矿化量的降低,因此生物炭对土壤有机碳的激发效应逐渐趋于稳定化<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 负激发效应产生的机制(抑制矿化)

添加生物炭对土壤有机碳矿化产生负激发效应的机制机理主要表现在以下 3 个方面:

1) 生物炭内部孔隙结构和外表面对土壤有机质的包封作用和吸附保护作用。一方面,生物炭具有发达的孔隙结构,可以将土壤有机碳吸附到其孔隙内包裹起来,隔离微生物及其产生的胞外酶与孔隙内有机碳的接触,可以增加土壤有机碳抵抗微生物降解的稳定性,降低土壤有机碳的矿化速率,这被称为包封作用;另一方面,生物炭具有丰富的表面形态特征,可以将土壤有机碳吸附到其外表面上,降低土壤有机碳的可利用性,抑制被吸附有机碳的降解,这被称为吸附保护作用<sup>[49]</sup>。生物炭对土壤有机碳的以上两种作用均可以减少土壤微生物生命活动所需的碳源<sup>[50]</sup>,最终导致土壤微生物的呼吸作用减弱、土壤有机碳矿化速率的降低以及有机碳的转化变缓<sup>[37]</sup>,从而发挥其土壤固碳潜力<sup>[10]</sup>。

2) 生物炭促进土壤有机-无机复合体形成的稳定化作用。生物炭促进土壤有机碳和无机矿物复合体的形成,可以将土壤有机碳稳定起来,从而使其免于被微生物分解利用。生物炭还可以通过对土壤有机碳和矿物质的吸附作用<sup>[34]</sup>,促进蒙脱石含量丰富的土壤中易分解有机碳与有机-无机复合体的结合,

形成新的有机无机复合体和土壤团聚体<sup>[38]</sup>,进而促进土壤有机碳的稳定化<sup>[51]</sup>.此外,土壤复合体和团聚体的形成主要由土壤类型决定,黏粒土壤中含有大量的矿物元素,有利于形成土壤有机碳和无机矿物质复合体<sup>[52]</sup>,并且外源有机碳的添加会促进复合体的形成从而有助于土壤有机碳的稳定化.

3)生物炭对土壤微生物及其酶活性产生抑制作用.不同原料类型及制备工艺的生物炭性质差异很大,因此其对土壤微生物的影响不尽相同.尽管通常情况下生物炭可为土壤微生物的生长提供碳源,且其发达的孔隙结构可对土壤微生物起到保护作用,但由于原料污染或制备条件原因,生物炭中可能含有某些有毒有害物质(呋喃和酚类化合物等),或通过其他某种途径抑制土壤微生物及其酶活性<sup>[3,39]</sup>,进而抑制其对土壤有机碳的矿化作用.

此外,在外源有机碳存在的条件下,添加生物炭可增强土壤氮素的固定,从而引起土壤微生物优先利用外源有机碳,降低其对土壤本底有机碳的利用<sup>[53]</sup>.

## 4 展 望

生物炭对土壤有机碳的矿化可能同时存在促进和抑制两种相反的过程,因此产生的激发效应可能是两种作用的综合结果.以上的机制机理只是建立在以往研究基础上的推测分析,相关研究还有待进一步深入开展,提出展望如下:

1)对比研究不同稳定性的生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应.对比不同生物炭对土壤碳循环过程作用研究结果发现,生物炭对土壤有机碳矿化作用的影响取决于生物炭稳定性的不同.而生物炭的稳定性与原料类型和制备工艺条件密切相关,因此需要系统开展不同原料类型和不同工艺条件制备的生物炭的稳定性研究,制定规范专业的评价标准,并建立其与土壤有机碳矿化之间的相关性,进而揭示激发效应规律.

