

污泥—生物炭耦合还田技术研究进展

张丛光^{1,2},尚高原^{1,2},邱凌^{1,2*},葛一洪¹,杨鹏¹,孙国涛¹

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨陵 712100;

2. 农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站,陕西 杨陵 712100)

摘要:从生物炭和污泥的基本理化性质出发,介绍了生物炭和污泥对农作物增产、改良土壤等方面的作用机制,概述了生物炭和污泥耦合肥料的制备、国内外还田技术的研究现状以及污泥—生物炭耦合农用的效用情况。通过对污泥—生物炭肥料品质的全面分析,针对性评价了其安全性、稳定性及增产效果,认为该技术拥有较强的推广可行性。我国农村秸秆资源大量剩余,城市污泥过剩引发环境问题,而污泥—生物炭耦合生态农用技术为秸秆和污泥的资源化、无害化处理利用提供了解决方案。

关键词:污泥;生物炭;生态还田;土壤改良

中图分类号:S789.9

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2017)03-0084-07

Research Progress of the Application Technology of Sludge and Biochar

ZHANG Cong-guang^{1,2}, SHANG Gao-yuan^{1,2}, QIU Ling^{1,2*}, GE Yi-hong^{1,2}, YANG Peng¹, SUN Guo-tao¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Northwest Research Center of Rural Energy Exploitation and Utilization of M.O.A, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the basic physical and chemical properties of sludge and biochar, the function mechanism of sludge and biochar in improving crop production and soil improvement were reviewed. The preparation, current research situation, and application of coupling fertilizer with sludge and biochar were summarized. The safety, stability, and yield-increasing effect of the fertilizer were evaluated by the comprehensive analysis of the fertilizer's quality. It was feasible to popularize the fertilizer in China. Lots of rural straw resources are wasted in China, excess sludge caused urban environmental problems, the solution to solve the problems will be the application of sludge-biochar fertilizer, which will successfully make the straw and sludge recovery and harmless.

Key words: sludge; biochar; ecological agricultural application; soil improvement

污泥—生物炭耦合生态还田技术的研究基于两者特有的理化性质,从原料来源可知,污泥和生物炭均具有丰富的潜在储量,且相比于有机肥具有更可观的经济、生态效益,能够在提高肥效的基础上,充分利用废弃资源达到可持续利用的目的。随着我国城镇化进程的快速推进,尽管污泥消化、脱水等技术已相当成熟,但此过程的废水污泥却依然难以得到高效处理,多种因素导致污泥的处理率非常低,而目

前发达国家的城市污泥施肥土地利用率已达到50%^[1]。因此,利用基于污泥—生物炭耦合制肥的还田技术实现二者的资源化、无害化处理与利用,将带来巨大的经济、环境和社会效益。

生物炭具有强大的吸附特性和巨大的比表面积,可由各类农作物秸秆经高温裂解直接制得,来源十分广泛^[2]。将生物炭投放到耕地中可改善土壤结构,且一般呈弱碱性,可调节土壤的酸碱度并改良酸

收稿日期:2016-01-21 修回日期:2016-12-23

基金项目:国家自然科学基金(51576167);国家公益性行业(农业)科研专项(201303101-04)。

作者简介:张丛光,男,在读硕士,研究方向:生物环境与能源。E-mail:zhangcongguang@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者:邱凌,男,教授,博士生导师,研究方向:生物质能和生态农业。E-mail:QL2871@126.com

性土壤。其多孔结构为微生物的生长和繁殖提供了有利条件,有利于提高土壤的保肥能力及农作物生产率^[3]。我国城市污泥的年产量很大,科学合理地处理污泥已成为一个亟待解决的问题。本研究重点介绍污泥—生物炭的生态农用技术研究进展,并就该技术的增效情况、安全性及稳定性分析,为污泥—生物炭耦合还田技术的推广应用提供理论依据。

1 生物炭与污泥的原料特性

1.1 生物炭

1.1.1 概述 生物炭原是指用高粱制备的用来吸附有害气体的活性炭^[4],现通常指用木材、树叶等农林废弃物或者其他生物质废弃物在供氧不足,且温度低于700℃时的热裂解产物。常见的木炭主要采用干馏技术制成,将生物质原料高温加工制成深褐色或黑色的多孔固体燃料,造价较高;而生物炭的生产工艺较木炭简单得多,其制备所需的原材料廉价易得,储量丰富,具有显著的可持续开发及应用潜力。

