不同类型生物炭理化特性及其对土壤持水性的影响

单瑞峰，宋俊瑶，邓若男，李 珺，刘润艺，孙小银

（曲阜师范大学 地理与旅游学院 南四湖湿地生态与环境保护山东省高校重点实验室，山东 日照 276826）

摘 要：[目的] 对比分析不同原料制备的生物炭的理化性质及其对土壤持水性的影响，为选择合适的生物炭改良和修复土壤提供理论依据。[方法] 以鸡粪、浒苔及稻草为原料，分高、中、低 3 种不同温度制备生物炭，运用元素分析、盆栽培养等试验研究其特性。[结果] 稻草中 C，H 及灰分的含量较高，鸡粪中 N 含量较高，浒苔中 C 含量低，O 含量较高；而在制备的生物炭中，鸡粪基生物炭 C 和 N 含量较高，浒苔基生物 C 含量却比较低。另外，3 种类型生物炭的 H/C 摩尔比值随着热解温度的升高而逐渐降低，C/N 比随着热解温度的升高而增大。不同原料制备的生物炭 pH 值随着热解温度的升高而增大，pH 值从 6.82～8.35 升高至 9.33～10.29；3 种类型的生物炭 pH 值随着灰分含量的增大而增大，但增长速率不同，稻草基生物炭＞浒苔基生物炭＞鸡粪基生物炭。并且，随着热解温度的升高，鸡粪、浒苔及稻草基生物炭引起土壤持水性逐渐增强。[结论] 在土壤提供营养成分方面，鸡粪基生物炭显然更具优势，而且在促进土壤持水性方面，鸡粪生物炭也相对更强一些。

关键词：生物炭；理化特性；元素分析；盆栽试验；持水性

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)05-0063-06 **中图分类号**：S152.7^{+}1，S152.4^{+}5

文献参数：单瑞峰，宋俊瑶，邓若男，等. 不同类型生物炭理化特性及其对土壤持水性的影响[J]. 水土保持通报，2017，37(5)：63-68. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.011；Shan Ruifeng，Song Junyao，Deng Ruonan，et al. Physical and chemical properties of biochar produced from different materials and effect on soil water holding capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(5)：63-68. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.011

Physical and Chemical Properties of Biochar Produced from Different Materials and Effect on Soil Water Holding Capacity

SHAN Ruifeng，SONG Junyao，DENG Ruonan，LI Jun，LIU Runyi，SUN Xiaoyin

（*Key Laboratory of Wetland Ecology and Environmental Protection in Nansi Lake，College of Geography and Tourism，Qufu Normal University，Rizhao，Shandong* 276826，*China*）

Abstract：[Objective] In order to select the appropriate biochar for soil improvement and remediation，the physical and chemical properties of biochar produced from chicken manure，the enteromorpha and straw were compared，and the effect of biochar on capacity of soil water holding was also compared. [Methods] The biochars were produced at 350，500 and 650 ℃ under anoxic condition. To investigate the impact on soil and properties of biochar produced from three types of biowaste，the elements analysis and pot experiments were performed. [Results] The element contents in three types of material were obviously different. The contents of carbon，hydrogen and ash in straw were higher than those of others. However，it was found that nitrogen content was higher in chicken manure，and carbon content was lower in enteromorpha but oxygen content was higher. Carbon content and nitrogen content of biochar produced from chicken manure were higher than those of the other two feedstocks，and carbon content of enteromorpha was lower. The H/C mole ratio of

收稿日期：2017-07-14 **修回日期**：2017-08-01

资助项目：山东省中青年科学家奖励项目“生物炭改良剂对设施菜地土壤典型杀虫剂吡虫啉的影响和调控机理研究”(BS2013NY009)；国家自然科学基金项目(41501542)；山东省重点研发项目(2016GNC110017)

