



生物炭对土壤中氮磷有效性影响的研究进展

徐刚^①, 张友^{①②}, 武玉^{①②}, 邵宏波^①, 秦松^①

中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003;

中国科学院大学, 北京 100049

E-mail: gxu@yic.ac.cn

收稿日期: 2016-02-12; 接受日期: 2016-04-11; 网络版发表日期: 2016-08-26

国家自然科学基金(批准号: 41573120, 41001137)和中国科学院烟台海岸带研究所“一三五”发展规划(批准号: Y254021031)资助

摘要 利用生物炭在贫瘠的土壤上培育出肥沃的“黑土”正成为土壤学家研究的热点. 氮、磷等大量养分是衡量土壤肥力高低的重要指标, 生物炭对其有效性影响表现出极大的复杂性. 不同研究得出的结论不尽相同, 关键是缺乏对其机制的深入研究. 由于氮和磷的不合理利用还可能造成非点源污染而带来环境风险, 再加之生物炭施用的不可逆性, 必须确保生物炭在任何情况下都不会对土壤和环境带来不利的影响. 为此, 本文综述了生物炭添加对氮肥和磷肥在土壤-植物系统迁移转化过程中的作用, 重点讨论了不同生物炭处理方式对土壤磷素吸附解吸和形态转化的影响, 生物炭对土壤氮素转化的关键过程(矿化作用、硝化作用和固持作用)的影响, 以及生物炭 C/N 比值对土壤氮素转化的影响, 同时指出了目前研究存在的不足和需要加强的方面, 从而为生物炭的应用和推广提供思路.

关键词 生物炭, 养分有效性, 同位素示踪, 土壤, 微生物

气候变化和粮食危机是人类社会面临的共同挑战. 生物炭作为一类新型环境功能材料, 其在温室气体减排和土壤改良等方面的应用引起了广泛关注. 由于生物炭所含碳素为惰性碳, 土壤中添加生物炭可形成碳汇并降低其他温室气体排放, 被认为是应对全球气候变化的革命性措施^[1,2]. 更为重要的是, 通过生物炭改良可以提高土壤肥力并增加作物的产量^[3,4], 生物炭尤其适合贫瘠或退化土壤改良和再利用^[5]. 因此, 生物炭技术能解决制约人类社会可持续发展的几个关键问题, 被称为“一石多鸟”的技术.

氮和磷是作物所必需的大量养分元素, 因此生物炭对其转化和有效性影响自然成为研究重点^[6,7]. 受生物炭类型和土壤类型的影响, 生物炭对土壤氮和磷的作用表现出极大的复杂性: 不同研究得出不同甚至相反的结论. 关键是缺乏对其机制的深入研究, 很多机制处于推测阶段^[3,8]. 由于氮和磷的不合理利用还可能造成非点源污染, 从而带来环境风险. 再加之生物炭施用的不可逆性, 必须确保生物炭在任何情况下都不会对土壤和环境带来不利的影响.

有研究表明, 施用生物炭可以明显提高土壤有

引用格式: 徐刚, 张友, 武玉, 等. 生物炭对土壤中氮磷有效性影响的研究进展. 中国科学: 生命科学, 2016, 46: 1085-1090
Xu G, Zhang Y, Wu Y, et al. Effects of biochar application on nitrogen and phosphorus availability in soils: a review. *Sci Sin Vitae*, 2016, 46: 1085-1090, doi: 10.1360/N052016-00062

效磷含量^[9], 而对土壤氮含量影响较复杂: 生物炭可以增加、降低或无影响^[3]. 需要指出是, 有效性养分(available nutrient)含量增加不一定意味着养分有效性(nutrient availability)得到了提高. 养分有效性是指土壤中养分能被植物直接、及时吸收可能性的大小. 生物炭本身含有的养分元素(尤其是磷)只是增加了土壤中有效性养分含量, 而不是狭义上提高了土壤养分的有效性.