1.1.2 生物炭的理化特性 由于制备生物炭所采用的生物质原料与工艺不同,生物炭的理化性质也有不同程度的差异,集中表现在挥发分含量、pH值、化学吸附、氧化性、化学元素构成、比表面积等方面^[5-7]。生物炭往往呈碱性,pH普遍较高,因此可在一定程度上改善酸性土壤的性质,增强保水能力。在生物质热解过程不会破坏韧皮部及木质素的网格结构(图1)^[8],因此,土壤水分能够有效渗透,其含有的丰富微生物易寄宿,并在短时间内大量繁殖。

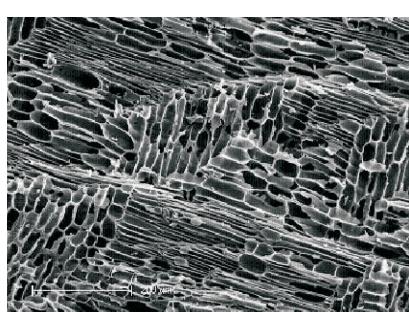


图1 生物炭剖面结构的电镜扫描

Fig.1 Scanning electron micrograph of biochar section structure

生物炭可为土壤微生物提供良好的栖息环境,增加微生物的丰富度,施加生物炭可以吸附土壤中能导致植物发生连作障碍的化感物质,降低植物的发病率^[9]。

1.1.3 生物炭在农业中的应用 生物炭具有的理化特性使其成为环境保护、农业还田、作物肥料研制、厌氧消化反应等研究领域的研究热点。生物炭已被证实可以吸附作物周围土壤中含有的丰富营养元

素,不仅能有效降低营养流失,还能起到肥效缓释的作用,有利于农作物的生长发育。此外,生物炭在制备过程中会产生木醋液(也称木醋酸),其在农业上的应用广泛,在不同浓度下具有杀菌、抗菌及防虫防病的效果。生物炭具有较大的比表面积,可作为高效土壤改良剂,对游离氨和NH₄⁺具有固定作用,能够提高硝化速率;此外,生物炭还可减少温室气体N₂O的排放,减少硝酸根中的氮淋洗。

由于农作物对化肥的吸收效果差异,导致化肥养分流失、水体污染甚至土壤板结,极大地降低了耕地的种植功能,而基于生物炭与普通化肥混合技术制备的炭基有机—无机复混肥,可满足各种农作物对N、P、K等营养元素的需求,从而能够达到缓释肥效、减少化肥用量的目的。

1.2 污泥

1.2.1 概述 污泥一般指城市污水处理厂的沉淀池污泥及剩余活性污泥的总称,也可以是污水处理厂对污水进行处理过程中沉淀物质及污水表面漂出的浮沫所得的残渣。随着我国城市化进程的推进,污水处理厂数量、污水处理能力及污泥产量都有显著提高。据住房建设部统计,截止2015年末,全国城镇累计污水处理厂3542座,全年处理污水总量达507.7亿m³,污泥产量随之升高。污泥的处理已成为我国面临的主要环境问题之一。

污泥主要由有机物和无机物组成,其中有机成分占75%~85%,无机成分约占15%~25%^[11],还有一定的病原体、寄生虫卵以及砷、锌、汞等重金属元素。污水处理厂产生的污泥一般包括初沉污泥、二沉污泥、剩余污泥、消化污泥和活性污泥等,其中初沉污泥指由初沉池直接排放出的沉淀物;二沉污泥指由二沉池排出的沉淀物;剩余污泥指活性污泥除回流部分之外排出体系的污泥;消化污泥指经过好氧消化或者厌氧消化的污泥;活性污泥指水体微生物与有机物和无机物形成的絮状体。

1.2.2 污泥的理化特性 污泥含有无机颗粒、微生物、胶体颗粒和有机残片。污泥中的有机物主要包括蛋白质、多糖和脂类等,其中,蛋白质和木质素的含量占比最高,其次是水溶性有机物,再次是油脂类有机质,纤维素和半纤维素含量相对较低。周立祥^[12]等对厌氧消化污泥主要组分剖析表明,蛋白质总量约占污泥有机物总量的4%;张万钦^[13]等研究表明,污泥中蛋白质含量约为20%,木质素约为19%。

