

高敬尧,王宏燕,许毛毛,等. 生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):10-15.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.003

生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展

高敬尧,王宏燕,许毛毛,代琳,冯露,袁佳慧,徐红涛,孙岩,吴艳伟

(东北农业大学资源与环境学院,黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:在高温条件下(通常 $<700\text{ }^{\circ}\text{C}$),通过限氧或完全缺氧对生物质原料进行热裂解和炭化所产生的一类含碳丰富的固态稳定物质称为生物炭。生物炭因其灰分中含有一定比例的矿质元素如钾、钙、钠、镁、硅等,它们以氧化物或碳酸盐形式存在,溶于水后呈碱性,所以生物炭普遍呈碱性;生物炭表面含有大量的 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{COH}$ 、 $-\text{OH}$ 等含氧官能团,丰富的含氧官能团易使生物炭表面产生大量负电荷,进而提高阳离子交换量(CEC);生物炭巨大的比表面积和丰富的孔隙结构有助于增强土壤持水、透气、保肥的能力,提高土壤对于易淋失养分元素和重金属污染物的吸附能力,具有提高肥料利用率、修复污染土壤的作用;生物炭还有助于促进土壤团聚体的形成,增加土壤水稳性团聚体数量;生物炭发达的多孔结构有助于降低土壤体积、质量,具有改善土壤物理性状的作用,同时对促进作物根系的生长发育、为土壤微生物提供栖息环境和生存空间、提高作物产量均有一定的效果。从生物炭的特性及制备影响因素、对土壤理化性质的影响、作物的生长发育及养分的吸收利用以及对污染土壤的修复和改良等方面进行阐述,并提出未来生物炭在农业等方面的应用,以期为相关领域学者提供借鉴和参考。

关键词:生物炭;农田土壤;土壤性质;作物生长;土壤改良;污染土壤修复

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)10-0010-06

有一种肥料对于提高极其贫瘠的土壤肥力具有显著的作用,它广泛并长期被生活在巴西亚马逊流域的人们使用,被称为亚马逊黑土(Terra Preta)^[1]。这种肥料具有含碳丰富、pH值较高等特点,其土壤氮、磷等肥力的含量是周边其他类型土壤的3倍左右;农作物产量也是周边其他类型土壤作物产量的2倍左右^[2];这类土壤中微生物的活性也比附近其他土壤中高得多。

经过现代学者的研究发现,这种黑土是长期生活在亚马逊流域的人们为了增加土壤肥力而人为制造的,是目前亚马逊流域乃至全球土质最优良和肥沃的土壤之一。它是将不同生物质(biomass)原料经焚烧过后施入土壤,导致土壤呈黑色,这类土壤的主要成分是生物炭(biochar)。生物炭是指将生物质原料(农作物秸秆、木材、畜禽粪便、生活垃圾等)在限氧或缺氧条件下,经高温热裂解所产生的一类高度芳香化、含碳丰富、稳定的固态物质^[3]。

生物炭被学术界广为关注源于对全球气候变化的研究,因为生物炭具有高度芳香化的结构,使其具有极高的稳定性而长期存在于土壤中,因此可以通过土壤吸收大气中的碳并将其以生物炭的形式固定于土壤中,从而减少和降低因 CO_2 引起的温室效应。生物炭产品还可以进一步提高碳负效应来应对和缓解全球气候变化^[4]。Lehmann等发现,当向土壤中

施用质量分数为2%的生物炭时,几乎完全抑制了甲烷的排放^[5]。在此基础上,随着国内外学者对于生物炭研究的深入,发现生物炭除了具有固碳减排作用外,还因其独特的理化性质而具有持水、透气、保肥、提高微生物活性及促进作物产量增长的作用。同时,生物炭丰富的多孔结构及表面含有的大量含氧官能团对于重金属、有机污染物等具有较强的吸附能力,将有毒物质固定在生物炭内部,可降低化学有效性和活动性,从而修复和改良受污染的土壤^[6]。20世纪80年代以后,全球学者对于生物炭的理化性质以及将其作为土壤改良剂、固碳剂的研究相继展开,逐渐拉开了生物炭相关研究的序幕。

