

生物炭及其对土壤环境的影响

韩光明¹, 蓝家祥^{1*}, 陈温福², 张涛¹, 詹先进¹, 孟军², 陈全求¹, 黄云¹, 孙世清³

(1. 湖北省农业科学院经济作物研究所/农业部长江中游棉花生物学与遗传育种重点实验室, 湖北武汉 430064; 2. 沈阳农业大学, 辽宁生物炭工程技术研究中心, 辽宁沈阳 110866; 3. 潜江市农业科学研究所, 湖北潜江 433100)

摘要 综述了生物炭的基本特性、环境效应以及生物炭对土壤理化性质、微生物数量及种群结构多样性的影响。土壤中添加生物炭可以提高其对土壤水分和养分的吸附能力, 并且增加土壤持水性和养分有效性, 延缓肥料养分的释放, 进而增加土壤保肥能力, 提高养分利用率; 生物炭的特性也为土壤微生物提供了栖息的场所和养分, 从而提高土壤微生物的数量。不同生物炭类型所提供的碳源的差别, 将会引起土壤微生物群落组成和多样性发生变化。最后, 对生物炭研究过程中需要注意的问题进行了展望。

关键词 生物炭; 土壤环境; 土壤理化性质; 土壤微生物

中图分类号 S216 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)31-10941-03

Biochar and Its Influence on Soil Environment

HAN Guang-ming¹, LAN Jia-yang^{1*}, CHEN Wen-fu² et al (1. Industrial Crops Institute of Hubei Academy of Agricultural Sciences/ Key laboratory of Cotton Biology and Breeding in the Middle Reaches of the Changjiang River (Wuhan), Ministry of Agriculture, Wuhan, Hubei 430064; 2. Liaoning Biochar Engineering & Technology Research Center, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866)

Abstract The basic characteristics and the environmental effect of biochar were summarized, as well as its effects on soil physical and chemical properties, microbial quantity and the diversity of population structure. Biochar application into soil can improve the adsorption ability of soil moisture and nutrients, increase the soil water holding capacity and nutrient availability, delay the release of nutrients, and then increase the soil preserving fertilizer ability as well as nutrient utilization efficiency. The characteristics of biochar also provide living place and nutrients for soil microorganism, so as to improve the number of soil microorganisms. The difference of carbon source provided by different biochar types will cause the changes of structure and diversity of soil microbial community. The problems that should be noticed in the process of biochar research were prospected.

Key words Biochar; Soil environment; Soil physicochemical properties; Soil microorganism

生物炭是在限氧条件下以及在低温下热解炭化得到的一种碳含量非常丰富、性质也非常稳定的物质, 如以作物秸秆、木屑、动物粪便等为原材料生产的生物炭^[1]。生物炭根据不同原生质来源分为木制炭、稻壳类炭、秸秆类炭和竹类来源的炭等^[2-3]。由于研究年代不同, 所使用炭的名称也不尽相同。为了便于评述, 将有关研究中所涉及的符合生物炭范畴的不同名称统称为生物炭。

土壤中加入生物炭后改善了有机质含量和土壤肥力, 其耐降解的特性延长了碳在土壤中的降解时间, 还有助于作物生长、土壤改良及修复污染、减少温室气体排放等作用。因此, 近年来越来越多的学者开始研究不同热裂解方式或来源于不同的生物质生产的生物炭, 并且将其运用到修复障碍性土壤、改良土壤环境、提高作物产量等方面。我国生物炭的生产资源丰富, 虽然在农业、土壤环境中应用的研究尚处于起步阶段, 但其在农业土壤环境中的应用越来越受到重视。鉴于此, 笔者就生物炭特性、环境效应及其对土壤环境的影响机理等方面进行了综述。

1 生物炭的基本特性及环境效应

1.1 生物炭的基本特性 生物炭表面多孔性特征显著, 具有大量的孔洞, 空隙大小不一, 小到纳米, 大到微米。生物炭这种孔洞结构有利于土壤微生物的生长。生物炭容重小, 吸