2)充分重视土壤自身因素,因地制宜发挥生物炭固碳减排作用.生物炭激发效应的正负及其强弱受到土壤本底有机碳含量高低的影响.针对不同地区的不同类型土壤,生物炭的激发效应可能存在较大差异.已有研究证实,水稻秸秆生物炭中碳的累积矿化速率随土壤总有机碳含量的增加而增加;而对于黏粒矿物丰富的土壤,生物炭添加会促进土壤有机质和矿物结合,形成较为稳定的复合体,削弱土壤有机质的矿化.因此,需要通过因地制宜地开展相关

研究合理发挥生物炭的土壤固碳减排功能.

3)利用同位素标记与分子生物学技术相结合深入探究相应机理机制.由于生物炭自身结构中也含有机碳,因此很难就生物炭对土壤有机碳降解转化的贡献和影响进行精准的定量检测.采用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^{14}\text{C}$ 同位素标记与分子生物学技术相结合的方法开展生物炭对土壤有机碳矿化的影响研究,有利于进一步阐明生物炭与土壤有机碳之间的相互作用机制.

4)综合考虑自然条件下生物炭-植物根系-土壤有机碳的交互作用.针对农田和森林生态系统,应考虑生物炭-植物根系-土壤有机碳三种碳源的交互作用,综合生物炭特性、植物种类、土壤类型等因子系统理解微生物机制,以期更好地探讨生物炭的土壤固碳增汇机理.

## 参考文献

- [1] Antal MJ, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, **42**: 1619–1640
- [2] Sohi SP. Carbon storage with benefits. *Science*, 2012, **338**: 1034–1035
- [3] Lehmann J, Rillig MC, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1812–1836
- [4] Bu X-L (卜晓莉), Xue J-H (薛建辉). Biochar effects on soil habitat and plant growth: A review. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2014, **23** (3): 535–540 (in Chinese)
- [5] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, *et al.* Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 823–830
- [6] Zimmerman AR, Gao B, Ahn MY. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1169–1179
- [7] Spokas KA, Koskinen WC, Baker JM. Impacts of wood-chip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*, 2009, **77**: 574–581
- [8] Wardle DA, Nilsson MC, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science*, 2008, **320**: 629
- [9] Smith JL, Collins HP, Bailey VL. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 2345–2347
- [10] Sun J, Wang BC, Xu G, *et al.* Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland. *Ecological Engineering*, 2014, **62**: 43–47
- [11] Luo Y, Durenkamp M, Nobili MD. Short term soil priming effects and the mineralization of biochar following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biology and*