1 生物炭的特性及制备影响因素

生物炭的性质受原材料以及制备过程中温度、时间、压力、氧气等条件影响^[7-8]。制备生物炭的原料以及制备过程中的环境条件不同,所产生的生物炭理化性质如pH值、孔隙度、比表面积、养分含量、阳离子交换量(CEC)、吸附能力等不尽相同^[9]。生物炭中含有大量作物生长所需的营养元素,除碳含量较高外,氮、磷、钾、钙、镁的含量也较高,碳、氮含量由于燃烧、挥发的原因随温度的升高而降低,而钾、钙、镁、磷的含量随温度的升高而增加^[10]。一般情况下,主要元素的比例为碳66.6%~87.9%、氢1.2%~2.9%、氧10.6%~26.6%;其次是灰分元素,主要包括钾、钙、钠、镁、硅等^[11]。

Gaskin等指出,热解温度对生物炭的质量尤其是表面化学性质、孔径大小的影响非常大,生物炭的碳含量、养分浓度受制备生物炭的原材料类型影响较大^[12-14]。生物炭的元素组成与炭化温度有关,在限制供氧量条件下,随着炭化温度的升高,其含碳量增加;氢、氧含量降低,灰分含量有所增加,比表面积逐渐增大。而灰分的元素组成还与植物生长地的土壤

收稿日期:2016-04-06

基金项目:黑龙江省科技计划(编号:GA10B502);东北农业大学博士后科研基金(编号:2012RCB95)。

作者简介:高敬尧(1990—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,研究方向为农业生态学及土壤改良。E-mail:1069592819@qq.com。

通信作者:王宏燕,博士,教授,主要从事生物质炭相关研究。E-mail:why220@126.com。

类型、植物种类有关^[13]。生物炭中矿物质含量从高到低排序一般为畜禽粪便 > 草本植物 > 木本植物,而含碳量则相反^[12,14]。

一般而言,生物炭的 pH 值、灰分含量、比表面积与热裂解的温度呈正相关^[15],一般制备温度越高,其比表面积越大。Kishimoto 等研究表明,400 ~ 1 000 °C 制成的生物炭,其比表面积为 200 ~ 400 m²/g^[16];在低温条件下,产出的生物炭也可能具有较小的比表面积^[17]。大部分生物炭呈碱性,一方面是因为生物炭中的灰分元素主要为钾、钙、镁等,多数以氧化物、碳酸盐形式存在,溶于水后显碱性;另一方面,由于植物生长过程中聚集大量金属阳离子,为保持体内电荷平衡,会积累一定量的碱基(有机阴离子),在热解过程中碱基被浓缩,使生物炭呈碱性^[18]。生物炭本身具有改良土壤性质、促进土壤团聚体形成、调控土壤微生物生态等特性,同时还能减少土壤的重金属含量,以炭作原料制备生物炭基肥,这些特性也是生物炭与普通炭的区别所在,详见表 1。

表 1 不同形式炭的比较

概念	内涵定义
生物炭	强调生物质原料来源和在农业科学、环境科学中的应用,主要用于土壤肥力改良、大气碳库增汇减排以及受污染环境修复
炭	泛指炭材料,尤其强调由天然火在自然状态下烧制形成
木炭/炭黑	制作过程和性质特点与生物炭相似,多使用木头、煤炭作为原料,强调应用于燃料、工业热炼、除臭脱色的生物质热解残渣,具有高热值、高内表面积
活性炭	强调制作过程中为增强表面特性的应用而人为采用极高温(通常 > 700 °C)、物理化学手段(如高温气体或化学药剂)活化的高比表面积、高吸附特性的疏松多孔性物质,常用于受污染环境的修复、环境工程处理等方面
黑炭	泛指各类有机质不完全碳化生成的残渣,包括炭黑、生物炭、活性炭、焦炭等各种炭质材料

2 生物炭施入对土壤理化性质的影响

2.1 生物炭对土壤物理性质的影响

土壤水分含量及其有效性是全球范围内衡量土壤生产量的一项重要指标。生物炭因其丰富的多空结构可以吸附、保持水分,并且可以增强土壤水分的渗透性^[19]。Glaser 等研究发现,在巴西亚马逊地区,富含生物炭土壤的水分含量较邻近无炭土壤高 18%^[20]。文曼研究表明,生物炭对沙土的持水作用最明显,当土壤水吸力为 800 kPa 时,生物炭含量为 150 g/kg 处理的水分含量为 18%,为对照的 4.5 倍,这可能是因为生物炭增加了沙土的比表面积、极性基团数量^[21]。因此,大孔隙结构土壤通过施加生物炭可以提高土壤田间持水量。土壤含水量高低除与土壤质地有关外,还受生物炭的颗粒度、比表面积、密度等影响。