水、气能力强, 且带有大量的表面负电荷以及高电荷密度的特性, 能形成电磁场^[4-6], 使得生物炭具有很好的吸附特性^[7-8], 有助于植物对营养物质的吸收, 还有助于吸附土壤中重金属和有机污染物, 降低农药在土壤中的残留^[9]。在化学成分上, 生物炭除含有丰富的有机碳外, 还包括很多矿物质和无机碳酸盐类, 具有高度的芳香化、生物化学抗分解性和物理的热稳定性^[10]。由于原料、热解温度和制作工艺的差异, 生物炭在结构、比表面积、含碳量、C/N 等理化性质上表现出很好的多样性。这也使其表现出不同的环境效应^[11]。这对土壤生态系统有很好的调节作用, 如调节作物产量、改良土壤、减轻温室效应等。

1.2 生物炭的环境效应 生物炭施入土壤后将生物质固定的二氧化碳以生物炭形式固定于土壤, 可以减少 CH₄、N₂O 等温室气体的排放^[12]。生物炭对污染物有强烈的吸附作用, 能有效地去除 Cu²⁺ 等重金属离子和除草剂及农药等, 有效地降低其对土壤环境的危害^[13]。生物炭对提高土壤质量也具有一定的贡献, 能提高对土壤水分和土壤 NH₄⁺、NO₃⁻ 等离子体的吸附能力, 增加土壤持水性能和养分有效性^[14]。生物炭还可以提高土壤阳离子交换量^[6], 进而增加土壤的保肥能力, 提高肥料养分利用率^[15-17], 也可以改变土壤微生物群落结构和丰度^[18-19], 对土壤微生物的改变会影响营养循环和土壤结构, 因此对植物的生长产生间接影响。向亚马逊黑土中施入生物炭, 将增加土壤微生物种群结构多样性的变化和微生物数量^[20]。生物炭制成的缓释肥料可以延长肥料的作用时间, 提高土壤对养分的吸附能力, 减少淋溶损失^[21-22]。

基金项目 湖北省农业科学院青年基金项目(2014NKYJJ22); 湖北省农业科技创新中心项目(2011-620-007-01)。

作者简介 韩光明(1978-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 助理研究员, 博士, 从事棉花育种和生物炭对棉花连作土壤改良方面的研究。*通讯作者, 研究员, 从事棉花育种方面的研究。

收稿日期 2014-09-22

2 生物炭对土壤理化性质的影响

2.1 生物炭对土壤 pH 的影响 农业生产上每年大量化肥的施入致使盐基离子流失,土壤酸化贫瘠,进而影响作物的正常生长。生物炭中 K、Na 等灰分元素呈可溶态,添加到土壤后提高酸性土壤的盐基饱和度,从而降低土壤中交换性 H^+ 和 Al^{3+} 水平^[23],以提高土壤的 pH^[24]。诸多试验表明,施用生物炭可以提高土壤 pH^[25-26],提高土壤团聚性^[27]。大田试验表明,当以阔叶树为原质生产的生物炭 450 g/kg 施入土壤后,盐基饱和度增加了 10 倍。在不同质地的土壤,施用生物炭后土壤 pH 升高的幅度有很大差异, pH 升高幅度在黏土中比沙土和壤土中大。亚马逊河流域用生物炭处理后,其 pH 提高了 0.4 个单位^[28]。袁金华等^[29]试验表明,加入稻壳炭在不同程度增加了红壤和黄棕壤 pH。Zwieten 等^[30]研究指出,施入 10 t/hm² 生物炭可以显著增加土壤的 pH。Novak 等^[31]研究指出,高温热解的生物炭能更好地提升土壤 pH。

2.2 生物炭对土壤矿质营养的影响 生物炭在土壤中具有保持水分等作用,同时对土壤中营养元素有很好的调控作用。Glaser 等^[32]认为,生物炭表面氧化形成的羰基、酚基和醌基引起土壤阳离子交换量的增加,进而增加对阳离子的吸附。Novak 等^[23]研究发现,向土壤中添加 2% 的生物炭,67 d 后土壤的 pH、有机碳以及 Ca、K、Mn、P 含量明显升高,说明生物炭对一些特定的元素(如 Ca、K、Mn、P)具有很强的吸附性。生物炭施入土壤后吸附 NO_3^- 、 NH_4^+ ,使得氮的挥发得到减缓,进而增强土壤的保肥能力。Glaser 等^[33]发现,在氮贫瘠的土壤中加入生物炭后,短期内作物的生长率会降低,其原因是施加生物炭后,土壤中 C/N 比提高,从而限制土壤氮素的利用度。Laird 等^[21]利用温带土壤研究了不同比例生物炭添加对营养元素淋洗的影响,发现生物炭的添加比例明显影响滤出液中 N、P、Mg 和 Si 总量,随生物炭添加量的增加而显著降低。

