

生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展^①

袁金华^{1,2}, 徐仁扣^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 由于生物质炭在农业和环境中的巨大应用前景和对土壤碳的增汇减排作用, 近期成为土壤学家和环境学家研究的热点。本文综述了生物质炭对热带和亚热带地区酸性土壤的改良作用及其机制, 总结了生物质炭对土壤肥力和养分有效性及作物生长和产量的影响的研究进展, 分析了该领域未来的发展趋势, 可为酸性土壤改良和管理提供参考。

关键词: 生物质炭; 酸性土壤改良; 土壤肥力; 养分有效性

中图分类号: S156

土壤存在着各种化学和生物化学反应, 导致土体表现出不同的酸性或碱性特征。按照土壤 pH 的大小可以将酸性土壤分为: 酸性土壤(土壤 pH 介于 5.0 ~ 6.5 之间)和强酸性土壤(土壤 pH < 5.0)^[1]。酸性土壤包括砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤、灰化土和燥红土等。在热带、亚热带地区, 广泛分布着酸性红黄壤。由于这些地区高温多雨、湿热同季的特点, 土壤的风化和淋溶作用比较强烈, 铁铝氧化物明显富积, 生物物质循环非常迅速, 土壤盐基饱和度较低, pH 一般在 4.5 ~ 6.0 的范围, 不仅土壤酸度高, 而且肥力水平低。酸性土壤在世界范围内广泛分布, 对这类土壤的酸度进行合理调控, 可以更好地发挥它们在农林业生产中的重要作用。

1 土壤酸化与酸性土壤的主要障碍因子

1.1 土壤酸化

酸化伴随土壤的风化和成土过程而发生。在多雨的自然条件下, 降水量大大超过蒸发量, 土壤中的淋溶作用非常强烈, 使得土壤溶液中的盐基离子易随渗滤水向下移动, 土壤中的可溶盐基离子和交换性盐基离子减少。土壤溶液中的氢离子占据阳离子交换位, 土壤的盐基饱和度下降, 氢饱和度增加。由于土壤交换性氢不稳定, 会主动转变为交换性铝, 导致土壤酸度明显提高。土壤酸化过程中氢离子主要来源于水、碳酸和有机酸的离解, 酸性沉降及生理酸性肥料的施用是加速土壤酸化的人为质子源^[1-4]。土壤层状铝硅酸盐矿物、含铝氧化物和氢氧化物中含有大量的铝, 土

壤酸化加速土壤中含铝矿物的风化并将大量铝离子释放出来。土壤可溶性铝浓度提高, 铝对植物的毒害增加, 导致农作物减产、森林退化。

1.2 酸性土壤的主要障碍因子

植物正常生长发育有赖于良好的土壤环境, 中性土壤环境最有利于大多数植物的生长。过酸和过碱的环境不利于大多数植物的正常生长。酸性土壤中铝毒和土壤肥力低是限制作物生长的两个主要障碍因素。随着土壤酸度增加, 土壤溶液中总铝和有毒形态铝的浓度均增加, 有毒形态铝对植物根系产生伤害, 影响作物正常生长。酸性土壤遭受强烈的淋溶作用, 土壤中钾、钙和镁等盐基性养分含量低, 酸化还使土壤阳离子交换量 (CEC) 减小, 土壤的保肥能力下降。酸化使红壤对磷酸盐的吸附和固定能力增加, 导致磷的植物有效性下降。

2 酸性土壤的传统改良方法

施用石灰和石灰石粉是改良土壤酸度的传统有效方法, 石灰能有效中和土壤酸度并提高养分元素钙含量, 一般对 pH 低于 5.5 的酸性土壤, 施用石灰均可取得明显的改土和作物增产效果^[5]。廉价、易得的工业副产品也可用于酸性土壤改良, 如施用磷酸工业的废弃物磷石膏、氨碱法制备纯碱过程产生的碱渣及炼钢过程中产生的钢渣均能取得一定的改良效果^[6]。近期的研究表明, 农作物秸秆等农业废弃物也可改良土壤酸度^[7-15], 但是这种改良作用取决于作物秸秆的种类及土壤性质^[9,13-14]。直接用农业废弃物改良土壤酸度的一