活性污泥中不同的菌群系生长以不同的形式吸附在污泥上或游弋于其间。细菌、微型动物及其他微生物及废水中的部分悬浮物,共同形成了吸附

能力强、可有效分解有机物质的絮凝体。污泥含较多的有机质和 N、P 等养分,且有机态养分中相当部分容易矿化,具有很好的肥料价值。此外,污泥还可通过水热炭化等方法制备污泥生物炭,作为土壤中的农作物肥料增效剂,在对玉米等农作物促生长的同时降低污泥土地利用的重金属环境风险^[14]。

1.2.3 污泥在农业中的应用 随着城市污水处理率的逐年升高,巨大的污泥剩余量导致了新的环境污染问题,尽管污泥中含有丰富的可利用有机物质,但污泥中过多的病原微生物以及重金属等使其具有成分复杂、变异性大等特点,其无害化及稳定化处理显得尤为重要。目前已有一种有效地处置污泥的方法,包括焚烧、卫生填埋和用作化肥以及土壤改良剂。在还田应用方面,目前研究较多的是处理消化污泥。消化污泥中含有大量可促进农作物生长的有机营养物质,污泥独有的颗粒性质也使其对土壤具有一定的改善作用,而消化污泥农用的主要障碍是农作物对重金属的富集及水体富营养化问题。

国内外已有较多关于污泥还田技术的研究,包括具体针对其物化本质的研究。胡靄堂^[12]等在 20 世纪末就深入剖析了厌氧消化污泥的化学组成及其环境化学性质,证实污泥中主要含有有机质和 N、P 等养分,介绍了污泥所具有的农用价值潜力。而目前针对不同的农作物生长特点采取的混合肥料也逐渐成为污泥农用技术的研究热点。纪力^[15]等研究了草木灰与城市污泥不同配比的育苗基质对辣椒育苗的影响。王君^[16]等通过盆栽研究表明,施用炭化污泥对玉米生长的显著促进作用,且在不同炭化时间和温度下制备的污泥对农作物的增效作用明显不同,还可以降低重金属在植物体内的累积量。污泥堆肥还田后还可能使植物的开花、结果习性发生变化,对提高植株开花质量具有一定的促进作用。赵广琦^[17]等的田间试验证实,施用污泥堆肥的花灌木株高比同期的对照处理增长 13%~28%,冠幅增加 26%~48%,促进各花灌木生长的最佳投放量为 5.0%。

2 污泥—生物炭还田原料的制备

2.1 污泥原料的制备

2015 年,我国污泥年产量(含水 80%)达到 4 703 万 t,合 934 万 t 干污泥产生量。从污泥无害化处理的角度看,污泥生态处理新技术的研发需求迫切。目前关于污泥制备的研究主要针对城市废水处理厂的池底污泥。由于污泥中含有一些病原菌、害虫及一些重金属元素,可能会使耦合后的产品具有强烈的副作用,制备时需进行污泥稳定化和无害化预处理,其中,最普遍采用的是堆肥化处理。将污

泥与生物炭(也可掺加部分粪便、秸秆等废弃物)在适宜 pH、碳氮比、温度等条件下进行好氧堆沤后,其中的寄生虫卵、病原菌基本被全部杀死,异味及挥发性物质明显减少,重金属有效态的含量降低,目前,污泥—生物炭耦合原料的堆肥化处理工艺研发方面,杨阳^[18]等以脱水污泥为原料,采用卧式旋转式污泥好氧发酵装置对脱水污泥进行有氧发酵,通过大田试验发现污泥施用土壤速效磷含量比施用化肥对照高,大豆产量明显提高。余亚伟^[19]等研究发现,施用含生物质炭的堆肥产品植物体内甲基汞含量比无生物质炭组低,生物质炭可能会抑制植物对甲基汞的富集。杨燕琴^[20]等研究表明,当污泥堆肥施用量低于 2 000 kg·666.7 m⁻²,土壤中肥效增加明显,且有效减少土壤对 Cu²⁺ 的吸附。

2.2 生物炭原料的制备

生物炭的制备原料来源广泛,如农作物秸秆、果树废枝条等。工业热裂解法是制备生物炭最主要的方法。热裂解又包括干烘、水热炭化、慢速热解、中速热解、快速热解等多种技术,同时热解温度、压力及停留时间都会在很大程度上影响生物炭的制备产品(表 1)^[21]。生物炭的制备技术根据条件不同,所制备的产品成分有较明显的差异,此外,生物炭制备的过程中会产生副产品—大量木醋液,需进行妥善处理。木醋液是一种能够明显改良盐碱土壤的调节剂,可推广应用。