张晗芝等^[34]研究表明,生物炭(12、48 t/hm²)能显著提高土壤全 N、有机碳含量,但对土壤全 P、有效 P、pH 没有显著影响。Zwieten 等^[30]研究表明,添加最高比例的生物炭能显著增加沙土 NO_3^- -N 含量,而降低 NH_4^+ -N 含量,增加速效磷含量和微生物活性。Taghizadeh-Toosi 等^[35]采用 ¹⁵N-同位素标记研究生物炭应用对土壤 NH_3 -N 含量的影响,发现添加生物炭能够吸附 NH_3 -N,显著减少土壤中 NH_3 的挥发。郭伟等^[14]研究表明,华北高产农田连续 3 年施用生物炭,耕层土壤中碱解氮的质量分数虽有下降,但差异不显著。Lehmann 等^[36-37]以室内培养试验为基础,但他们研究结果不同,生物炭通过阳离子交换吸附土壤中 NO_3^- 、 NH_4^+ ,增加了土壤中有效氮含量。

3 生物炭对土壤微生物数量和种群结构多样性的影响

3.1 生物炭对土壤微生物数量的影响 生物炭对土壤微生物数量的影响与生物炭的特征及土壤的基本性质有关^[38]。生物炭表面多孔结构为微生物提供栖息场所,也提高微生物结构多样性。孔隙结构小到 1 纳米,大到几十纳米,甚至数

十微米。生物炭疏松多孔的结构以及巨大的表面积能够储存水分和养分,成为微生物可栖息生活的微环境^[39-40],为特殊类群微生物的生长提供了温床,从而促进土壤营养元素的循环。Knicker^[41]指出,生物炭的高芳香烃结构易成为土壤微生物的栖息地,给土壤微生物生长提供场所和养分。这种变化还可能与土壤理化特性改善、养分有效性增加^[33,42]、生物炭自身提供养分^[11,43]等因素有关。一些研究者通过大田或室内培育试验就不同材质生物炭施用于土壤对土壤微生物数量的影响进行了研究。

Castaldi 等^[44]田间试验表明,添加木材生物炭(500 °C 热解)3、14 个月后土壤微生物量无显著变化。Dempster 等^[45]室内培养试验表明,添加不同量木材生物炭(0、5、25 t/hm², 600 °C)后,高量生物炭与对照相比显著降低了微生物量碳。匡崇婷等^[46]采用室内培育试验,研究添加生物炭对江西红壤水稻土壤有机碳矿化和微生物生物量碳的影响,发现添加 0.5% 的生物炭处理土壤微生物生物量碳含量比对照高 111.5%~250.6%,添加 1.0% 的生物炭处理土壤微生物生物量碳含量比对照高 58.9%~243.6%。Lehmann 等^[47]研究表明,新鲜生物炭施用后引起的土壤微生物响应会随着时间进行而发生变化。

土壤微生物对环境变化的响应最敏感,对生物炭施用的响应快。施用生物炭对土壤微生物的影响,与施用其他有机质对其的影响差异较大。这是因为生物炭稳定性较高,并且缺少可利用的能量和碳源^[48]。Wardle 等^[49-50]在生物炭的长期应用效应中都发现了土壤微生物量的显著提高。

土壤微生物量对生物炭的响应非常复杂,可能与生物炭来源(材料类型、热解温度和时间)、土壤肥力状况及试验时间等因素均有关系,其内在机制还需要进一步探讨。

3.2 生物炭对土壤微生物种群结构多样性的影响 土壤环境的改变包括土壤资源基础(有效碳、氮和水)、非生物因素(pH、有毒元素)的改变、不同的生境。这些均会成为影响土壤微生物的主要因素,导致微生物组分和结构的变化。土壤中的特殊功能菌如根瘤菌、硝化细菌等对生物炭的施加更敏感^[28,51-52]。Steinbeiss 等^[53]利用磷脂脂肪酸法研究生物炭施用对土壤中四类主要微生物的影响,发现来自酵母的生物炭会促进真菌的生长,而来源于葡萄糖的生物炭主要促进革兰氏阴性细菌的生长。土壤微生物群落结构和多样性的变化从另一方面反映生物炭对土壤微生物组成的影响。