①基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAD6B02)资助。

* 通讯作者 (rkxu@issas.ac.cn)

作者简介: 袁金华 (1982—), 女, 河南睢县人, 博士研究生, 主要从事生物质炭的性质及其对酸性土壤的改良研究。E-mail: xiaocircle@163.com

个不足之处是,添加到土壤中的植物物料易被微生物分解。如能将农作物秸秆经过改性和处理制备成性质相对稳定的改良剂,则意义重大。

3 生物质炭

在厌氧或者绝氧的条件下对生物质材料进行热解,可以生成 CO_2 、可燃性气体、挥发性油类和焦油类物质,还有一种含碳丰富的固体物质,一般称之为生物质炭^[16]。用来制备生物质炭的生物质材料包括各种天然有机物质及其衍生物,如草本类的物质、木材废弃物、农业废弃物、城市固体垃圾、畜禽粪便、水生植物和藻类等^[17]。将农业废弃物通过热解过程转变为生物质炭可以减少农业废弃物对环境的污染,还可以以可再生能源替代不可再生能源^[18-20]。生物质炭通过碳负效应可以近乎永久性地将大气中的碳固定起来,添加到土壤中的生物质炭不易被微生物分解,被认为是一种对陆地生态系统中的 CO_2 起到长期的碳汇作用的新方法^[21-22]。因此,近几年来生物质炭被学术界、企业和政府部门广泛关注^[23]。将生物质炭用作土壤改良剂,可以对土壤产生很多有益的作用,它可以改善土壤的物理性质、增强土壤的保水能力、促进土壤微生物种群的发展和增强微生物的活性、减少土壤养分的淋失、促进养分的循环,并且可以增加土壤有机碳的含量,从而促进植物的生长^[24-27]。

生物质炭表面带有负电荷,具有较高的 CEC,可以提高土壤对养分离子钙、钾、镁和 NH_4^+ 等的吸持能力,提高土壤的肥力^[28-29]。

生物质炭的另一个重要特征是具有较高的 pH,一般呈碱性,因此可以用于酸性土壤的改良。由于生物质炭比较稳定,用生物质炭中和土壤酸度可以克服直接施用农作物秸秆存在的不足。

4 生物质炭对酸性土壤的改良

4.1 生物质炭对酸性土壤的酸度改良作用及其机制

生物质炭具有较高的 pH,添加到酸性土壤中可以提高土壤的 pH,降低土壤酸度^[30-31]。采用厌氧热解的方法于 350 °C 下由油菜秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、稻草、稻糠、大豆秸秆、花生秸秆、蚕豆秸秆和绿豆秸秆等常见农作物残体制备了 9 种生物质炭,按 10 g/kg 的比例加入到初始 pH4.3 的红壤中进行培养,发现所有生物质炭均能不同程度提高土壤的 pH,60 天培养实验结束时,油菜秸秆炭、稻草炭、玉米秸秆炭、小麦秸秆炭和稻糠炭分别使红壤提高了 0.66、0.51、0.46、0.42 和 0.18 个 pH 单位;绿豆秸秆炭、花生秸秆

炭、大豆秸秆炭和蚕豆秸秆炭分别使红壤提高了 1.05、0.95、0.89 和 0.59 个 pH 单位^[32]。豆科物料制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果要优于非豆科物料制备的生物质炭^[32]。用酸碱滴定方法测定了生物质炭的总碱含量,并将不同生物质炭对红壤改良后的土壤 pH 分别与生物质炭的 pH 和生物质炭的总碱含量进行相关分析,结果表明生物质炭改良后的土壤 pH 和生物质炭的总碱含量呈直线相关,相关系数 (R^2) 为 0.95^[32]。因此,生物质炭的总碱含量是决定其对土壤酸度中和效果的主要因素,由豆科植物物料制备的生物质炭的总碱含量高于非豆科植物物料制备的生物质炭,这是前者对酸性红壤改良效果好于后者的主要原因。