同时,生物炭对土壤物理性状的影响还与生物炭的施用量、被施土壤基础肥力水平有关。黄超等研究表明,当生物炭用量为 10 g/kg 时,其对土壤物理性质的影响不明显;但当生物炭用量为 50、200 g/kg 时,其对肥力水平较低土壤的水稳定性团聚体数量、容重、饱和持水量均产生明显影响,但对肥

力水平较高的土壤,生物炭仅对土壤容重产生明显影响,对水稳定性团聚体数量、田间持水量的影响不显著^[22]。生物炭可以有效降低土壤体积、质量,有研究表明,生物炭施用量与土壤体积、质量呈负相关^[23]。

总体而言,生物炭对于土壤物理性状的影响及改善主要体现在降低土壤体积与质量、土壤拉伸强度,促进作物根系的生长和发育,以及增加土壤孔隙度、提高土壤透气和持水保水能力^[24]。

2.2 生物炭对土壤化学性质的影响

研究发现,生物炭具有固碳减排、提高土壤肥力的作用^[25-26]。植物通过光合作用将 CO₂ 固定在体内,生物质经过高温热裂解的炭化作用,将大气中的 CO₂ 以稳定炭的形式固定,从而阻止碳向大气中再次回归。生物炭的添加对于土壤有效养分含量的提高具有促进作用。有研究表明,增施生物炭使得盆栽大豆、牧草全生育期 N₂O 排放量减少 50% ~ 80%,并几乎不排放甲烷^[26]。郭伟等研究发现,施用生物炭与对照处理相比,在 0 ~ 7.5、7.5 ~ 15.0 cm 2 个土层之间碱解氮的质量分数没有显著差异,但施用生物炭处理明显提高了土壤耕层全氮的质量分数^[27]。同时也有研究指出,在玉米苗期,通过添加生物炭可以有效增加土壤全氮、有机碳含量,但是对于土壤全磷、速效磷含量没有影响^[28]。

生物炭可以提高土壤中氮含量的原因可能为以下几个方面:(1)生物炭中含有少量氮元素,对于提高土壤中氮含量有促进作用;(2)由于生物炭的多孔结构,可以改善土壤呼吸状况,土壤中碳氮比升高,能够抑制氮素的微生物转化、反硝化作用,从而促进土壤中氮含量的增加^[27]。但也有学者指出,添加生物炭对于土壤中有效磷、钙、镁含量的提高具有显著效果,但是对于氮、钾的影响不明显^[29]。Novak 等研究表明,土壤中添加质量分数为 2% 的生物炭,67 d 后发现土壤钙、钾、锰、磷含量明显升高,但硫、锌含量降低^[30]。

生物炭具有较高的 pH 值,普遍呈碱性。因为生物炭的灰分元素主要为钠、钾、钙、镁等,这些元素主要以氧化物、碳酸盐的形式存在,溶于水呈碱性^[31]。有研究发现,以 2 种花生壳为原料,将在 300、400 °C 条件下制备的生物炭加入酸化土壤中,可以显著降低土壤容重,提高土壤 pH 值,并且 pH 值的提高能力与生物炭中灰分含量呈正相关,当生物炭添加量为 5% 时,与对照相比,2 种温度下制备的生物炭使土壤 pH 值分别提高了 0.99、1.40^[32]。因此,生物炭可以用作酸性土壤的改良剂来中和土壤酸度,提高土壤的 pH 值,对我国东北地区的较酸且肥力较低的白浆土的改良具有积极作用和意义。

土壤阳离子交换性能的提高,有助于作物对于养分的吸收和利用,使养分缓慢地释放,降低养分的淋洗和流失。生物炭表面含有大量的—COOH、—COH、—OH 等含氧官能团,丰富的含氧官能团易使生物炭表面产生大量负电荷,增强土壤对阳离子的吸附能力,进而提高阳离子交换量^[33]。

生物炭对土壤 CEC 的影响与土壤类型、质地及生物炭的施用量有关,生物炭对提高土壤 CEC 的作用与土壤有机质含量呈负相关,即有机质含量高的土壤,施用生物炭对土壤 CEC 作用较弱,而有机质含量较低的土壤在土壤 CEC 方面较强^[34]。