近年来,一些学者利用分子生物学和生物化学技术(如 DGGE、T-RFLP 和 PLFA 等),研究微生物群落结构的变化对生物炭的响应。O'Neil 等^[18]采用 16SrRNA 技术检测亚马逊富碳土壤中微生物种群,发现应用生物炭可以提高微生物数量和细菌群落结构多样性。Pietikainen 等^[54]采用 PLFA 技术研究生物炭施用对土壤微生物群落结构的影响,认为生物炭对总体微生物量的影响不大,而对其群落结构的影响较大,主要有利于个体较小而生长速度较快的微生物的生长。Kolton 等^[55]研究发现,施用生物炭后,细菌几个不同的优势属的变化各不相同,有的属增加,有的属降低,但其变化都有

助于植物生长和抵抗病害。

4 展望

人们越来越关注生物炭在土壤中所产生的作用,却往往忽略了生物炭在生产和处理方式上对土壤和大气造成污染。因此,要搞清其污染性与生物炭类型、安全应用比例的关系以及原料特性和热解条件。另外,在生物炭生产过程中,需要仔细地对产生的大气污染物进行定性和定量分析。这也为原料的开发和热解条件的优化,进而处理这些污染物奠定良好的基础。

在一定条件下,生物炭在土壤中起着碳库的作用。然而,在集约化农业系统中并未发现生物炭长期滞留的现象。生物炭降解可能是由集约化农业措施(耕地、犁地和耙地)和重型机械的使用引起的,因而潜在地降低了其滞留时间。需要更深入的研究来阐述生物炭在不同土壤类型、不同气候条件下的载荷能力,从而使生物炭在土壤中达到最大量,而不影响土壤的功能。此外,作物产量方面的重点应放在生物炭施用于土壤中域值的研究,不能影响土壤的物理性质,比如引起 pH 升高、田间持水量下降、产生疏水作用;或影响土壤的化学性质,如向已存在盐渍化土壤中添加含盐量高的生物炭;或影响生态系统的组成,如溶解的有机 C 进入地下水。因此,土壤中生物炭的载荷能力应该根据环境条件和生物炭的品质而变化,针对特定地点(土壤、地貌、水文和植被)的环境条件而变化。

由于土壤微生物在调控生态系统和土壤功能上起着重要的作用,生物炭添加到土壤中对土壤微生物的影响也是需要引起人们高度的重视。土壤具有较高的异质性,在进行科学合理的预测前需要对土壤物理、化学性质和生物学特性进行广泛的研究,探究生物炭添加到不同气候条件下原生土壤区的作用。

参考文献

[1] 宋延静, 龚骏. 施用生物炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东大学学报:自然科学版, 2010, 26(4): 361-365.

[2] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. Mitig Adapt Strategy Global Change, 2006, 11: 395-419.

[3] 孟军, 张伟明, 王绍斌, 等. 农林废弃物炭化还田技术的发展与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4): 387-392.

[4] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.

[5] 杨放, 李心清, 王兵. 生物炭在农业增产和污染治理中的应用[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 100-107.

[6] 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: 1719-1730.

[7] SMERNIK R J, KOOKANA R S, SKJEMSTAD J O. NMR characterization of 13C-benzene sorbed to natural and prepared charcoals [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(6): 1764-1769.

[8] MIZUTA K, MASTUMOTO T, HATATE K, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal [J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 255-257.

[9] 钟哲科, 李伟成, 刘玉学, 等. 竹炭的土壤环境修复功能[J]. 中国工程科学, 2009, 28(3): 83-89.

[10] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.

[11] SINGH B P, HATTON B J, SINGH B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39: 1224-1235.

[12] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-A review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11: 403-427.

[13] CHEN B L, ZHOU D D, ZHU L Z, et al. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environment Science Technology, 2008, 42(14): 5137-5143.

[14] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物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.