第一作者：单瑞峰(1978—)，女(汉族)，山东省菏泽市单县人，博士，讲师，主要从事环境化学、环境污染及修复等方面的研究。E-mail：ruifengshan@sina.com。

通讯作者：孙小银(1978—)，男(汉族)，重庆市开县人，博士，副教授，主要从事污染生态过程与生态修复方面的研究。E-mail：xiaoyinsky@sina.com。

biochar was obviously lower than that of feedstock, and it decreased with the increase of pyrolysis temperature. However, the C/N mole ratio increased slowly with the increase of pyrolysis temperature. Moreover, it was found that the pH value of biochar produced from different feedstocks increases with pyrolysis temperature. The pH values increased from 6.82～8.35 to 9.33～10.29. Furthermore, the pH values increased as ash content increased. The pH values of biochar increased variously with the increase of ash content, for the three types of biochar, the increase rate ranked: straw >enteromorpha >chicken manure. It was also found that the water holding capacity of biochar produced from three types of feedstocks gradually improved with the increase of pyrolysis temperature. [Conclusion] Biochar produced from chicken manure behaved better than others did in nutrients providing and water holding capacity.

Keywords: biochar; physical and chemical properties; element analysis; pot experiment; water holding capacity

生物炭是生物质在缺氧条件和较低温度下热解产生的高度芳构化碳质材料[1]，近年来，因其在减少温室气体排放，修复受污染土壤，固持营养元素，提高作物产量以及固废资源化利用等方面具有显著作用而备受关注[2-3]。然而，生物炭的这些生态与环境功能特性主要是由原料和制备条件决定，不同原料、制备条件下形成的生物炭，理化性质存在很大差异。生物炭的原材料来源可以分为农业秸秆残余、林业废弃物、水生植物、人类生物质废弃物及核工业生物质废弃物[2]，对比研究不同类型生物质废弃物所制成的生物炭的理化性质，以探讨适合特定土壤修复和改良的生物炭，对于生物炭的大量运用具有重要意义。

目前，有关生物炭的研究主要集中在农业秸秆残余或林业废弃物等所制取生物炭性质研究上，如许燕萍等[4]对比研究了玉米秸秆和小麦杆生物质所制备生物炭的产率、碳含量、氮含量的差异性。王煌平等[5]则对比考察了鸡粪、猪粪和牛粪3种典型畜禽粪便原料制成的生物炭的理化特性。李蜜[6]研究了典型水生植物互米花草和水葫芦为原材料制成的生物炭的碱金属浸出性及其对Cu的吸附特性。另外，由于生物炭具有高度发达的空隙结构和巨大的比表面积，其表面含有多种有机官能团，因此可以改善土壤物化特性，增加土壤的持水性[7-8]。齐瑞鹏等[9]考察了生物炭加入土壤后对水分入渗过程的影响。发现生物炭粒径、生物炭添加量对土壤的吸渗率和稳渗滤均有显著影响。说明不同类型生物基生物炭对土壤持水性的影响不同。不少研究还表明，高碳低灰分含量的植物残体与高矿物质养分含量的畜禽粪便所制备的生物炭的性质有较大的差异性，在植物生物质中，陆生植物与水生植物的组成也存在显著的差异。因此，研究不同类型生物炭的理化特性对于生物炭的应用具有重要的意义。目前，同时对比畜禽粪便、水生植物和陆生植物基生物炭的理化特性研究较少。

本文拟选取畜禽粪便鸡粪、水生植物浒苔及陆生植物稻草3种典型生物炭废弃物原料，对所制备的生物炭的性质进行对比，考察热解温度对元素组成、pH值的影响，pH值与灰分含量之间的关系，并进一步探讨生物炭的性质对土壤持水性的影响。