2.3 耦合原料的配比及施肥

虽然污泥和生物炭制备原料来源丰富,但将其耦合投入到生态农用领域的研究目前甚少。原料中污泥的制备需要一定的预处理技术,为防止植物富集金属毒性和水体富营养污染,需利用低温冷处理技术、传统堆肥法、生物恢复等技术清除含水污泥中的油性物质。而生物炭的制取主要考虑设备工艺投资等。

污泥和生物炭的耦合需要根据所种植的农作物品种与种植土壤的情况,结合大量的试验确定适宜的配比及施肥量。连续投放污泥 10 a 以上的土壤中 Cd、Zn、Cu 等元素含量均很高,种植的水稻、蔬菜受到了严重的污染。为了在源头上避免因污泥中含有的重金属超标,建议在制备污泥—生物炭耦合肥料时,准确检测其中的重金属元素含量,以确定单位面积农作物应施污泥总量。谷子、玉米和白菜等农作物污泥堆肥使用量应≤200 t·hm⁻²^[22]。一般认为,生物炭的添加量为污泥添加量的 10 倍。不同农作物在实际施加污泥—生物炭耦合肥料前,应着重测定污泥中重金属含量、盐分、有机物组分等参数,再根据是否符合各项安全性国家标准制备耦合原料。

表1 生物炭制备条件及产品构成

Table 1 Biochar preparation conditions and the product composition

生物炭制备技术	条件	产品构成		
		液体/%(生物油)	固体/%(生物炭)	气体/%(合成气)
闪蒸炭化	350~650℃,停留时间一般<30 min,1~3 MPa 压力	NRA	NRA	NRA
慢速热解	低温,热水蒸汽停留时间长	30	35	35
中速热解	低温,热水蒸汽停留时间较长	50	25	25
快速热解	600℃,热水蒸汽停留时间短	75	12	13
水热炭化	200~250℃,有一定压力	NRA	NRA	NRA
气化	>700℃,热水蒸汽停留时间长	5	10	85

注:NRA为不易获得数据。

3 污泥—生物炭耦合还田的效用

3.1 污泥—生物炭对土壤结构的改良

在将污泥和生物炭通过一定的配比耦合后作为肥料用于农田中,能够使土壤物理性质和表面结构发生一定的变化,对土壤微生物环境形成某种直接或者间接效应。生物炭和污泥对土壤的改良作用主要体现在土壤容重、孔隙度及含水量等方面^[23-27]。污泥—生物炭耦合肥料施入土壤后,能够在很大程度上使土壤容重降低,总孔隙率可以提高至50%以上。污泥—生物炭耦合肥料中包含的孔隙结构可显著提高土壤持水力,对农作物生长发育产生积极的促进作用。污泥还可以和矿化垃圾等物质耦合农用,可降低土壤pH,增加土壤有机质、速效氮及磷含量。含5%与10%污泥成分的混合肥料能显著提高黑麦草生物量,并促进其根系生长;生物炭用量越大,植株地下、地上部的生物量也越大^[28]。

3.2 污泥—生物炭对土壤营养成分的影响

污泥—生物炭耦合生态农用,不仅能提高土壤肥力,优化土壤的结构性,对土壤氮磷钾等营养元素也具有一定的调节作用。菜田使用污泥—生物炭施肥能够明显提高土壤中水解氮的含量,虽然总氮的含量与投入污泥的氮含量呈显著正相关,但经过污泥—生物炭的处理后,肥料中有机氮的矿化速率远超施用畜禽粪便^[29],可见,污泥—生物炭的耦合施肥既能够培肥地力,又能够提供速效养分。

由于污泥—生物炭耦合肥料中的生物炭组分能够明显吸附NH₄⁺、磷酸根等其他无机盐离子,因此,可降低土壤中N元素的流失,有效提高有机肥料的利用效率,并逐步提升土壤的肥力;对土壤中P等元素的活化作用在果树栽培上的效益尤其明显,在肥料施用量相当的情况下,速效磷的绝对量与速效磷占总磷的比例都明显高于其他种植方式,可有效的保证农作物在单独施用该复合肥料时能够获得足够的营养物质。