3 生物炭施入对作物生长发育的影响

3.1 生物炭对作物养分吸收的影响

生物炭可通过改良土壤理化性质,如改善土壤结构、增加土壤有机碳含量、提高土壤 pH 值、提高阳离子交换量、降低交换态 Al^{3+} 含量等途径来间接影响作物生长发育;同时,生物炭也可直接向作物提供少量营养物质,促进作物生长发育,生物炭对作物的作用效果与生物炭的类型、施用量、土壤类型和植物种类等诸多因素具有一定相关性。

许多研究表明,生物炭的施用对作物有增产效果。Major 等在哥伦比亚热带草原氧化土壤中单施 0、8、20 t/hm² 生物炭进行为期 4 年的玉米种植研究。结果表明,除第 1 年外,后 3 年玉米产量连续提高,20 t/hm² 处理在第 4 年的产量比对照提高 140%^[35]。Uzoma 等对生长在沙土的玉米进行研究得出,玉米产量在生物炭施用量为 0 ~ 15 t/hm² 范围内基本随其用量的增加而增加^[36]。除玉米外,生物炭也可促进大豆^[37]、水稻^[38]、番茄^[39]等作物的生长。关于生物炭对作物生长的促进作用,有研究认为,生物炭对低有机质含量土壤的增产效果显著,但对于有机质含量高的土壤作用不明显^[40],或在施用生物炭同时配施化肥才能起到增产作用^[19],原因是肥料消除了生物炭养分低的缺陷,而生物炭赋予肥料养分缓释性能的互补和协同作用^[41]。但生物炭的过高施用会抑制作物生长,甚至减产,或出现隔年增产而当季影响小等现象^[14]。

3.2 生物炭对作物生长发育的影响

生物炭在作物对养分吸收方面的影响与生物炭的种类、施用量以及土壤中原养分含量密切相关。施用生物炭有利于促进作物组织中磷、钾、钙、镁等元素的吸收^[42]。研究证明,生物炭对小麦、水稻、玉米的氮素吸收量积累有一定的促进作用^[43]。张晗芝等试验显示,在玉米苗期,2.4、12 t/hm² 的生物炭用量可促进干物质的积累,然而生物炭用量为 48 t/hm² 时会抑制干物质的积累,但效果都未达统计显著水平^[28]。配施化肥对生物炭作用的发挥存在一定影响,施肥水平较低时,生物炭的施用可促进植株对氮磷钾的吸收;但当施氮量较高时,生物炭的施用则限制植株对矿质养分的吸收^[44]。

生物炭在作物的生长发育及养分吸收中的作用受诸多因素影响,其作用机理没有特别明确,多数试验都是针对短期效果进行研究,并且得出的多数为正向的结论。为了更好地发挥生物炭的作用,在研究生物炭优势方面的同时,也应关注生物炭的施用对作物产生的负面影响,从多方面控制生物炭作用的影响因素,逐步加强生物炭对农业生态系统的作用。

4 生物炭施入对污染土壤的改良和修复

4.1 生物炭对重金属污染土壤的修复与改良

重金属污染元素主要包括汞、镉、铅、铬和类金属元素砷等生物毒性明显的元素,以及有一定毒性的锌、铜、镍等。重金属不能被微生物降解,可通过食物链在动物、人体内积累而严重影响人体健康^[45]。重金属污染问题已经成为当今环境科学研究的重要内容,特别是水体、土壤重金属污染问题受到越来越多的重视。因此,重金属污染的治理技术已经成为国内外研究的难点和热点领域。生物炭具有致密的微孔结构和巨大的比表面积,吸附能力强,能吸附铅^[46-47]、铬^[48]、汞^[49]、

镉^[50-51]、铜^[52-54]、锌^[55-57]等重金属;此外,它还具有生产成本低、生态安全、无污染、可大面积推广等显著特点,这些特点使其作为一种高效廉价的吸附剂在治理水体、土壤重金属污染以及受污染环境介质的控制和修复等过程中得以应用。生物炭对重金属离子的吸附作用研究成为近年来环保工作者十分关注的科学问题^[58]。