生物炭促进了地上生物量和作物产量的提高, 因此单位土地面积氮和磷的利用率提高了, 但是单位作物干物质吸收的氮和磷含量及土壤无机氮含量并没有明显增加, 有些研究结果甚至出现降低的现象. 例如, Steiner 等人^[10]研究表明, 生物炭可促进生物量积累, 导致吸收肥料的总量增加, 但是单位干物质吸收肥料量并没有增加. Zhang 等人^[11]定位实验表明, 生物炭没有显著改变作物产量、叶片氮含量及土壤氨氮和硝氮含量. 这些研究说明, 生物炭可以提高肥料表观利用率, 但对肥料实际利用率有何影响还有待进一步研究. 生物炭和氮磷肥料都能提高土壤肥力和作物产量, 但是二者联合所取得的效果低于预期值, 即生物炭和氮磷肥料缺乏协同增效机制^[12], 说明生物炭和氮磷肥料之间存在相互作用, 由于生物炭对土壤氮和磷反应机制差别较大, 以下将分别论述.

1 生物炭对氮素有效性影响机制和存在的问题

生物炭是有机物料在完全或者部分缺氧条件下, 经过高温热裂解(通常 <700)产生的一类难溶的、稳定的、高度芳香化和富含碳素的固态有机物质. 有机物料高温热解, 所含氮凝聚形成杂环氮结构, 不能直接用于植物生长. 尽管某些生物炭(如粪肥)总氮含量很高, 达 64 g/kg, 但是其矿质氮(氨氮和硝氮)含量甚微, 同土壤中矿质氮相比可以忽略不计^[13]. 因此从供氮角度来讲, 生物炭主要能提高土壤有机氮含量, 并不能直接提供植物生长的矿质氮.

研究表明, 生物炭通过对铵态氮(NH_4^+)的吸附作用增强了氨氮的有效性. Doydora 等人^[14]研究发现, 酸性生物炭与畜禽堆肥混合施入土壤, 可降低土壤 NH_3 损失 50% 以上. 吸附实验也表明, 生物炭能吸

附土壤溶液中 NH_4^+ , 降低土壤氮素的流失和对附近水体污染风险^[15,16]. Taghizadeh-Toosi 等人^[17]通过对生物炭吸附的氮进行同位素标记发现, 生物炭吸附的氨氮是可以被植物所利用的. Yao 等人^[16]研究发现, 生物炭对 NO_3^- 的吸附能力有限.

此外, 生物炭可以影响土壤氮素转化的关键过程, 从而改变氮素的生物有效性. 例如, DeLuca 等人^[18]研究证实, 生物炭可以促进土壤硝化作用, 使得土壤硝酸根浓度增加. 在随后的研究中也证实了生物炭可以促进土壤硝化反应^[19]. Ameloot 等人^[20]研究表明, 富含灰分的生物炭(粪肥)可以促进土壤氮素净矿化作用. Zhao 等人^[21]研究表明, 生物炭可以提高酸性土壤氮素的净硝化速率, 而对碱性或中性土壤作用不明显. 这可能与碱性或中性土壤的硝化势已经很高有关. 生物炭促进硝化作用有以下 3 种可能原因: () 生物炭加入土壤能够吸附酚类化合物(能够抑制硝化作用), 从而间接地促进硝化作用^[22]; () 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^[23]; () 生物炭提高土壤中硝化细菌的活性, 促进了硝化反应的进程^[24]. 因此, 生物炭对氮转化的这些研究多测定氮素净矿化或净硝化速率, 机制也多是推测性的间接分析, 缺乏直接证据.