Yuan 等^[33]选择油菜秸秆、玉米秸秆、大豆秸秆和花生秸秆,分别在 300°C、500°C 和 700°C 下制备生物质炭,详细研究了生物质炭中碱性物质的存在形态,阐明了生物质炭改良酸性土壤的机制。结果表明有机官能团和碳酸盐是生物质炭中碱的主要存在形态。采用 X-射线衍射分析和 CO_2 容量法的测定结果表明,生物质炭中碳酸盐的总量和结晶态碳酸盐的含量均随其制备温度的升高而增加,碳酸盐对生物质炭总碱含量的贡献也随制备温度的升高而增加。制备温度为 300°C、500°C 和 700°C 时,油菜秸秆炭中碳酸盐对总碱量的贡献率分别为 18%、51% 和 55%;大豆秸秆炭中碳酸盐对总碱量的贡献率分别为 18%、41% 和 42%;花生秸秆炭中碳酸盐对总碱量的贡献率分别为 9%、37% 和 43%。红外光声光谱的研究结果表明,生物质炭表面含有丰富的含氧官能团,如羧基和酚羟基等,在较高 pH 下这些官能团以阴离子形态存在,它们能与酸性土壤中的 H^+ 发生缔合反应,中和土壤酸度,有机阴离子是生物质炭中碱的另一种重要形态。研究还表明,生物质炭表面含氧官能团的数量随制备温度的升高而减少,因此,有机阴离子对较低温度下制备的生物质炭的碱量有重要贡献^[33]。

4.2 生物质炭对酸性土壤交换性铝和交换性盐基含量的影响

铝毒是酸性土壤限制作物生长的最主要的因素。当土壤溶液中可溶性铝离子浓度超过一定限度时,就会对作物产生毒害作用。交换性铝是酸性土壤中的主要活性形态铝,向土壤中添加生物质炭显著降低了土壤交换态铝,减少铝对植物的毒害作用^[28,34-35]。生物质炭对酸性土壤中交换性铝的影响主要是通过改变土壤的 pH 值实现的。随着土壤 pH 提高,交换性铝发生水解转化成羟基铝并部分形成铝的氢氧化物或氧化物沉淀。生物质炭表面含有丰富的含氧官能团,这些有

机官能团能与铝形成稳定的配(螯)合物, 使土壤交换性铝转化为活性较低的有机络合态铝。

生物质炭含有一定量的钙、镁和钾等盐基阳离子, 当将生物质炭施入土壤中, 这些盐基阳离子与土壤交换性铝发生交换反应, 使土壤交换性铝含量减少, 交换性盐基阳离子含量增加, 使土壤盐基性养分含量增加, 提高土壤的肥力水平, 特别是交换性钙和钾增加显著, 因为生物质炭中钙和钾含量较高。土壤钙和镁含量的增加还能有效缓解铝对植物的毒害作用^[30], 这是因为钙和镁能够与铝离子竞争植物根表的吸附位, 减少根表铝离子的数量。

4.3 生物质炭提高酸性土壤肥力的机制

热带和亚热带地区的酸性土壤由于有机质含量和土壤矿物的 CEC 较低, 所以肥力水平低, 不利于农业的可持续发展^[36]。热带地区丰富的降雨加剧营养元素的淋失, 但热带亚马逊黑土中营养元素的淋失量很低, 这使人们认识到生物质炭可以提高热带土壤对营养元素的保持能力^[37]。近期生物质炭在热带地区土壤上的应用进一步证明, 它能增强土壤的肥力, 减少土壤养分的淋失^[31,38]。作物秸秆等农业有机废弃物中含有一定量的养分元素, 有机物料在热解制备成生物质炭的过程中原物料中的营养元素在生物质炭中得到浓缩和富集, 因此生物质炭含有丰富的营养元素, 施用生物质炭可以提高土壤的肥力水平^[39-42]。生物质炭中养分的含量与其来源物料中元素的含量呈直线相关^[43], 说明物料的化学组成对生物质炭的养分含量有重要影响, 因此可以筛选养分含量较高的有机物料制备高效生物质炭改良剂。生物质炭表面含有丰富的含氧官能团如羧基和酚羟基等, 在较高 pH 下这些有机官能团以阴离子形态存在, 使生物质炭表面带有大量负电荷。研究表明, 生物质炭的 CEC 约为酸性土壤的 10 ~ 20 倍, 因此施用生物质炭可以提高热带、亚热带地区土壤的 CEC, 特别对 CEC 很低的酸性土壤效果更明显^[33]。施用生物质炭提高土壤 CEC 是其提高土壤保肥能力的一个重要原因。此外, 生物质炭具有较大的表面积和高度的孔隙结构, 增强其对养分离子的保持, 生物质炭还可增加土壤的保水能力, 这也在一定程度上减少了养分的淋失^[44-46]。