现阶段生物炭应用在重金属污染治理的研究,主要针对铜、铅、锌、镉、铬等重金属,主要还是利用生物炭巨大的比表面积、丰富的含氧官能团的吸附能力和表面的离子交换反应。Samadi 等研究表明,由甘蔗渣制得的木炭可有效去除水溶液中 6 价铬,木树皮快速热解制得的生物炭作为吸附剂可去除水中的有毒重金属(As^{3+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+})^[59];Uchimiya 等发现,由废弃物经过低温、高温热解制得的生物炭以及蒸汽活化类炭可以固定水、土壤中的重金属(如镉、铜、镍、银)等^[60]。

另外,Houben 等利用 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液提取投加量分别为 1%、5%、10% 生物炭反应后土壤中的重金属,结果表明:在生物炭与土壤反应 1 h 后,土壤中镉、锌、铅的可滤出毒性随着生物炭投加量的增大明显降低;而且随着反应时间延长至 56 d,重金属的可滤出毒性进一步降低^[61]。Zhang 等利用小桉树、小麦谷壳制成的生物炭,以 0.5%、5.0% 的投加比例修复土壤中重金属镉;反应 3 周后, $CaCl_2$ 提取液中镉含量明显降低^[62]。Méndez 等对比了城市污水污泥制成的生物炭和原始污泥对某地中海农田土壤中重金属铜、镍、锌的修复作用,结果表明:与原始污泥相比,热解后的生物炭中重金属的可移动性和可滤出风险均降低,加入污泥制备的生物炭不仅降低了土壤中铜、镍、锌的可滤出毒性,而且生物炭处理还明显提高了沙壤土的有效水分含量、田间持水量^[63]。

Almaroai 等对比了生物炭、牛骨、蛋壳的施加对土壤中铅的生物有效性的影响,该试验利用玉米作为试验作物,种植 21 d 后,在生物炭的修复作用和盐水灌溉的条件下,玉米嫩枝中的铅浓度得到有效降低^[64]。Bian 等则利用麦秆制成的生物炭对华南地区 5 个试验点进行田间试验,研究生物炭对种植水稻的土壤中重金属镉的修复效果发现,当生物炭的投加量为 40 t/hm² 时,水稻颗粒中的镉含量降低了 20% ~ 90%,并且达到安全线以下(0.4 mg/kg)^[65]。该试验表明,生物炭是解决华南地区镉大米问题的一种极具潜力的方法。

通过以上多位学者的研究表明,由不同生物质原料制备的生物炭能有效降低土壤中重金属的可滤出毒性,而且随着反应时间的延长,重金属的可滤出毒性可以得到进一步降低。

4.2 生物炭对化肥、农药等有机污染物的影响

鉴于生物炭结构的特殊性及其物理化学特性,能够吸附有机污染物,已被应用于有机污染物污染的环境的治理。研究发现,生物炭能高效去除复合污染体系中的 PAHs(多环芳烃),对水溶液中的西维因、莠去津、扑灭通、毒死蜱等有机农药也具有有良好的吸附效果^[66-68]。热解温度是影响生物炭吸附能力的重要因素,Chen 等发现,松针生物炭能吸附水中的 4-硝基甲苯,且随着炭化温度的升高,生物炭的吸附能力增强^[69]。底泥生物炭对卡马西平的 Freundlich 吸附系数 K_f 可由 200 °C 时的 216.52 mg/kg 升至 50 °C 时的 713.18 mg/kg^[70]。同时,生物炭吸附容量还受外界条件,如 pH 值、溶液温度、初始浓度以及生物炭投加量等因素的影

响^[71-72]。此外,还有研究者对比了生物炭和活性炭对污水中活性蓝、罗丹B的吸附效果,发现生物炭的吸附效果优于活性炭^[74]。

土壤3中生物炭对污染物的强吸附活性及明显的吸附、解吸迟滞(Hysteresis)现象,改变了土壤中污染物的赋存形态,降低了土壤中污染物的生物有效性。这种作用一方面可降低土壤残留污染物的生物有效性、减弱生物修复效果变差及除草剂作用等负面影响;另一方面可降低污染物对土壤生物物的毒性、污染物对农产品的转移污染以及对地下水源的污染风险。