从生物炭对氮素转化的关键过程的影响来看, 微生物可能发挥至关重要作用. 人们普遍担心添加生物炭会引起土壤氮素的固持. 生物炭 C/N(7~400, 平均值 67)比值较高, 容易引起土壤氮固持化反应, 进而降低植物对氮的利用率. 例如, Streubel 等人^[25]研究表明, 单纯施用生物炭降低了作物产量, 作者推测微生物固氮作用降低了氮的有效性. Deenik 等人^[26]研究认为, 生物炭含有的挥发性物质可以刺激微生物活动, 从而导致土壤有效氮降低, 同时降低植物氮素吸收, 抑制作物生长, 甚至施肥也会如此. O'Toole 等人^[27]证实, 生物炭降低了叶片氮浓度, 原因可能与氮吸附或者氮微生物固持有关. 为防止氮固持造成土壤无机氮含量的降低, 生物炭一般需要与氮肥混施, 以达到最佳效果, 例如, Chan 等人^[28]对氮素匮乏土壤的研究表明, 生物炭同氮肥混施可以提高氮肥利用效率. Zhang 等人^[29]也证实, 生物炭同氮混施提高了氮肥利用效率. 但是, 目前仍无足够证据证明添加生物炭可以引起土壤的氮固持. 这是因为生物炭

主要由抗生物降解的惰性芳香有机碳构成, 这种碳很难被微生物所降解利用^[30]. 亚马逊黑土中 C/N 比远高于附近的土壤, 但是可利用的氮素却比附近土壤高^[31]. Zavalloni 等人^[32]研究表明, 生物炭并没有促进土壤微生物活动, 也没有引起氮固持现象. 相反的 Dempster 等人^[33]研究表明, 生物炭添加降低土壤微生物炭, 同时 CO₂ 释放降低以及氮矿化量降低说明有机质降解降低. Bruun 等人^[34]研究表明, 生物炭引起氮固持跟生物炭含有活性碳密切相关, 当这些活性碳分解后氮固持现象也就消失了, 即生物炭即使引起氮固持也就持续几个月的时间而已. 生物炭对氮固持的作用受培养时间影响很大. 这些相互矛盾的研究结果表明, 生物炭同氮作用存在的复杂性, 考察生物炭对土壤微生物活动影响, 除了要研究 C/N 比值外, 还需要综合考虑生物炭中碳的组成和活性. 这方面的研究对生物炭功能的发挥至关重要, 但是目前对此却知之甚少.

目前, 已有利用同位素示踪方法研究生物炭对氮转化和有效性影响的报道. 例如, Steiner 等人^[35]通过田间实验, 以 ¹⁵N 同位素示踪研究了生物炭和堆肥对土壤氮保留和利用效率的影响, 结果表明, 生物炭添加有利于氮素在土壤中保留, 同时生物量的提高也促进了氮素的利用效率. Xie 等人^[36]通过田间微区实验表明, 生物炭的加入降低了氮素的有效性. de la Rosa 和 Knicker^[37]制备了 ¹⁵N 富集的生物炭, 同位素标记显示 10% 富集同位素转移到植物中, 说明生物炭含有的氮素经过转化可以被作物所利用. Cheng 等人^[38]通过短期(14 天)氮同位素稀释法研究表明, 生物炭并没有改变土壤氮素循环, 可能与该研究添加较低用量(0.29%)的生物炭有关. Nelissen 等人^[39]利用氮同位素示踪方法研究表明, 生物炭短期培养(7 天)可提高土壤氮素的转化和有效性, 这种转化跟生物炭的活性碳密切相关. 总之, 目前的研究多侧重于氮素在土壤-植物系统中的迁移, 缺乏生物炭对氮素转化的实验数据, 很难对生物炭影响氮素有效性做出合理的解释. 此外, 目前研究多基于短期(<14 天)培养实验, 缺乏较长时间尺度的实验结果, 由于生物炭培养初期存在较强的矿化作用, 很可能会掩盖生物炭对氮素转化的实际效果, 因此无法全面而准确地评价生物炭添加后对氮素转化和有效性的影响.