3.3 污泥—生物炭对土壤微生物的影响

微生物通过自身在土壤中的各项代谢活动,直接参与并不断促进土壤中的物质循环。污泥—生物炭耦合肥料中的生物炭本身具有的结构特征与理化特性,其施入土壤后可以对土壤容重、含水率、养分含量、孔隙度、电导率、阳离子交换量等指标产生一定的影响,从而直接或间接地影响土壤中的微生态环境。污泥—生物炭耦合肥料中水溶性有机物主要包括大量的低分子碳水化合物和氨基酸,这些物质易被各类微生物分解利用,是促进微生物代谢的重要能量和营养来源;而生物炭的多孔结构和巨大的比表面积亦可增加植物根系附件微生物,能够促进农作物根系的生长繁殖。因此,污泥—生物炭的耦合产品生态还田后,会影响土壤中的微生物群系特征,总体上能提高土壤中的微生物总量和放线菌在群系中的比例,有利于土壤腐殖质的形成、分解以及对其他微生物的调节,持续发挥改土增产及固碳减排作用。

3.4 其他效用

污泥—生物炭耦合生态农用亦能够影响土壤的pH值、酶、盐分及导电率等。对污泥生物炭基堆肥的研究认为^[30],生物炭表面的阳离子交换强度随pH的增加而增加,从而增强对微量元素的吸附作用,生物炭的含氧官能团在金属离子形成复合物的过程中作用也很明显。当污泥中的无机氮主要为NH₄⁺—N时,施加污泥施用会降低土壤pH,相反,若无机氮主要以游离氨存在时,则会提高土壤的pH。污泥—生物炭肥料的添加,能够提高土壤中脱氢酶和脲酶的活性,此2种酶是表征农作物呼吸作用和土壤氮素供应强度的重要催化剂。

4 污泥—生物炭耦合肥料的品质分析

4.1 安全性分析

4.1.1 重金属污染问题 重金属污染是污泥—生物炭耦合生态农用技术推广的主要影响因素,其主要风险点在于污泥的原料制备。城市污水处理系统

中的污泥往往含有工业废水残留的 Cu、Cr、Ni 和 Cd 等重金属元素,这些元素达到一定的含量就会对农作物生长产生毒性,长期施加会导致生物链中的重金属累积,从而成为影响人类健康的食品安全隐患^[31]。重金属污染物在土壤中移动性很小,不易随水淋滤,微生物也无法降解,通过食物链进入人体后,潜在危害极大。大量的生物炭施入被污染的土壤后,利用生物炭的强吸附性,可以将土壤中的重金属离子有效固持,降低重金属的有效态含量,减少重金属对微生物的胁迫^[32]。因此污泥施用应该尽量选择重金属富集量少的农作物(主要是茎秆较长且籽实不易积累元素),并严格控制污泥使用量。

目前处理重金属污染的途径主要有 3 类,分别是污染源源头控制、重金属元素固定和抑制重金属活性态。污泥—生物炭耦合可以在土壤中将一部分重金属固定在其中的生物炭中,添加生物炭能够降低重金属元素对污泥还田的污染程度,对重金属浓度较高的污泥,可主要采用化学方法和生物学方法(利用微生物将难溶重金属转化为可溶性盐)进行预处理。对施加污泥的量进行合理控制后,可广泛推广污泥—生物炭还田技术。

4.1.2 地下水安全问题

污泥—生物炭能够为土壤提高丰富的氮素,而污泥中的氮素以有机及无机态存在,可能与土壤中的胶体发生各种物化反应,其产物中的氮素一方面以氮气和氮氧化物的形式进入大气,另一方面可通过硝化反应转化为易溶于水的硝态氮,随着土壤中的水分流动,造成地下水环境的污染^[33]。污泥—生物炭耦合原料中的污泥量<45 t · hm⁻²,其中的 NO₃⁻-N 不会对地下水造成不良影响^[34]。相对于施加无机氮肥,在总氮量相同的情况下,污泥比化肥对地下水的污染程度低,表明了污泥—生物炭耦合农用的合理性。

4.1.3 富营养化问题

因城市污水来源复杂,尤其是工业废水和医用废水,经处理厂生物处理后留下来的污泥有可能盐分过高,也有可能含有大量的病原物和有害的有机污染物,这些物质如果不经过处理直接用于污泥—生物炭肥料的制备,将会带来严重的环境问题甚至破坏耕地质量。如果污泥—生物炭耦合肥料中的污泥盐分过高,将会破坏土壤的养分平衡,损伤植物根系,抑制植物对营养物质的吸收;同时,盐分离子之间的拮抗作用能引起 K⁺、NO₃⁻、NH₄⁺等营养的快速淋失。未经过预处理的污泥往往含有较多的病原微生物和寄生虫卵,直接耦合生物炭还田可能通过传播导致土壤、空气及水质的污染,直接或间接危害人畜健康。如果在降雨较多的地区大量施用污泥—生物炭耦合肥料,其有