1 材料与方法

1.1 样品的制备

浒苔样品采自日照市太公岛近岸海域，稻草取自日照市周边地区农田，鸡粪取自日照市近郊养殖场。浒苔收集后经自来水多次冲洗以滤去沙粒，然后用去离子水冲洗干净。稻草用去离子水冲洗干净。洗净的样品转入烘箱中65 ℃下48 h烘干，经研磨式粉碎机(RT-34，台湾弘茎)研磨粉碎，过100目筛后密封备用。鸡粪65 ℃于烘箱中72 h烘干，同样粉碎机粉碎、过100目筛。

1.2 样品成分分析

浒苔、稻草和鸡粪的CNHS元素组成采用元素分析仪(Vario EL，德国 elementar analysensysteme GmbH)测定，其中O元素用差减法得出，即是总量减去CNHS元素含量得O元素含量[10]。样品灰分采用800 ℃马弗炉中灼烧4 h，计算其灼烧前后质量之比即得灰分含量。为减少误差，样品分析时采用3次重复取其平均值。

1.3 生物炭的制备

生物炭的制取采用限氧控温炭化法[11]，具体步骤如下：取烘干粉碎过100目筛的浒苔、稻草及鸡粪样品，压实填满坩埚中，盖好盖子放入马弗炉，于一定温度(350，500，650 ℃)碳化2 h，自然冷却至室温后取出、研磨过100目筛储存备用。升温之前，事先充入炉腔2倍体积的氮气，并且加热过程中，以1 L/min的速度充入氮气，以持续保持炉内氮气气氛。马弗炉升温速率大约在10～30 ℃/min。

1.4 生物炭特性分析

生物炭的产率按生物质热解前后质量之比计算。

元素组成用元素分析仪(Vario EL,德国 elementar analysensysteme GmbH)测定,灰分测定采用 800 ℃马弗炉中灼烧 4 h,计算其灼烧前后质量之比即得灰分含量。pH 值的测定采用木质活性炭的 pH 值标准测定方法[12]。生物炭的堆积密度(装填密度),采用煤质颗粒活性炭试验方法标准中装填密度的测定方法[13]测定,即是生物炭经振动落入量筒中,称 100 ml 生物炭的质量,计算装填密度。试验中,样品分析重复 3 次,取平均值。

1.5　土壤持水性的测定

室验采用盆栽种植的方法测定生物炭对农田土壤持水性的影响,选用土壤—小麦系统作为试验对象,分为对照(CK,不添加任何改良剂)、分别添加 2 g(按照 1%的比例,200 g 土)在 350,500,650 ℃下制备的鸡粪、浒苔、稻草基生物炭,每个处理设置 3 个重复,共 30 个盆钵,放入恒定湿度和温度的人工气候箱(光照 12 h,25 ℃;无光照 12 h,15 ℃;湿度,40%)中。每盆播种颗粒饱满均匀的 10 粒小麦种子。小麦出芽之后,保证各盆小麦苗数一致。记录各个盆钵的浇水量和每盆重量(精确至 0.01 g),隔 4 d 记录 1 次,以各盆栽的蒸发量推算理想状态下土壤的持水性(按土壤前后质量比计算),探究不同种类生物炭对土壤持水性的影响。

2　结果与讨论

2.1　生物质废弃物原料及其生物炭元素成分分析

表 1 为 3 种生物质原材料的元素组成,可以看出鸡粪、浒苔和稻草成分组成差异明显。鸡粪和稻草 C 含量较高,浒苔的 O 含量较高。主要因为浒苔不含木质素,纤维素含量比较低,主要含有较多的可溶性糖、蛋白质和脂类[14]。另外,稻草和鸡粪的灰分含量较大,鸡粪中的 N 含量明显高于其他 2 种生物质,主要是鸡粪中含有没有被消化吸收的营养物质。对于 H 含量,3 种原料的差异性不大。

表 1　鸡粪、浒苔及稻草的元素成分组成　%

样品	碳	氮	氢	氧	灰分
鸡粪	35.4	6.1	5.2	17.8	35.6
浒苔	31.0	2.4	5.0	27.2	34.2
稻草	38.6	0.5	5.4	18.2	37.3