2 生物炭对磷有效性影响机制和存在问题

与氮相反, 生物质中的磷在热解过程基本被保留下来, 并且绝大部分以无机磷形式存在, 有效性很高, 因此输入土壤可以直接被作物所利用. 假设生物炭含磷量为 0.5%, 有效磷含量为 30%^[40], 生物炭使用量为 20 t/hm², 经计算有效磷施入量为 30 kg/hm². 由此可见生物炭直接施磷效应不容小觑. 总之, 直接释放是生物炭增加土壤有效磷含量重要途径. 这部分磷存在极容易掩盖生物炭对磷转化和有效性的影响, 加大了研究的难度.

通过改变土壤磷的吸附和解吸是生物炭影响土壤磷有效性的重要途径. 生物炭能否直接吸附磷, 目前的研究结论并不统一. 例如, Yao 等人^[16]研究表明, 生物炭对磷无吸附能力, Hale 等人^[41]也得出了类似的研究结论, 尽管生物炭淋滤后呈现对磷的吸附. 作者认为淋滤使得生物炭的比表面积和孔隙体积显著增加, 同时空出的吸附点位增加了对磷的吸附. Chintala 等人^[42]研究却发现生物炭对磷有吸附作用, 其吸附能力的原料顺序依次是: 玉米秸秆>柳枝>松木. 值得注意的是, 在废水处理的研究中生物炭可以显著吸附磷. 但是这些生物炭一般经过了特殊处理, 如负载铁或镁^[43], 或者经过改性处理^[44]. 生物炭输入土壤后也可以影响土壤对磷的吸附和解吸. 生物炭可以通过提高土壤 pH 和阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)提高土壤磷素的有效性, 高的 pH 和 CEC 的生物炭加入土壤时, 可减少铁和铝的交换量而增加磷的活性^[24,45]. 另外, 土壤 pH 的变化也会直接影响磷的吸附和解吸^[46]. Morales 等人^[47]做了生物炭加入热带退化土壤中时对磷的吸附还有解吸, 发现生物炭的运用降低了土壤吸附磷的能力, 可能是由于生物炭含有较高浓度的可溶性磷有关. Makoto 等人^[48]认为, 森林火灾残留的生物炭可能通过丰富的孔隙吸附土壤磷素, 抑制土壤磷素流失和延长有效磷的保留时间. 研究表明, 生物炭对土壤磷吸附能力受土壤酸度影响: 生物炭加入酸性土壤中增强对磷的吸附降低了磷的有效性; 而在碱性土壤中, 磷的吸附能力降低, 从而使有效磷含量增加^[49]. 通过对吸附后土壤磷形态分析表明, 生物炭显著增加了酸性土壤钙磷含量, 因此磷吸附量增加可能跟生物炭含有大量的 Ca 和 Mg 等阳离子有关^[50]. 但是

有趣的是单独生物炭并没有表现出对磷的吸附能力, 而只是在加入酸性土壤中才表现出对磷的吸附, 据此猜测, 生物炭可能通过表面阳离子桥键作用间接吸附土壤磷素, 进而影响磷素的有效性. 阳离子桥键是提高磷素吸附减少流失提高磷肥利用效率一个重要的途径, 也是缓释磷肥的主要作用机制, 因此完全有可能运用到生物炭对磷的吸附解吸研究上. 到目前为止这方面的研究还十分有限.

生物炭处理土壤磷形态转化从另一侧面反映了生物炭对磷有效性的影响. 例如, Siebers 等人^[51]研究表明, 骨头生物炭由于含有 28% 钙, 输入土壤主要增加了土壤钙磷的含量, 并且, 培养 145 天后出现略微的降低. Farrell 等人^[52]采用一种含磷量很低(310 mg/kg)生物炭, 研究表明生物炭对土壤磷形态转化影响要远小于磷肥. 尽管关连珠等人^[53]土壤培养实验表明, 炭化玉米秸秆显著提高了土壤活性磷的含量, 但是由于炭化玉米秸秆所含总磷量高达

5.8 g/kg, 不同处理间初始磷含量不同结果很难相互比较. 原因之一就是实验采用了等碳量(不同处理施入相同含碳量的有机物料)的处理方式, 而如果改用等磷量处理可以较好地解决这一问题.