机物的分解速度若大于植物对氮磷钾元素的吸收速度,就会有一些有机物随雨水流入地表水体。污水处理厂的污泥中有可能含有一定量的多环芳烃、医药的残留物及聚氯二酚等有机污染物,这些物质进入土壤中也存在安全隐患。

4.2 稳定性分析

固有碳组分和挥发性物质含量是描述生物炭稳定性的主要指标。污泥与生物炭耦合不会降低生物炭的高度热稳定性。关于耦合原料的稳定性,目前的研究主要集中在 2 方面,一是探究生物炭还田后炭素固定到土壤的时间,及需要多久才能影响土壤圈温室气体的排放,并减缓气候变化,二是探究生物炭多久才有益于土壤和水资源^[35]。生物炭稳定性检测方法有直接和间接测量法,对 100 a 前天然野火发生地炭库测量后认为,生物炭的降解速率长达 293 a^[36]。叶丽丽^[37]等通过研究中稻秸秆炭对土壤结构的稳定性,认为生物炭单施的降解速率为 1 388 a,而与化肥配施时的降解速率仅为 355 a。

4.3 作物生长效用分析

污泥中含有丰富的氮、磷及有机质,与生物炭耦合后能够提高作物产量,改善农作物的品质,使水稻、小麦和玉米作物的蛋白质含量分别提高约 6%~10%、9.7% 与 14.5%~23.7%^[38]。刘园^[39]等对小麦-玉米轮作试验表明,添加生物炭后的土壤肥力增强,玉米的总产量提高 8.4% 左右,中高量的秸秆生物炭每季还田对农作物土壤的容重降低 3.0%~10.4%,提高含水量达 10%~20%,增产而不影响农作物的品质。耦合肥料施加到烟草田中,生长初期的效果并不明显,约在种植后的 80 d 内烟草的干物质比对照有显著提高^[40],可能是因为污泥中掺加的生物炭的多孔吸附作用,吸附了其中的营养物质,而随着烟株生长,肥效逐渐被释放到土壤中,促进了烟株干质量增加,同时提高了污泥的肥效。

5 结论与讨论

随着工业化与城镇化进程的加快,城市污水处理系统的污泥产生量急剧增加,由此引发了很多环境污染和资源浪费问题。污泥—生物炭耦合生态还田技术有利于秸秆的资源化利用以及污泥的无害化、资源化利用。从源头上,原料制备中最具发展潜力的材料是农林废弃物和城市污泥,经过预处理后耦合还田,既能从根本上解决环境恶化问题,同时将大量剩余秸秆回归耕地。从过程上看,污泥—生物炭耦合生态农用的肥料制备并不复杂,很多预处理及热解技术已经进入商品化阶段。从结果上看,污泥—生物炭耦合能够集环境效益、经济效益乃至社