土壤中添加微量生物炭,对植物营养成分吸收及植物产量基本没有影响,但可降低除草剂的除草效果,并降低植物从土壤中吸收富集农药的作用,从而间接降低土壤残留农药对农产品的转移污染风险^[74-75]。随着土壤中生物炭含量增加,除草剂敌草隆对稻田稗草的杀虫效果逐渐降低^[76],残留污染物非的微生物矿化速率和可提取态[羟丙基-β-环糊精(HPCD)提取]含量均逐步降低。当土壤中添加生物炭含量超过0.5%时,利用HPCD提取对微生物矿化量之间线性关系不明显,表明当土壤中生物炭含量增加,用化学模拟提取的方法预测土壤中污染物生物有效性的可靠性降低。生物炭的存在同样能够降低沉积物中脂溶性化合物(多环芳烃和多氯联苯)的生物有效性,从而使它们在生物体内的富集量减少^[77]。有研究发现,在有机质含量相同的沉积物中,生物炭含量高时,多氯联苯的生物-沉积物累积系数(BSAF)明显低。Rust等对海底沉积物中多环芳烃在几种无脊椎动物体内的生物富集现象进行研究,发现生物炭能降低多环芳烃的生物有效性^[78]。

生物炭对土壤残留农药生物有效性的影响程度受生物炭性质及农药性质等因素影响。生物炭表面积越大、微孔性越强,对农药吸附活性越大,对农药生物有效性的影响也越强;对不同农药而言,亲水性越强,被生物炭隔离作用越弱,生物炭对其生物有效性的影响越小^[79]。有研究表明,农药在碱性条件下降解速度加快,但是少量生物炭添加到土壤中对土壤pH值增加较小^[80],而土壤中农药主要被生物炭吸附隔离,因此农药在添加生物炭的土壤中不但没有加速降解,反而延缓了降解的速率。

5 展望

现阶段国内外关于生物炭的研究表明,生物炭施入土壤具有固碳减排的作用,而且因其独特的性状,对于改善土壤理化性质、促进作物养分吸收及生长发育、修复和改良污染性土壤具有一定积极作用^[81-82]。但是目前关于生物炭的研究仍存在不足,主要表现在以下几个方面:

(1)在生物炭制备过程中,原料、温度、时间等条件不同,制备的生物炭性质不尽相同,不同领域及研究方向的研究手段也不同,对于研究结果也相对缺乏可比性。而且,我国地大物博,土壤类型及种类众多,不同类型的生物炭施入土壤后,对于土壤的理化性状方面的表现也不尽相同,因此应建立生物炭与土壤关联数据库,针对不同类型土壤、不同地表作物,有针对性地开展相关研究及数据整合,探索因地制宜的生物炭类型及施用量。

(2)目前关于生物炭的研究多集中在室内试验和小规模的田间试验,鲜有开展生物炭相关大田长期定位试验,与小型模拟试验相比,大田试验具有生物炭用量大、环境不可控、周期长等特点。在生物炭应用土壤改良及作物生长发育大规模推广之前,尚须考虑制备成本、推广方案、施用方法等因素。

(3)现阶段大多数研究主要集中在生物炭特性与制备影响因素及直接应用土壤方面,以生物炭基为核心的土壤改良剂和炭基肥相关研究较少。因此,针对以生物炭为载体的肥料及改良剂研究,以及合理量化配施是今后需要进一步研究的内容。同时,对于生物炭基的农作物品种专用肥料是今后的研究重点。

(4)生物炭对于土壤作物以及生态环境功能的研究及影响多集中在宏观层面,对于促进作物生长发育、提高产量等方面在短期内效果明显,但其内部作用机理尚须进一步研究和探索。

参考文献:

- [1] Grossman J M, O'Neill B E, Tsai S M, et al. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy [J]. *Microbial Ecology*, 2010, 60(1): 192-205.
- [2] Marris E. Putting the carbon back: black is the new green [J]. *Nature*, 2006, 442(713): 624-626.
- [3] Özçimen D, Ersoy - Meri ç boyu A. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(6): 1319-1324.
- [4] Sanchez M E, Lindao E, Margaleff D, et al. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-fuels and biochar soil management [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1/2): 142-144.
- [5] Lehmann J, Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [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] Lua A C, Yang T. Effects of vacuum pyrolysis conditions on the characteristics of activated carbons derived from pistachio-nut shells [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 276(2): 364-372.
- [8] Gundale M J, Deluca T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1/2/3): 86-93.
- [9] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(8): 629-634.
- [10] Cao X, Harris W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [11] Lehmann J, da Silva J P Jr., Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [12] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. *Transactions*