3 展望

生物炭可以减少氮和磷的损失, 但是它们在土壤中去向, 即氮和磷保留在土壤中的形态转化和有效性还缺乏深入研究. 另外生物炭本身含有氮和磷等元素, 作为一次性肥料可以促进作物的生长, 但是当这些元素耗尽时生物炭作用如何, 即生物炭对外源氮磷的影响和作用机制, 目前对这些问题还有待进一步深入. 而这些问题单纯通过测定土壤肥力和作物产量已经无法满足进一步研究的需要. 迫切需要如同位素示踪等更精准方法来揭示生物炭对土壤氮和磷的转化和作物有效性的影响.

参考文献

- 1 Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat Commun*, 2010, 1: 9
- 2 Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*, 2007, 447: 143–144
- 3 Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hips N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*, 2010, 337: 1–18
- 4 Marris E. Putting the carbon back: black is the new green. *Nature*, 2006, 442: 624–626
- 5 Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biol Fert Soils*, 2002, 35: 219–230
- 6 Xu G, Lv Y C, Sun J N, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40: 1093–1098
- 7 Lehmann J. Bio-energy in the black. *Front Ecol Environ*, 2007, 5: 381–387
- 8 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29: 68–79
- 9 Lehmann J, da Silva J P, 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. *Plant Soil*, 2003, 249: 343–357
- 10 Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*, 2007, 291: 275–290
- 11 Zhang A, Cui L, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agr Ecosyst Environ*, 2010, 139: 469–475
- 12 Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Glob Change Biol Bioenergy*, 2013, 5: 202–214
- 13 Clough T J, Condon L M, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*, 2013, 3: 275–293
- 14 Doydora S A, Cabrera M L, Das K C, et al. Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter amended with acidified biochar. *Int J Env Res Pub He*, 2011, 8: 1491–1502
- 15 Chen C, Phillips I, Condon L, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand. *Plant Soil*, 2013, 367: 301–312
- 16 Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 2012, 89: 1467–1471

- 17 Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant Soil*, 2012, 350: 57–69
- 18 DeLuca T, MacKenzie M, Gundale M, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 448–453
- 19 Ball P, MacKenzie M, DeLuca T, et al. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. *J Environ Qual*, 2010, 39: 1243–1253
- 20 Ameloot N, Sleutel S, Das K, et al. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties. *Glob Change Biol Bioenergy*, 2015, 7: 135–144
- 21 Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies. *J Soil Sediment*, 2014, 14: 471–482.
- 22 Gundale M J, DeLuca T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecol Manag*, 2006, 231: 86–93
- 23 Gundale M J, DeLuca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. *Biol Fert Soils*, 2007, 43: 303–311
- 24 DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J. *Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations*. London: Earthscan Publications Ltd., 2009. 251–270
- 25 Streubel J, Collins H, Garcia-Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Sci Soc Am J*, 2011, 75: 1402–1413
- 26 Deenik J L, McClellan T, Uehara G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Sci Soc Am J*, 2010, 74: 1259–1270
- 27 O'Toole A, Knoth de Zarruk K, Steffens M, et al. Characterization, stability, and plant effects of kiln-produced wheat straw biochar. *J Environ Qual*, 2013, 42: 429–436
- 28 Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Res*, 2007, 45: 629–634
- 29 Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crop Res*, 2012, 127: 153–160
- 30 Gaunt J L, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 4152–4158
- 31 Lehmann J. *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Berlin: Springer, 2003
- 32 Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, et al. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: a short-term study. *Appl Soil Ecol*, 2011, 50: 45–51
- 33 Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant Soil*, 2012, 354: 311–324
- 34 Bruun E W, Petersen C, Strobel B W, et al. Nitrogen and carbon leaching in repacked sandy soil with added fine particulate biochar. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, 76: 1142–1148
- 35 Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2008, 171: 893–899
- 36 Xie Z B, Xu Y P, Liu G, et al. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China. *Plant Soil*, 2013, 370: 527–540
- 37 de la Rosa J M, Knicker H. Bioavailability of N released from N-rich pyrogenic organic matter: an incubation study. *Soil Biol Biochem*, 2011, 43: 2368–2373
- 38 Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem. *Biol Fert Soils*, 2012, 48: 941–946
- 39 Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biol Biochem*, 2012, 55: 20–27
- 40 Angst T E, Sohi S P. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *Glob Change Biol Bioenergy*, 2013, 5: 221–226
- 41 Hale S E, Alling V, Martinsen V, et al. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. *Chemosphere*, 2013, 91: 1612–1619
- 42 Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 2014, 41: 626–634
- 43 Cui H J, Wang M K, Fu M L, et al. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on

- ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *J Soil Sediment*, 2011, 11: 1135–1141
- 44 Yao Y, Gao B, Chen J J, et al. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 8700–8708
- 45 Mukherjee A, Zimmerman A, Harris W, Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 2011, 163: 247–255
- 46 Parvage M M, Ulén B, Eriksson J, et al. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biol Fert Soils*, 2013, 49: 245–250
- 47 Morales M, Comerford N, Guerrini I, et al. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar-soil mixtures. *Soil Use Manage*, 2013, 29: 306–314
- 48 Makoto K, Shibata H, Kim Y, et al. Contribution of charcoal to short-term nutrient dynamics after surface fire in the humus layer of a dwarf bamboo-dominated forest. *Biol Fert Soils*, 2012, 48: 569–577
- 49 Xu G, Sun J N, Shao H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecol Eng*, 2014, 62: 54–60
- 50 Xu G, Wei L L, Sun J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? *Ecol Eng*, 2013, 52: 119–124
- 51 Siebers N, Kruse J, Leinweber P. Speciation of phosphorus and cadmium in a contaminated soil amended with bone char: sequential fractionations and XANES spectroscopy. *Water, Air, Soil Poll*, 2013, 224: 1–13
- 52 Farrell M, Macdonald L M, Butler G, et al. Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biol Fert Soils*, 2014, 50: 169–178
- 53 关连珠, 禅忠祥, 张金海. 炭化玉米秸秆对棕壤磷素组分及有效性的影响. *中国农业科学*, 2013, 46: 2050–2057

Effects of Biochar Application on Nitrogen and Phosphorus Availability in Soils: a Review

XU Gang¹, ZHANG You^{1,2}, WU Yu^{1,2}, SHAO HongBo¹ & QIN Song¹

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Remediation of barren soil with biochar to recreate fertile soil is becoming a hot research topic for soil scientists. Nitrogen and phosphorus are important plant nutrients and key indicators of the soil fertility level. However, there exists great variability about the influence of biochar on the use efficiency of these elements; different studies have arrived at different and even contrasting conclusions. The most critical investigation, which is yet to be conducted, concerns the transformation processes and mechanisms of biochar on soil nitrogen and phosphorus. As a result, the objective of this review was to (i) explore the effect of biochar application on the adsorption and desorption, and between-forms transformation of soil phosphorus; (ii) illustrate the impact of biochar addition on soil nitrogen gross transformation (such as mineralization, nitrification, and immobilization), and to study the response of nitrogen transformation to biochar C/N ratio and the various forms of carbon in soil incubation processes; and (iii) reveal the influence of biochar addition on the allocation of nitrogen and phosphorus fertilizers in the soil-plant system, and the validity of nitrogen and phosphorus use efficiency with biochar application. Through this review, we not only reveal the impact of biochar on nitrogen and phosphorus transformations but also provide crucial guidance for the application of biochar in the agricultural field.

biochar, nutrient use efficiency, isotope trace, soils, microbial biomass

doi: 10.1360/N052016-00062

1090