由于原料组分之间的不同,不同材料所制取的生物炭的性质也存在明显差异,并且热解温度对其特性也有一定的影响。图 1a—1c 分别为鸡粪、浒苔及稻草在 350,500,650 ℃下所制取的生物炭中 C,N,H,O 及灰分含量图,不同颜色表示不同热解温度下的生物炭元素含量。可以看出,随着热解温度的升高,3 种类型的生物炭 N,H 含量降低,灰分含量增加,这与其他研究相一致[15]。而对于 C 的含量,鸡粪与浒苔基生物炭 350 ℃时 C 含量较高,而稻草基生物炭则在 500 ℃时 C 的含量较高,主要原因是原材料组成的差异。另外,图 1 中 3 种类型的生物炭相比较,可以看出,鸡粪基生物炭含 C 量高达 52.0%,浒苔基生物炭含 C 量低至 33.5%,仅为鸡粪基生物炭的 64.3%,主要因为鸡粪原料的含 C 量远远高于浒苔的原因(表 1)。对于 N 含量,相同温度不同类型生物炭相比较可以看出,图 1a 中鸡粪基生物炭含 N 量最高,图 1c 中浒苔基生物炭次之。通常作为肥料的畜禽类粪便含 N 量较高,而浒苔作为水体富营养化产物,其 N 的含量通常高于一般陆生植物。对于 H 的含量,浒苔基生物炭最高,稻草及鸡粪基生物炭次之。对于 O 含量,图 1c 中 500,650 ℃浒苔基生物炭含 O 量较低,而 3 种原材料中浒苔含 O 量最高(表 1)。对于灰分含量,从图 1 中可以看出,不同温度下的生物炭:浒苔>鸡粪>稻草,主要与 3 种类型生物炭的制备原料有关。

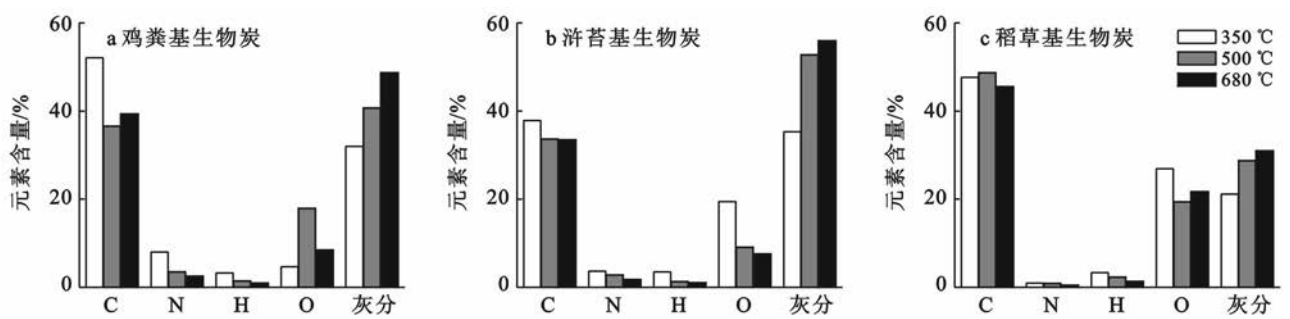


图 1　不同炭化温度下的不同类型生物炭的元素组成

2.2　不同类型生物炭 H/C 摩尔比与 C/N 质量比

H/C 摩尔比可以表征生物炭的芳香性,值越大表示芳香性程度越低[16]。C/N 质量比是有机物质(基底物质)释放无机氮能力的重要指标,研究生物炭 C/N 比对生物炭的农业应用具有重要意义。生物质炭的 H/C 及 C/N 受原料类型、制备条件等多重因素