[15] STEINER C, LAKLY D. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39: 1236-1242.

[16] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.

[17] 崔月峰, 曾雅琴, 陈温福. 颗粒炭及新型缓释肥对玉米的应用效应研究[J]. 辽宁农业科学, 2008(3): 5-8.

[18] ONEILL B, GROSSMAN J, TSAI M T, et al. Bacterial community composition in Brazilian anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification [J]. Microbial Ecology, 2009, 58: 23-35.

[19] GROSSMAN J, ONEILL 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: 192-205.

[20] JIN H. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils [D]. Ithaca, NY: Cornell University, 2010.

[21] LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158: 436-442.

[22] 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.

[23] NOVAK J M, LIMA I, XING B S, et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand [J]. Annals of Environmental Science, 2009, 3: 195-206.

[24] HANG B, LEHMANN J, SBLOMON D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70: 1719-1730.

[25] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review[J]. Mitig Adapt Strategy Global Change, 2006, 11: 395-419.

[26] YUAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic MUltisol [J]. Soil Use and Management, 2010, 27(1): 110-115.

[27] BRODOWSKI S, JOHN B, FLESSA H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57: 539-546.

[28] CHAN K Y, ZWIETEN V L, MESZAROS I, et al. Using poultry litter biochar as soil amendments[J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46: 437-444.

[29] 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.

[30] ZWIETEN V L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.

[31] 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.

[32] GLASER B, HAUMAIE L, GUGENBERGER G, et al. Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(4): 811-819.

[33] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with biochar-a review [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.

[34] 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.

[35] TAGHIZADEH-TOOSI A, COUGH T J, CONDRON L M, et al. Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ N₂O emissions from ruminant urine patches[J]. J Environ Qual, 2011, 40(2): 468-476.

[36] 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[J]. Plant and Soil, 2003, 249: 343-357.

[37] DING Y, LIU Y X, WU W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, 213: 47-55.

量依次增加,分别为 13.13、17.60 和 21.82 mg/kg; 粒级 0.50 ~ 1.00 mm 土壤团聚体中含量较大,为 19.58 mg/kg。可见,土壤有机质和速效磷含量主要分布在较大粒级的水稳性团聚体土壤中,并且随着粒级由小变大,二者先增大再略微减少。

3 结论与讨论

研究表明, >2.00 mm 土壤水稳性团聚体百分含量及其平均质量直径和几何平均直径在 25 年核桃林地最大,在 25 年刺槐林地、15 年刺槐林地和 10 年荒地中次之,在 1 年荒地和农地中最小。可见,相对农用地,几种人工林地和多年撂荒地土壤团聚体更加稳定,土壤吸持水分和抗侵蚀的能力更强。农地退耕后,小粒级团聚体向大粒级团聚体转化。土壤有机质含量在 25 年刺槐林地中最大,在农地最小。这主要是由于地上植物的枯枝落叶是土壤有机碳的主要来源之一,地表植物的生长状况和生物量影响土壤有机碳含量^[9]。而农地耕种、除草、施肥、收获等人为干扰频繁,导致地表植被、凋落物数量少。一方面,有机质的归还量减少;另一方面,加速土壤有机碳的分解,最终使得土壤有机质含量降低,进而影响土壤中团聚体的稳定性。可见,有机质分解加快或补充减少是导致团聚体稳定性下降和水稳性团聚体减少的主要原因^[4]。土壤速效磷含量在 25 年刺槐林地中最大,而在农地和 1 年荒地中大于 25 年核桃林地、15 年刺槐林地和 10 年荒地。这主要与农地使用磷肥有关。周纯亮等^[4]认为,不同森林类型下各层土壤水稳性团聚体的质量分数大致呈“V”字形分布,从 >5.00 mm 至 0.25 ~ 0.50 mm,团聚体粒径越小,有机碳含量越高。李娟等^[15]研究认为,随团聚体粒径的降低,各土地利用方式下团聚体活性有机碳含量呈现“W”形分布,以 2.00 ~ 1.00 mm 和 0.50 ~ 0.25 mm 团聚体最低。而研究中,粒级 <0.05 mm 的土壤团聚体中有机质和速效磷含量最