4.4 生物质炭对酸性土壤中氮的影响

热带和亚热带地区多雨的气候条件导致土壤氮素容易淋失^[47-48], 添加生物质炭可以增加土壤对氮素的保持能力^[49]。在亚马逊河中部地区建立了田间试验小区, 研究了木炭对土壤氮素保持能力的影响。将 ^{15}N 标记的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\text{N } 27.5 \text{ kg/hm}^2$) 施入到土壤中, 连续

两季种植高粱, 两季作物收获后, 添加木炭的土壤中的氮保留量显著地高于只添加化肥的^[50]。生物质炭主要通过以下途径增加土壤对氮的保持能力: ①增加土壤对铵根离子的吸附和保持能力, 生物质炭表面丰富的含氧官能团、大量的负电荷、多孔结构和巨大的比表面使其对铵有很强的吸附能力, 减少氮素损失^[51]; ②土壤对铵吸持能力的增加, 降低了土壤硝化反应的速率; ③生物质炭增加土壤的保水能力, 减少硝态氮的淋失; ④生物质炭的多孔结构为微生物提供了活动场所, 有利于固氮微生物群落的发展, 增强了土壤生物固氮能力^[52-53]。

生物质炭增加土壤对氮素的保持能力, 提高土壤氮素的有效性, 这不仅减少氮的淋失^[39,50,54], 减少化肥的施用量, 同时也减少氮素淋失对水环境的污染^[21], 减少了 N_2O 等温室气体的排放^[35,55]。

4.5 生物质炭对酸性土壤中磷的影响

磷是高度风化的热带土壤生产力的一个主要的限制元素。酸性土壤上植物缺磷的直接原因是土壤中磷的生物有效性低。土壤中的磷易被固定, 移动性差。酸性土壤中铁、铝活性高, 容易与磷形成难溶性的铁磷和铝磷, 甚至有效性更低的闭蓄态磷。因此, 虽然热带酸性土壤总磷含量不低, 但磷的有效性不高。

土壤 pH 影响铁、铝对磷的固定, 低 pH 下磷更容易发生固定。生物质炭一般呈碱性, 能提高土壤的 pH 值, 因此, 施用生物质炭可以降低酸性土壤对磷的固定量^[56]。生物质炭对钙、铝等阳离子的吸附作用也避免了这些阳离子与磷产生沉淀, 增加了土壤中可提取态磷的量^[40,57]。此外, 生物质炭本身的磷含量也较高, 这些磷可以被作物利用, 施用生物质炭可以直接增加土壤磷素水平, 提高作物的产量^[58]。

4.6 生物质炭对酸性土壤中其他营养元素的影响

生物质炭对土壤中微量元素的形态也有影响, 文献已报道生物质炭对钼(Mo)和硼(B)的影响。与磷相似, 土壤中的钼主要以钼酸根形态存在, 酸性条件下钼酸根易被酸性土壤吸附和固定, 因此钼的有效性也不高, 酸性土壤上的许多作物易出现缺钼症状。施用生物质炭提高了酸性土壤的 pH, 增加了钼的有效性, 酸性土壤中硼也有类似现象^[39,42,49-50,53,59]。生物质炭本身含有一定量的钼和硼, 可以提高土壤有效态钼和硼的水平, 如添加生物质炭增加了菜豆的生物固氮能力^[53], 主要原因就是施入生物质炭提高了土壤中硼和钼的有效性和可利用性。