的影响。表 2 为 3 个热解温度下的 4 种类型生物炭的 H/C 摩尔比及 C/N 质量比。可以看出,3 种类型生物炭的 H/C 比值随着热解温度的升高逐渐降低,并且明显低于生物炭原料(表 1),因为生物质在热解的过程中,C,H 等元素以气态物质形式释放,而 H 较 C 更容易脱落发生脱水炭化反应,所以生物炭的 H/C 明显低于原生物质[16]。由表 2 中 3 种生物炭的 H/C 的大小可知,热解温度为 350 ℃时,3 种生物炭的芳香性从强到弱依次为:鸡粪>稻草>浒苔;500 ℃时,鸡粪>浒苔>稻草;650 ℃时,鸡粪>稻草>浒苔,说明热解温度对不同原料制取的生物炭芳香化程度影响不同。

从表 2 可以看出,鸡粪、浒苔及稻草基生物炭的 C/N 比随着热解温度的升高而增大,变化范围为6.49~99.87。通常,C/N 比值表示有机物基质矿化的能力,比值越大,植物对 N 的利用率下降。试验结果表明,稻草基生物炭对 N 吸收的影响明显大于鸡粪基和浒苔基生物炭。并且,同种原料的生物炭,热解温度越高,对 N 吸收影响越大。

表 2 不同类型生物炭 C/H 与 C/N

样品	H/C(摩尔比)			C/N(质量比)		
	350 ℃	500 ℃	650 ℃	350 ℃	500 ℃	650 ℃
鸡粪	0.75	0.46	0.28	6.50	10.55	15.39
浒苔	1.11	0.46	0.37	10.40	11.95	18.71
稻草	0.84	0.57	0.36	48.45	54.68	99.87

2.3 不同类型生物炭 pH 值的差异

生物炭的元素组成及表面结构决定了生物炭的特性,其中 pH 值是重要特性之一。图 2 是鸡粪、浒苔及稻草在不同温度下生物炭水溶液的 pH 值,由图 2 可以看出,不同原料制取的生物炭 pH 值随着热解温度的升高而增大,pH 值从 6.82~8.35 升高至9.33~10.29。主要原因在于随着温度的升高,包裹于原料高聚物中的矿物元素 K,Ca,Na,Mg 浓度逐渐增大,矿物元素通常以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,溶于水后溶液呈碱性。通常灰分含量越高,pH 值越高[17]。另外,可以看出 3 种不同类型的生物炭 pH 值大小关系:鸡粪>浒苔>稻草,以鸡粪为原料制取的生物炭的 pH 值明显高于其他 2 种类型的生物炭。有文献表明,相同热解条件下畜禽类粪便制备的生物炭的 pH 值高于植物残体[18],高 pH 值的生物炭可用于改良酸性土壤。并且从图 2 中可以发现,以浒苔为原料制取的生物炭的 pH 值随温度变化的趋势与其他类型的生物炭有明显差异,热解温度由 350 ℃升至 500 ℃时,pH 值变化较大,而 500 ℃升至 650 ℃时,pH 值变化较小。