小,分别为 11.24 和 11.83 mg/kg。0.50 ~ 0.10 mm 土壤团聚体有机质含量最高,为 34.61 mg/kg。0.20 ~ 0.50 mm 土壤团聚体速效磷含量最高,为 21.82 mg/kg。可见,不同粒级团聚体对有机碳累积的影响研究所得结论不一致。这可能与土壤水稳性团聚体的测定方法及粒径分级不同有关。

参考文献

- [1] 张金波,宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境,2003,12(4):500-504.
- [2] 赵其国,孙波,张桃林. 土地质量的定义及评价方法[J]. 土壤,1997(3):113-120.
- [3] SU Y Z, LIU W J, YANG R, et al. Changes in soil aggregate, carbon, and nitrogen storages following the conversion of cropland to alfalfa forage land in the marginal oasis of Northwest China[J]. Environmental Management, 2009, 43:1061-1070.
- [4] 周纯亮,吴明. 中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 土壤,2011,43(3):406-410.
- [5] RATTAN L. Physical management of soils of the tropics; priorities for the 21 century [J]. Soil Science, 2000, 165:191-207.
- [6] MOEBIUS-CLUNEB N, VAN ES H M, LDOWU O J. Long-term soil quality degradation after a cultivation chronosequence in western Kenya[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 4:80-99.
- [7] 董莉丽,陈益娥,李晓华. 吴起县退耕还林对土壤团聚体水稳性和养分含量的影响[J]. 林业科学,2014,50(5):140-146.
- [8] 董莉丽. 渭北旱塬植被恢复对土壤有机质和水稳性团聚体含量的影响[J]. 干旱区研究,2014,31(4):709-714.
- [9] 马瑞萍,安韶山,党廷辉,等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J]. 土壤学报,2014,51(1):104-113.
- [10] 王旭刚,郝明德,张春霞,等. 王东沟小流域土壤养分变化研究[J]. 水土保持研究,2003,10(1):78-80.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [12] ZHOU H, LU Y Z, YANG Z C, et al. Influence of conservation tillage on soil aggregates features in north china plain[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(9):1099-1106.
- [13] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [14] 马祥华,焦菊英,白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕植被恢复地土壤水稳性团聚体聚集的变化特征[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3):69-74.
- [15] 李娟,廖洪凯,龙健,等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报,2013,33(7):2147-2156.
- [16] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology [M]. London: Earthscan Ltd, UK, 2009.
- [17] LEHMANN J, RILLING M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota—A review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 41:1812-1836.
- [18] WARDLE D, NILSSON M, ZACKRISSON O, et al. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. Science, 2008, 320:629.
- [19] LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2):206-213.
- [20] DELUCA T H, MACKENZIE M D, HOLBEN W E, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests [J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70:448-453.
- [21] 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 and Fertility of Soils, 2007, 43:699-708.
- [22] STEINBEISS S. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41:1301-1310.
- [23] PIETIKAINEN J, KIIKKILA O, FRITZE H, et al. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus [J]. Oikos, 2000, 89:231-242.
- [24] KOLTON M, HAREL Y M, PASTERNAK, et al. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants [J]. Applied Environment Microbiology, 2011, 77(14):4924-4930.

(上接第 10943 页)

- [38] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms [J]. Plant Soil, 2007, 300:9-20.
- [39] GHEORGHE C, MARCULESCU C, BADEA A, et al. Effect of pyrolysis conditions on biochar production from biomass [C]. // Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources. Bucharest, Romania, 2009.
- [40] KOLB S E, FERMANICH K J, DORNBUSH M, et al. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. Soil Science Society of American Journal, 2009, 73(4):1173-1181.
- [41] KNICKER H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon—A review [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(1):91-118.
- [42] 韩光明,孟军,曹婷,等. 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,2012,43(5):515-520.
- [43] 孙大荃,孟军,张伟明,等. 生物炭对棕壤大豆根际微生物的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2011(5):521-526.
- [44] CASTALDI S, RIONDINO M, BARONTI S, et al. Impact of biochar application to a mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J]. Chemosphere, 2011, 85(9):1464-1471.
- [45] 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 [J]. Plant and Soil, 2011, 354(1/2):311-324.
- [46] 匡崇婷,江春玉,李忠佩,等. 添加生物炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤,2012,44(4):570-575.