- Biochemistry*, 2011, **43**: 2304–2314
- [12] Bruun EW, Ambus P, Egsgaard H, *et al.* Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 73–79
  - [13] Singh R, Babu JN, Kumar R, *et al.* Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective. *Ecological Engineering*, 2015, **77**: 324–347
  - [14] Obia A, Mulder J, Martinsen V, *et al.* *In situ* effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 35–44
  - [15] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 1301–1310
  - [16] Purakayastha TJ, Kumari S, Pathak H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma*, 2015, **239/240**: 293–303
  - [17] Angin D, Şensöz S. Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 2014, **16**: 684–693
  - [18] Song W, Guo M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, **94**: 138–145
  - [19] Liu ZY, Demisie W, Zhang MK. Simulated degradation of biochar and its potential environmental implications. *Environmental Pollution*, 2013, **179**: 146–152
  - [20] Yan Y-H (颜永毫), Zheng J-Y (郑纪勇), Zhang X-C (张兴昌), *et al.* Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2013, **27** (4): 120–124 (in Chinese)
  - [21] Ding Y-L (丁艳丽), Liu J (刘 杰), Wang Y-Y (王莹莹). Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24** (11): 3311–3317 (in Chinese)
  - [22] Wu W-X (吴伟祥), Sun X (孙 雪), Dong D (董达), *et al.* Environmental Effects of Biochar in Soil. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese)
  - [23] Lin Y, Munroe P, Joseph S, *et al.* Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: An investigation using microscopy. *Plant and Soil*, 2012, **357**: 369–380
  - [24] Major J, Lehmann J, Rondon M, *et al.* Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1366–1379
  - [25] Troy SM, Lawlor PG, O'Flynn CJ, *et al.* Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **60**: 173–181
  - [26] Bruun EW, Ambus P, Egsgaard H, *et al.* Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 73–79
  - [27] Singh BP, Cowie AL. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 3687
  - [28] Maestrini B, Nannipieri P, Abiven S. A meta-analysis on pyrogenic organic matter induced priming effect. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, **7**: 577–590
  - [29] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, *et al.* Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 823–830
  - [30] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, **8**: 512–523
  - [31] Farrell M, Kuhn TK, Macdonald LM, *et al.* Microbial utilisation of biochar-derived carbon. *Science of the Total Environment*, 2013, **465**: 288–297
  - [32] Cross A, Sohi SP. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 2127–2134
  - [33] Naisse C, Girardin C, Lefevre R, *et al.* Effect of physical weathering on the carbon sequestration potential of biochars and hydrochars in soil. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, **7**: 488–496
  - [34] Liang B, Lehmann J, Sohi SP, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**: 206–213
  - [35] Herath HMSK, Camps-Arbestain M, Hedley MJ, *et al.* Experimental evidence for sequestering C with biochar by avoidance of CO<sub>2</sub> emissions from original feedstock and protection of native soil organic matter. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, **7**: 512–526
  - [36] Purakayastha TJ, Das KC, Gaskin J, *et al.* Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C3 and C4 biochars applied to two different soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 107–115
  - [37] Prayogo C, Jones JE, 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. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**: 695–702
  - [38] Keith A, Singh B, Singh BP. Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**: 9611–9618
  - [39] Lu W, Ding W, Zhang J, *et al.* Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **76**: 12–21
  - [40] Andrew C, Sohi SP. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 2027–2134
  - [41] Kerré B, Maria CH, Smolders E. Partitioning of carbon sources among functional pools to investigate short-term priming effects of biochar in soil: A <sup>13</sup>C study. *Science of the Total Environment*, 2016, **547**: 30–38
  - [42] Jones DL, Murphy DV, Khalid M, *et al.* Short-term bio-

char-induced increase in soil CO<sub>2</sub> release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1723–1731

[43] Naisse C, Girardin C, Davaise B, *et al.* Effect of biochar addition on C mineralisation and soil organic matter priming in two subsoil horizons. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**: 1–8

[44] Murray J, Keith A, Singh B. The stability of low- and high-ash biochars in acidic soils of contrasting mineralogy. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **89**: 217–225

[45] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, *et al.* Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 513–523

[46] Olivier CF. An Investigation into the Degradation of Biochar and Its Interactions with Plants and Soil Microbial Community. Master Thesis. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2011

[47] Bird MI, Wurster CM, De Paula Silva PH, *et al.* Algal biochar-production and properties. *Bioresource Technology*, 2011, **102**: 1886–1891

[48] Ge X-G (葛晓改), Zhou B-Z (周本智), Xiao W-F (肖文发), *et al.* Priming effect of biochar addition on soil carbon emission: A review. *Ecology and Environ-*

*mental Sciences* (生态环境学报), 2016, **25**(2): 339–345 (in Chinese)

[49] Kaiser K, Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**: 711–725

[50] Thies JE, Rillig MC. Characteristics of biochar; Biological properties// Lehmann J, Joseph S, eds. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London: Earthscan, 2009: 85–105

[51] Jastrow JD, Amonette JE, Bailey VL. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, **80**: 5–23

[52] Lehmann J, Sohi S. Comment on fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science*, 2008, **321**: 5894

[53] Cui J, Ge T, Kuzyakov Y, *et al.* Interactions between biochar and litter priming: A three-source <sup>14</sup>C and <sup>δ</sup><sup>13</sup>C partitioning study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**: 49–58

作者简介 陈 颖,女,1994 年生,硕士研究生. 主要从事生物炭对土壤有机碳的影响研究.E-mail: cy940501@126.com

责任编辑 张凤丽