4.7 生物质炭对酸性土壤上作物生长和产量的影响

土壤中添加生物质炭可以促进植物的生长, 并能

显著提高作物的产量^[60-63]。根据施入的生物质炭种类和数量的不同,作物的增产幅度在 20% ~ 220% 之间。对哥伦比亚一块高度风化的土壤进行为期 4 年(2003—2006年)的实验,考察了木炭对玉米产量和养分的影响。施入水平为 20 t/hm²的小区,玉米产量在 2004年、2005 年和 2006 年分别比不施木炭的对照增加了 28%、30% 和 140%。木炭中有效钙和镁的含量较高,施用木炭使土壤有效态钙和镁的含量提高了 77% ~ 320%,这是促进玉米增产的主要原因^[42]。另一项研究表明,作物吸收磷、钾、钙、锌和铜的量随木炭加入水平的提高而增加^[40]。将有机肥和木炭一起施入到热带地区高度风化的酸性土壤中可以增加作物根际的养分浓度,减少养分的淋失,提高作物的产量^[28]。甜椒和西红柿无土栽培实验中,加入 1% ~ 5% 的木炭可以促进甜椒的生长、增加甜椒的生物量,同时还增加了甜椒根系的微生物群落数量。木炭促进植物生长的主要原因为:①木炭改变了植物根系周围的微生物群落,促进了有利于植物根系生长的菌群的发展;②木炭所含的化学物质,在低剂量的条件下能促进植物的生长^[64]。

5 结论与展望

生物质炭作为热带地区农业可持续发展的土壤改良剂主要有以下的优点:

(1) 生物质炭呈碱性,可以中和土壤酸度,降低铝对作物的毒害作用。生物质炭含有丰富的营养元素,可以提高酸性土壤有效养分的含量。

(2) 生物质炭可以提高土壤对养分的保持能力,改善植物的养分状况,减少养分的淋失。主要原因有以下两点:一是养分元素由于物理作用而被截留在生物质炭的孔隙中;二是生物质炭表面丰富的含氧官能团和负电荷提高了酸性土壤的 CEC 值。

(3) 生物质炭较其他改良剂稳定,对土壤理化性质的改善可以持续较长时间。这一特点也增加了土壤的固碳量,减少温室气体向大气中的排放量。

生物质炭的农业利用研究最近几年才刚刚兴起,许多问题还有待进一步的探索。目前的研究多以室内模拟和小规模的田间小区试验为主,大规模的推广还需要解决生物质炭的大批量、廉价的制备方法问题。生物质炭对植物养分状况和产量的影响研究中,目前涉及草地、灌木和森林的研究比较少,并且研究对象一般选择热带地区的农作物^[64],生物质炭对其他地区土壤的影响效果的研究还比较少,有待进一步的开展。生物质炭对土壤和农业生态系统环境功能影响

的机理目前还不完全清楚。短期实验过程中生物质炭可能显现出促进作物生长、改善土壤养分和降低 N₂O 排放的功能,但是生物质炭呈现这些益处的机理还不甚清楚。生物质炭在制备过程中可能产生一定量的有毒物质,生物质炭大规模农用的环境风险还有待评价。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171-175
- [2] Vogt RD, Seip HM, Larssen T, Zhao DW, Xiang RJ, Xiao JS, Luo JH, Zhao Y. Potential acidifying capacity of deposition-experiences from regions with high NH₄⁺ and dry deposition in China. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(1): 394-404
- [3] Hu ZY, Xu CK, Zhou LN, Sun BH, He YQ, Zhou J, Cao ZH. Contribution of atmospheric nitrogen compounds to N deposition in a broadleaf forest of southern China. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 360-365
- [4] Bolan NS, Hedeley MJ, White RE. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant and Soil*, 1991, 134(1): 53-63
- [5] Adams F. Soil Acidity and Liming (2nd Edition). *Agronomy 12. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA*. 1984, Madison, WI
- [6] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理. *安徽农学通报*, 2007, 13(23): 48-51
- [7] Noble AD, Zenneck I, Randall PJ. Leaf litter ash alkalinity and neutralization of soil acidity. *Plant and Soil*, 1996, 179(2): 293-302
- [8] Yan F, Schubert S, Mengel K. Soil pH changes during legume growth and application of plant material. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(3): 236-242
- [9] Pocknee S, Sumner ME. Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 86-92
- [10] Tang C, Sparling GP, McLay CDA, Raphael C. Effect of short-term legume residue decomposition on soil acidity. *Australian Journal of Soil Research*, 1999, 37: 561-573
- [11] Xu RK, Coventry DR. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil. *Plant and Soil*, 2003, 250(1): 113-119
- [12] Xu JM, Tang C, Chen ZL. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 544-552