- of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51(6):2061–2069.
- [13] Sadaka S, Boateng A A. Pyrolysis and bio-oil [M]. Cooperative Extension Service, University of Arkansas, US Department of Agriculture and County Governments Cooperating, 2009:1–6.
- [14] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3):777–793.
- [15] Balwant S, Bhupinderpal S, Annetel C. Characterization and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7):516–525.
- [16] Kishimoto S, Sugiura G. Charcoal as a soil conditioner [J]. *Int Achieve Future*, 1985(5):12–23.
- [17] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [18] Yip K V, Tian F J, Hayashi J I, et al. Effect of alkali and alkaline earth metallic species on biochar reactivity and syngas compositions during steam gasification [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 24(1):173–181.
- [19] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos; 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crop Research*, 2009, 111(1/2):81–84.
- [20] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219–230.
- [21] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [22] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 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*, 2011, 37(4):439–445.
- [23] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11):2930–2934.
- [24] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5):472–476.
- [25] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(11):395–419.
- [26] Rondon M A, Molina D, Hurtado M, et al. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emission through biochar amendments to unfertile tropical soils [C]. Philadelphia, USA: 18th World Congress of Soil Science, 2006:9–15.
- [27] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3):425–428.
- [28] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11):2713–2717.
- [29] 周桂玉, 窦森, 刘世杰, 等. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10):2075–2080.
- [30] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain Soil [J]. *Soil Science*, 2009, 174(2):105–112.
- [31] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向 [J]. *土壤*, 2011, 43(6):857–861.
- [32] 王震宇, 徐振华, 郑浩, 等. 花生壳生物炭对中国北方典型果园酸化土壤改性研究 [J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2013, 43(8):86–91.
- [33] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5):1719–1730.
- [34] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 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*, 2011, 37(4):439–445.
- [35] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2):117–128.
- [36] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2):205–212.
- [37] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2007, 43(6):699–708.
- [38] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39(8):1445–1451.
- [39] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8):1348–1352.
- [40] 黄超, 刘丽君, 章明奎. 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*, 2011, 37(4):439–445.
- [41] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15):16–25.
- [42] 马莉, 侯振安, 吕宁, 等. 生物炭对小麦生长和氮素平衡的影响 [J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(4):589–594.
- [43] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3):288–293.
- [44] 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 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*, 2011, 30(10):1946–1952.
- [45] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3):409–417.
- [46] Lu H, Zhang W, Yang Y, et al. Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar [J]. *Water Research*, 2012, 46(3):854–862.
- [47] Jiang T Y, Jiang J, Xu R K, et al. Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(3):249–256.
- [48] 丁文川, 田秀美, 王定勇, 等. 腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33(11):3847–3853.
- [49] Kong H, He J, Gao Y, et al. Cosorption of phenanthrene and mercury (II) from aqueous solution by soybean stalk-based biochar [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, 59(22):12116–12123.
- [50] Jin H P, Choppala G K, Bolan N S, et al. Biochar reduces the bio-availability and pytoxicity of heavy metals [J]. *Plant & Soil*, 2011, 348(1):439–451.