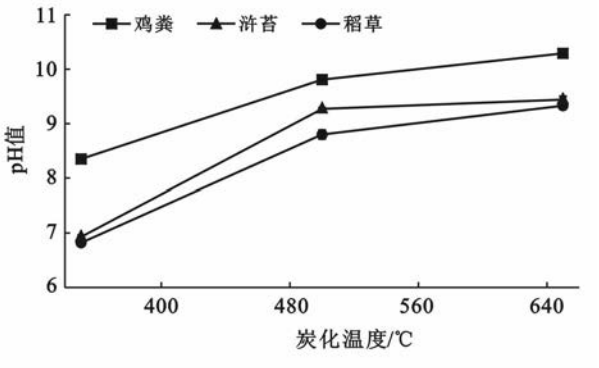


图 2 生物炭 pH 值随炭化温度的变化

2.4 生物炭 pH 值与灰分之间的关系

为了进一步考察生物炭 pH 值的影响因素,图 3a—3c 分别为鸡粪、浒苔及稻草基生物炭灰分与 pH 值的关系。可以看出,3 种类型的生物炭 pH 值随着灰分含量的增大而增大,且存在较好的线性关系,其拟合曲线的 r^2 值都在 0.87 以上,稻草基生物炭的 r^2 值高至 0.99 以上。说明灰分含量是生物炭呈现不同 pH 值的主要原因。另外,从拟合曲线的斜率对比可以看出,3 种类型生物炭中,稻草基生物炭 pH 值随灰分含量的增大变化较快,浒苔基生物炭次之,鸡粪基生物炭随灰分含量的增大变化较慢。

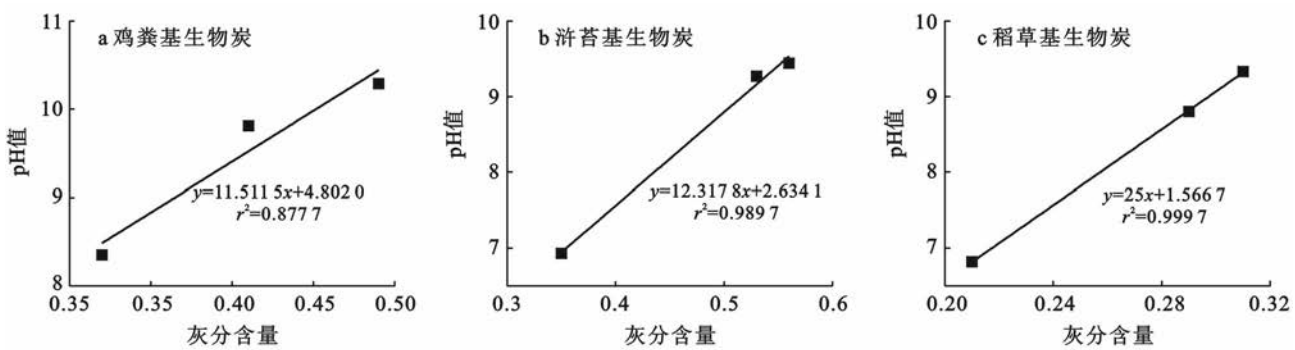


图 3 生物炭灰分含量与 pH 值的相关性

2.5　生物炭的类型对土壤持水性的影响

土壤水分的保持能力是由土壤介质中的孔径分布和连接性决定的,而生物炭的加入能够改变土壤的孔隙度及土壤的团粒结构[10]。试验在 2 个阶段分别考察了 3 种不同生物质材料在不同炭化温度下所制备的生物炭对土壤持水性的影响(表 3)。在第 1 个阶段,在 350,500 ℃炭化温度下,加入浒苔基生物炭的土壤持水性较大,在 650 ℃炭化温度下,加入稻草基生物炭和浒苔基生物炭的持水性较大。在第 2 个阶段,加入鸡粪基生物炭的土壤持水性最大。2 个阶段不同类型的生物炭对土壤持水性影响不同,可能是第 1 阶段刚加入的生物炭还没有与土壤完全发生作用,因为生物炭对土壤持水性的影响主要取决于生物炭和土壤之间的相互作用,而在第 2 阶段逐渐趋于稳定。另外,从表 3 中还可以看出,不同炭化温度下制取的同种生物质材料生物炭对土壤持水性的影响不同。随着炭化温度的升高,鸡粪、浒苔及稻草基生物炭引起土壤持水性逐渐增强。这可能是同种生物质材料生物炭随着炭化温度的升高其平均孔径及比表面积增大的缘故。