- [13] Wang N, Li JY, Xu RK. Use of various agricultural by-products to study the pH effects in an acid tea garden soil. *Soil Use and Management*, 2009, 25(2): 128–132
- [14] Wang N, Xu RK, Li JY. Amelioration of an acid Ultisol by agricultural by-products. *Land Degradation & Development*, 2011, 22(6): 513–518
- [15] Mao J, Xu RK, Li JY, Li XH. Dicyandiamide enhances liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1 632–1 635
- [16] Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47–82
- [17] Özçimen D, Ersoy-Meriçboyu A. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy*, 2010, 35(6): 1 319–1 324
- [18] Demirbas A, Pehlivan E, Altun T. Potential evolution of Turkish agricultural residues as bio-gas, bio-char and bio-oil sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(5): 613–620
- [19] Laird DA. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 178–181
- [20] McHenry MP. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1-3): 1–7
- [21] Lehmann J. Bio-energy in the black. *Ecological Applications*, 2007, 5(7): 381–387
- [22] Kuzakov Y, Subbotina I, Chen HQ, Bogomolova I, Xu XL. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 210–219
- [23] Glaser B, Parr M, Braun C, Kopol G. Biochar is carbon negative. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 2–2
- [24] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature*, 2006, 442: 624–626
- [25] Sánchez ME, Lindao E, Margaleff D, Martínez O, Morán A. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: Production and characterization of bio-fuels and biochar soil management. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 85(1/2): 142–144
- [26] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1 301–1 310
- [27] Gaskin JW, Speir RA, Harris K, Das KC, Lee RD, Morris LA, Fisher DS. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2): 623–633
- [28] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, Macêdo JLVD, Blum WEH, Zech W. Long-term effects of manure, charcoal, and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 275–290
- [29] Inyang M, Gao B, Pullammanappallil P, Ding WC, Zimmerman AR. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 2010, 101(22): 8 868–8 872
- [30] Chan KY, van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(8): 629–634
- [31] Novak JM, Busscher WJ, Laird DL, Ahmedna M, Watts DW, Niandou MAS. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 2009, 174(2): 105–112
- [32] Yuan JH, Xu RK. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 2011, 27(1): 110–115
- [33] Yuan JH, Xu RK, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3 488–3 497
- [34] Sierra J, Noel C, Dufour L, Ozier-Lafontaine H, Welcker C, Desfontaines L. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity. *Plant and Soil*, 2003, 252(2): 215–226
- [35] Rebecca R. Rethinking biochar. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 5 932–5 933
- [36] Glaser B, Guggenberger G, Zech W, de Lourdes Ruivo M. Soil organic matter stability in Amazonian dark earths // Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI. Amazonian dark earths origin properties management. Dordrecht: Kluwer Academic, 2003: 141–158
- [37] Lehmann J, Kern D, German L, McCann J, Martins GC, Moreira L. Soil fertility and production potential // Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI. Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management. Dordrecht: Kluwer Academic, 2003: 105–124
- [38] Laird D, Fleming P, Wang BQ, Horton R, Karlen D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436–442
- [39] Lehmann J, da Silva Jr JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol

- and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357
- [40] Gundale MJ, DeLuca TH. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1/3): 86–93
- [41] Major J, Lehmann J, Rondon M, Goodale C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1 366–1 379
- [42] Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117–128
- [43] Alexis MA, Rasse DP, Rumpel C, Bardoux G, Pechot N, Schmalzer P, Drake B, Mariotti A. Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem. *Biogeochemistry*, 2007, 82(2): 201–216
- [44] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizão FJ, Petersen J, Neves EG. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1 719–1 730
- [45] Chan KY, Xu Z. Biochar: nutrient properties and their enhancement // Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. London: Earthscan, 2009: 67–84
- [46] Lin YJ, Hwang GS. Charcoal from biomass residues of a *Cryptomeria* plantation and analysis of its carbon fixation benefit in Taiwan. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(9): 1 289–1 294
- [47] Giardina CP, Sanford RL, Dockersmith IC, Jaramillo VJ. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant and Soil*, 2000, 220(1/2): 247–260
- [48] Renck A, Lehmann J. Rapid water flow and transport of inorganic and organic nitrogen in a highly aggregated tropical soil. *Soil Science*, 2004, 169(5): 330–341
- [49] Lehmann J, da Silva Jr J P, Rondon M, Cravo MdS, Greenwood J, Nehls T, Steiner C, Glaser B. Slash and char-a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon? 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, The International Union of Soil Sciences, 2002: 1–12
- [50] Steiner C, Glaser B, Teixeira WG, Lehmann J, Blum WEH, Zech W. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 893–899
- [51] Clough TJ, Condron LM. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1 218–1 223
- [52] Lehmann J, Rondon M. Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics // Uphoff N, Ball AS, Palm C, Fernandes E, Pretty J, Herren H, Sanchez P, Husson O, Sanginga N, Laing M, Thies J. *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. Boca Raton: CRC, 2006: 517–530
- [53] Rondon MA, Lehmann J, Ramirez J, Hurtado M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 699–708
- [54] Steiner C, Das KC, Melear N, Lakly D. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1 236–1 242
- [55] Berglund LM, DeLuca TH, Zackrisson TH. Activated carbon amendments of soil alters nitrification rates in Scots pine forests. *Soil Biology Biochemistry*, 2004, 36(12): 2 067–2 073
- [56] DeLuca TH, MacKenzie MD, Gundale MJ. Biochar effects on soil nutrient transformation // Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. London: Earthscan, 2009: 251–280
- [57] Gundale MJ, DeLuca TH. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 303–311
- [58] Chan KY, van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(5): 437–444
- [59] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal- a review. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230
- [60] Woods WI. Development of anthrosol research // Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI. *Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2003: 3–14
- [61] Yamato M, Okimori Y, Wibowo IF, Anshori S, Ogawa M. Effects of the application of charred bark in *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4): 489–495
- [62] Kimetu JM, Lehmann J, Ngoze SO, Mugendi DN, Kinyangi JM,

- Riha S, Verchot L, Recha JW, Pell AN. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems*, 2008, 11(5): 726–739
- [63] Blackwell P, Riethmuller G, Collins M. Biochar application for soil // Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. London: Earthscan, 2009: 207–226
- [64] Graber ER, Harel YM, Kolton M, Cytryn E, Silber A, David DR, Tsechansky L, Borenshtein M, Elad Y. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2): 481–496

Research Progress of Amelioration Effects of Biochars on Acid Soils

YUAN Jin-hua^{1,2}, XU Ren-kou¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China;

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: The research on biochar has become a hot topic in recent time due to its potential application in agriculture, environmental protection and carbon abatement by the increasing of carbon sink in soils. The amelioration effects and mechanisms of biochars on acid soils in tropical and subtropical regions, the effects of biochar incorporation on soil fertility, nutrient availability and the growth and yields of crops are summarized in this article. The development trends in this area in the future are analyzed. This article is hoped useful for the amelioration and management of acid soils in tropical and subtropical regions.

Key words: Biochar, Amelioration of acid soil, Soil fertility, Nutrient availability