- [51] Cao X D, Ma L, Gao B, et al. Dairy - Manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43 (9) : 3285 - 3291.
- [52] Uchimiya M, Klasson K T, Wartelle L H, et al. Influence of soil properties on heavy metals sequestration by biochar amendment: I. Copper sorption isotherms and their release of cations [J]. Chemosphere, 2011, 82 (10) : 1431 - 1437.
- [53] Chen X, Chen G, Chen L, et al. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (19) : 8877 - 8884.
- [54] Tong X J, Li J Y, Yuan J H, et al. Adsorption of Cu (II) by biochars generated from three crop straws [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172 (2/3) : 828 - 834.
- [55] Trakal L, Komárek M, Száková J, et al. Biochar application to metal - contaminated soil; evaluating of Cd, Cu, Pb and Zn sorption behavior using single - and multi - element sorption experiment [J]. Plant Soil & Environment, 2011, 57 (8) : 372 - 380.
- [56] Kolodyńska D, Wnietrak R, Leahy J J, et al. Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 197 (29) : 295 - 305.
- [57] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar [J]. Environmental Pollution, 2011, 159 (2) : 474 - 480.
- [58] 王宁, 侯艳伟, 彭静静, 等. 生物炭吸附有机污染物的研究进展 [J]. 环境化学, 2012, 31 (3) : 287 - 295.
- [59] Samadi M T, Rahman A R, Zarrabi M, et al. Adsorption of chromium (VI) from aqueous solution by sugar beet bagasse - based activated charcoal [J]. Environmental Technology, 2009, 30 (10) : 1023 - 1029.
- [60] Uchimiya M, Lima I M, Thoma K K, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu II , Cd II , Ni II , and Pb II) by broiler litter - derived biochars in water and soil [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58 (9) : 5538 - 5544.
- [61] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH - dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar [J]. Chemosphere, 2013, 92 (11) : 1450 - 1457.
- [62] Zhang Z, Solaiman Z M, Meney K, et al. Biochars immobilize soil cadmium, but do not improve growth of emergent wetland species *Juncus subsecundus* in cadmium - contaminated soil [J]. Journal of Soils & Sediments, 2013, 13 (1) : 140 - 151.
- [63] Méndez A, Gómez A, Paz - Ferreiro J, et al. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil [J]. Chemosphere, 2012, 89 (11) : 1354 - 1359.
- [64] Almaroai Y A, Usman A A, Ahmad M, et al. Effects of biochar, cow bone, and eggshell on Pb availability to maize in contaminated soil irrigated with saline water [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71 (3) : 1289 - 1296.
- [65] Bian R J, Chen D, Liu X Y, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd - tainted rice from China: Results from a cross - site field experiment [J]. Ecological Engineering, 2013, 58 (13) : 378 - 383.
- [66] 张鹏. 生物炭对西唯因与阿特拉津环境行为的影响 [D]. 天津: 南开大学, 2013.
- [67] 程海燕. pH 和溶解性有机质影响下黑碳吸附农药行为的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [68] 余向阳, 张志勇, 张新明, 等. 黑碳对土壤中毒死蜱降解的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (5) : 1681 - 1684.
- [69] Chen B, Chen Z. Sorption of naphthalene and 1 - naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures [J]. Chemosphere, 2009, 76 (1) : 127 - 133.
- [70] 吴敏, 宁平, 李今今. 底泥制备的生物炭对卡马西平的吸附解吸研究 [J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2012, 37 (3) : 69 - 73.
- [71] 张继义, 王龙, 李金涛, 等. 小麦秸秆生物炭吸附剂对硝基苯的吸附性能 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (1) : 226 - 230.
- [72] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 等. 水稻秸秆生物炭对 Pb (II) 的吸附特性 [J]. 环境化学, 2011, 30 (11) : 1851 - 1857.
- [73] 李东, 李华军. 活性炭吸附水中罗丹明 B 的研究 [J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2008, 26 (6) : 95 - 98.
- [74] Yu X Y, Ying G G, Kookana R S. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil [J]. Chemosphere, 2009, 76 (5) : 665 - 671.
- [75] Hilber I, Wyss G S, Mäder P, et al. Influence of activated charcoal amendment to contaminated soil on dieldrin and nutrient uptake by cucumbers [J]. Environmental Pollution, 2009, 157 (8/9) : 2224 - 2230.
- [76] Yu X Y, Ying G G, Rai S K. Desorption behavior of a pesticide in soil amended with black carbon [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54 (22) : 8545 - 8550.
- [77] 杨基峰, 应光国, 赵建亮, 等. 黑碳对污染物环境地球化学过程的影响 [J]. 生态环境学报, 2008, 17 (4) : 1685 - 1689.
- [78] Rust A J, Burgess R M, McElroy A E, et al. Influence of soot carbon on the bioaccumulation of sediment - bound polycyclic aromatic hydrocarbons by marine benthic invertebrates: an interspecies comparison [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, 23 (11) : 2594 - 2603.
- [79] Yang Y, Sheng G, Huang M. Bioavailability of diuron in soil containing wheat - straw - derived char [J]. The Science of the Total Environment, 2006, 354 (2/3) : 170 - 178.
- [80] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (3) : 3488 - 3497.
- [81] 杨晓庆, 侯仔尧, 常梦婷, 等. 改良剂对 Cd 污染土壤的修复作用 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (7) : 423 - 425.
- [82] 杨晓庆, 侯仔尧, 常梦婷, 等. 生物炭对镉污染土壤的修复研究 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (6) : 335 - 337.