会效益于一体,在很大程度上降低了农药、化肥的投入,在整个产业链中还能够生产出木醋液及沼气等高价值的附加产品。污泥—生物炭耦合生态还田技术对我国“两减一增”政策的推进实施,解决城市环境污染问题、提升农作物产量、推动秸秆资源化利用等方面将发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 钱雯婕,王妙星,金文萍,等.城市污泥处置与其资源化利用分析[J].现代农业科技,2014,16(2):49-56.
- [2] 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(04):779-785.
YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (04) : 779-785. (in Chinese)
- [3] 黄玉莹,袁兴中,李辉,等.稻草的水热碳化研究[J].环境工程学报,2013,7(5):1963-1969.
HUANG Y Y, YUAN X Z, LI H, et al. Study on hydrothermal carbonization of rice straw[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (5) : 1963-1969. (in Chinese)
- [4] 张鹏,武健羽,李力,等.猪粪制备的生物炭对西维因的吸附与催化水解作用[J].农业环境科学学报,2012,31(2):416-421.
ZHANG P W, WU J Y, LI L, et al. Sorption and catalytic hydrolysis of carbaryl on pig-manure-derived biochars[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (2) : 416-421.
- [5] DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Biochar from sawdust, maize stove and charcoal: impact on water holding capacities(WHC) of three soils from Ghana[C]. Brisbane, Australia: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for A Changing World, 2010.
- [6] AMELOOT N, GRABER E R, VERHEIJEN F G A, et al. Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(4):379-390.
- [7] KOLB S E, FERMANICH K J, DORNBUSH M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73: 1173-1181.
- [8] 朱文英,唐景春.小麦秸秆生物炭对石油烃污染土壤的修复作用[J].农业资源与环境学报,2014,31(3):259-264.
ZHU W Y, TANG J C. Remediation of wheat-straw-biochar on petroleum-polluted soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(3): 259-264.
- [9] 张阿凤,潘根兴,李恋卿,等.生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463.
ZHANG A F, PAN G X, LI L Q, et al. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2459-2463. (in Chinese)
- [10] 陈杰,周胜军,戴丹丽,等.木醋液对营养液栽培生菜光合作用及养分吸收的影响[J].上海交通大学学报:农业科学版,2005,23(3):249-253.
- [11] CHEN J, ZHOU S J, DAI D L, et al. Effects of adding wood vinegars in nutrient solution on the growth, photosynthesis and absorption of mineral element in hydroponic lettuce[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2005, 23(3): 249-253. (in Chinese)
- [12] 曹仁林,霍文瑞.园林绿地施用污泥堆肥对环境影响研究[J].环境科学研究,1997,10(3):46-50.
CAO R L, HUO W R. Study on the environmental impact of sludge compost utilization on green area[J]. Research of Environmental Sciences, 1997, 10(3): 46-50. (in Chinese)
- [13] 周立祥,胡需堂,胡忠明,等.厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J].植物营养与肥料学报,1997,8(2):65-74.
ZHOU L X, HU A T, HU Z M, et al. The composition and characteristics of an aerobically digested sludge[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 8(2): 65-74. (in Chinese)
- [14] 张万钦,戚丹丹,吴树彪,等.不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响[J].农业机械学报,2014,45(9):187-198.
ZHANG W X, QI D D, WU S B, et al. Effect of different pre-treatment methods on sewage sludge anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 187-198. (in Chinese)
- [15] 赵晶晶,周少奇,陈安安,等.城市污泥与花生壳制活性炭的重金属形态分析及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2284-2289.
ZHAO J J, ZHOU S Q, CHEN A A, et al. Morphological analysis and ecological risk assessment on heavy metals in the activated carbon prepared from sewage sludge and peanut hull [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (11) : 2284-2289. (in Chinese)
- [16] 纪力,孙春梅,邵文奇,等.草木灰与城市污泥不同配比的育苗基质对辣椒育苗的影响[J].上海农业科技,2015,15(1):86-87.
WANG J, CHEN X, GUI P, et al. Effects of pyrolysis temperature and time on the speciation and bioaccumulation of heavy metals derived from sludge[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5): 54-60. (in Chinese)
- [17] 赵广琦,沈烈英,王智勇,等.城市污泥堆肥对12种花灌木生长的影响[J].西北林学院学报,2011,26(5):87-90.
ZHAO G Q, SHEN L Y, WANG Z Y, et al. Effects of sewage sludge compost on the growth of 12 flowering shrubs[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26 (5) : 87-90. (in Chinese)
- [18] 杨阳,李明,王帅,等.活性污泥堆肥农用效果的研究[J].黑龙江大学工程学报,2016,7(2):58-63.
YANG Y, LI M, WANG S, et al. Study on the land application effect of activated sludge compost[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2016, 7 (2) : 58-63. (in Chinese)
- [19] 余亚伟,杨雨洽,张成,等.施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响[J].环境科学,2017,33(01):1-10.
YU Y W, YANG Y H, ZHANG C, et al. Effect of sewage sludge compost products application on total mercury and methylmercury in soil and plants[J]. Environmental Science,