表 3　不同类型生物炭在不同炭化温度下的持水性　　%

样品	持水性 1/%			持水性 2/%		
	350 ℃	500 ℃	650 ℃	350 ℃	500 ℃	650 ℃
鸡粪	95.3±0.03	95.8±0.03	96.0±0.01	96.1±0.05	96.3±0.01	96.5±0.02
浒苔	95.6±0.01	95.9±0.01	96.3±0.03	95.6±0.02	96.2±0.03	96.2±0.01
稻草	95.2±0.01	95.8±0.02	96.3±0.02	95.1±0.04	95.9±0.04	96.4±0.01

生物炭的堆积密度是评价生物炭产品质量及其土壤环境效应的重要指标[16]。不同生物质材料、炭化工艺均可影响生物质炭的堆积密度。为了进一步考察生物炭性质对土壤持水性的影响,图 4a,4b 分别为第 1,2 阶段生物炭的堆积密度与土壤持水性的相关性。

由图 4a 可以看出,在第 1 阶段,生物炭的堆积密度与土壤的持水性之间没有明显的相关性,相关系数 r^2 为 −0.088 35。而图 4b 中,生物炭的堆积密度与土壤的持水性之间存在明显的相关性,相关系数 r^2 为 0.742 0。在第 1 阶段,生物炭堆积密度的大小没有对土壤的持水性产生影响,进一步表明在此阶段,生物炭加入土壤的时间较短,生物炭还没有和土壤发生相互作用。第 2 阶段,生物炭与土壤发生了相互作用,随着生物炭堆积密度的增大而土壤的持水性增强。土壤的持水性与土壤的空隙分布有关,进一步说明该阶段生物炭的加入改变了土壤的空隙分布。通常,生物炭的堆积密度越大,孔隙率越小。仅凭生物质炭堆积密度很难完全反映对土壤性质的影响,需要考虑其他因素的影响。

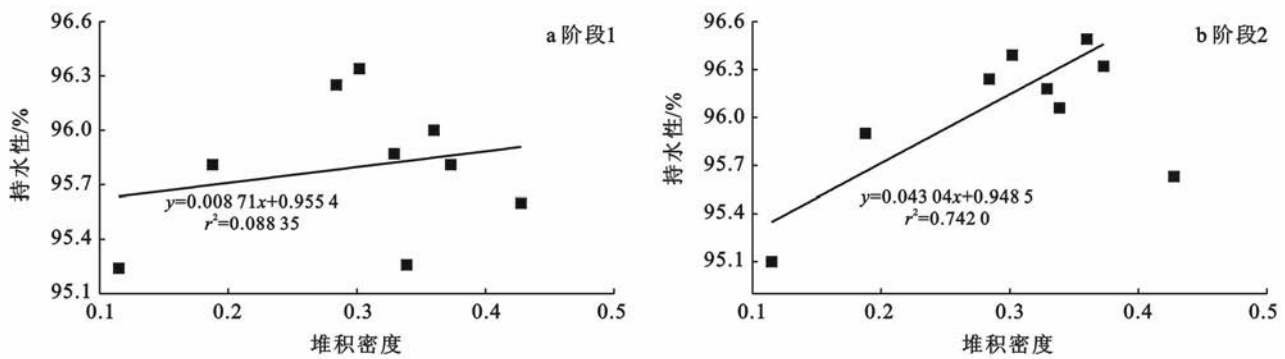


图 4　生物炭堆积密度与土壤持水性的关系

3　结 论

不同类型生物质废弃物由于组成差异,其制备的生物炭理化性质差异显著。本研究从农作物秸秆、畜禽粪便和水生植物 3 类来源广泛的生物质废弃物中各选取一种开展研究,分别为稻草、鸡粪和浒苔。元素组成分析表明,水体富营养化藻类浒苔 C 含量低于鸡粪和稻草,但其 O 含量较高,鸡粪则具有较高含量的 N,稻草的 C 含量为 3 类中最高。受原材料组成影响,3 种不同热解温度条件下制备的生物炭元素组成与原材料组成显著相关,浒苔基生物炭 C 含量低,灰分含量高;鸡粪生物炭 C 含量较高。因此,就为土壤提供营养成分而言,鸡粪基生物炭显然更具优势。而且,在促进土壤持水性方面,鸡粪生物炭相对更强一

些。研究不同类型的生物炭的理化性质，比较其在土壤中的应用，对于推广生物炭修复和改良土壤具有重要作用。

[参 考 文 献]

[1] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation[M]. London and Newyork: Routledge, 2015.

[2] Tripathi M, Sahu J N, Ganesan P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016,55:467-481.

[3] 赵建坤，李江舟，杜章留，等. 施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. 气象与环境学报，2016，32(6)：95-101.

[4] 许燕萍，谢祖彬，朱建国，等. 制炭温度对玉米和小麦生物质炭理化性质的影响[J]. 土壤，2013，45(1)：73-78.

[5] 王煌平，张青，李昱，等. 热解温度对畜禽粪便生物炭产率及理化特性的影响[J]. 农业环境科学学报，2015，34(11)：2208-2214.

[6] 李蜜. 水生植物基生物炭的酸碱性、碱(土)金属浸出性及对 Cu(Ⅱ)的吸附效应[D]. 上海：上海大学，2014.

[7] Chen Yan, Shinogi Y, Taira M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. Soil Research, 2010, 48(7): 526-530.

[8] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils[J]. Soil Use and Management, 1996,12(4):209-213.

[9] 齐瑞鹏，张磊，颜永毫，等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报，2014，25(8)：2281-2288.

[10] 孙红文，张彦峰，张闻. 生物炭与环境[M]. 北京：化学工业出版社，2013.

[11] Xu Yiliang, Chen Baoliang. Investigation of thermodynamic parameters in the pyrolysis conversion of biomass and manure to biochars using thermogravimetric analysis[J]. Bioresource Technology, 2013,146(10):485-493.

[12] 国家质量技术监督局. GB/T12496.7-1999 木质活性炭试验方法：pH 值的测定[S]. 北京：中国标准出版社，1999.

[13] 国家质量技术监督局. GB/T30202.1-2013 脱硫脱硝用煤质颗粒活性炭试验方法第 1 部分：堆积密度[S]. 北京：中国标准出版社，2013.

[14] 王爽. 海藻生物质热解与燃烧的试验与机理研究[D]. 上海：上海交通大学，2010.

[15] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006,37(11): 1477-1488.

[16] 吴伟祥，孙雪，董达，等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京：科学出版社，2015.

[17] 吴志丹，尤志明，江福英，等. 不同温度和时间碳化茶树枝生物炭理化特征分析[J]. 生态与农村环境学报，2015，31(4)：583-588.

[18] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tmpics[J]. The Science of Nature, 2001,88(1):37-41.

(上接第 62 页)

[14] 井大炜，王明友，张红，等. 鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(8)：192-200.

[15] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京：中国林业出版社，1996：158-204.

[16] 井大炜，邢尚军，刘方春，等. 畦灌配施保水剂改善杨树林下土壤物理性状提高微生物活性[J]. 农业工程学报，2015，31(14)：116-122.

[17] 戚瑞敏，赵秉强，李娟，等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报，2016，32(S2)：118-127.

[18] 井大炜，邢尚军，刘方春，等. 保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(5)：146-154.

[19] 张亚杰，钱慧慧，刘坤平，等. 施肥对玉米/大豆套作土壤活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 华南农业大学学报，2016，37(3)：29-36.

[20] 刘晓. 配施鸡粪对杨树苗根系形态和根际土壤微环境特征的影响[J]. 水土保持通报，2014，34(5)：80-84.

[21] 井大炜，邢尚军，刘方春，等. 保水剂—尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(4)：1046-1052.

[22] 史康婕，周怀平，杨振兴，等. 长期施肥下褐土易氧化有机碳及有机碳库的变化特征[J]. 中国生态农业学报，2017，25(4)：542-552.