- 2017,33(1):1-10. (in Chinese)
- [20] 杨艳琴,魏明宝,马闯,等.施用城市污泥堆肥对土壤中 Cu²⁺吸附行为的影响[J].轻工学报,2016,31(5):20-24.
- YANG Y Q, WEI M B, MA C, et al. Effects of municipal sludge composts on Cu²⁺ adsorption in soil [J]. Journal of Light Industry, 2016, 31(5): 20-24. (in Chinese)
- [21] 金梁,魏丹,李玉梅,等.生物炭制备及其稳定性估测方法研究进展[J].农业资源与环境学报,2015,32(5):423-428.
- JIN L, WEI D, LI Y M, et al. Progress on biochar preparation and its assessment methods of stability[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(5): 423-428. (in Chinese)
- [22] 郭媚兰,米尔芳,田若涛,等.城市污泥和污泥与垃圾堆肥的农田施用对土壤性质的影响[J].农业环境保护,1994,13(5):204-20.
- ZHANG H Z, HUANG Y, LIU G, et al. Effects of sewage sludge and sewage sludge and garbage compost on soil properties [J]. Agricultural Environmental Protection, 1994, 13(5): 204-20.
- [23] OWOLOKO E A, OGUNTUNDE P E, ADEJUMO A O. A comparative analysis on the performance of the convoluted exponential distribution and the exponential distribution in terms of flexibility[J]. Journal of Mathematics & Statistics, 2016, 12(1):59-64.
- [24] 张哈芝,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.
- ZHANG H Z, HUANG Y, LIU G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environment Sciences, 2010, 19(11): 2713-2717. (in Chinese)
- [25] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1):9-20.
- [26] 宋桂龙,辜再元,郭宇,等.垃圾和污泥堆肥用作无土草皮基质的研究进展[J].草业科学,2010,27(6):58-63
- SONG G L, GU Z Y, GUO Y, et al. Research progress of waste compost and sewage sludge compost used as soilless sod media[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(6): 58-63. (in Chinese)
- [27] 姚金玲,王海燕,于云江,等.城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征[J].环境科学研究,2010,23(6):7-14.
- YAO J L, WANG H Y, YU Y J, et al. Pollution status and characteristics of heavy metals in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(6): 7-14. (in Chinese)
- [28] 张琪.污泥和矿化垃圾对土壤性状及黑麦草生长的影响[J].西北林学院学报,2011,26(5):111-115.
- ZHANG Q. Effects of applying sewage sludge and aged refuse on soil properties and growth of *Lolium perenne* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 111-115. (in Chinese)
- [29] 周立祥,胡霭堂,戈乃盼.城市生活污泥农田利用对土壤肥力性状的影响[J].土壤通报,1994,25(3):126-129.
- [30] 张翔,余真,张耿岐,等.污泥生物炭基堆肥对锰污染土壤水质及其修复的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(7):1277-1286.
- ZHANG X, YU Z, CHANG K L, et al. Effects of sludge biochar based compost on properties and remediation of soil contaminated by manganese [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(7): 1277-1286. (in Chinese)
- [31] 李振科.生物炭在农业生产中的应用研究进展[J].山西农经,2015 (1): 94-97.
- [32] 阿衣古丽·艾力亚斯,玉米提·哈力克,阿丽亚·拜都热拉,等.阿克苏市常见园林树种叶片重金属含量分布特征[J].西北林学院学报,2014,29(1):192-196.
- AYIGULI A, UMUT H, ALIYA B, et al. Distributions of heavy metal contents of common urban tree leaves in Aksu [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 111-115. (in Chinese)
- [33] 王新,陈涛,梁仁禄,等.污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究[J].应用生态学报,2002,13(2):163-166.
- WANG X, CHEN T, LINAG R L, et al. Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(2): 163-166. (in Chinese)
- [34] 王定美,王跃强,余震,等.污泥与稻秆共热解对生物炭中碳氮固定的协同作用[J].环境科学学报,2015,35(7):2202-2209.
- WANG D M, WANG Y Q, YU Z, et al. Synergistic effect on carbon and nitrogen fixation of biochar during co-pyrolysis of sewage sludge and rice straw[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(7): 2202-2209. (in Chinese)
- [35] 乔显亮,骆永明,吴胜春.污泥的土地利用及其环境影响[J].土壤,2000(2):79-85.
- QIAO X L, LUO Y M, WU S C. Land use of sewage sludge and its environmental impact[J]. Soils, 2000, (2): 79-85. (in Chinese)
- [36] HAMMERS K, TORN M S, LAPENAS A G, et al. Centennial black carbon turnover observed in a Russian steppe soils [J]. Biogeosciences, 2008(5):1339-1350,
- [37] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.
- [38] BROWN S L, CHANEY R L, ANGLE J S, et al. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator thlaspi caerulescens and metal tolerant silene vulgaris grown on sludge-amended soils[J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(6): 1581-1585.
- [39] 刘园,KHAN M J,靳海洋,等.秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J].土壤学报,2015,52(4):611-621.
- LIU Y, KHAN M J, JIN H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (4): 611-621. (in Chinese)
- [40] 刘新源,刘国顺,刘洪恩,等.生物炭施用量对烟叶生长、产量和品质的影响[J].河南农业科学,2014,43(2):58-62.