

生物炭施用对土壤健康的影响及其对烤烟生产的潜在风险

李彩斌¹, 张久权^{2*}, 陈雪¹, 张继光², 翟欣¹, 凌爱芬³

(1.贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节 551700; 2.中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101; 3.四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000)

摘要:近年来,生物炭受到各国科技工作者的广泛关注。大量研究表明,生物炭具有稳定性、多孔性、吸附性等优良特征,可提高土壤养分有效性和土壤微生物活性,改善土壤结构,增加碳固化,减少温室气体排放,对土壤重金属和其他有害有机物进行钝化失活等,因而是一种很有发展潜力的新型肥料和土壤改良剂。然而,生物炭因原料和裂解温度等的不同,可能向土壤输入重金属和有机污染物等有害物质,施入土壤后也可能产生一些对土壤健康和烤烟生长不利的负面作用,目前,人们对这些还缺乏全面系统的了解。笔者根据近年来国内外的研究结果进行综述,以期对生物炭的推广应用提供理论参考。

关键词:生物炭;土壤健康;风险;烤烟

中图分类号:S572.01

文章编号:1007-5119(2018)06-0091-07

DOI:10.13496/j.issn.1007-5119.2018.06.013

Effect of Biochar Application on Soil Health and its Potential Risks to Flue-cured Tobacco Production

LI Caibin¹, ZHANG Jiuquan^{2*}, CHEN Xue¹, ZHANG Jiguang², ZHAI Xin¹, LING Aifen³

(1. Bijie Tobacco Company of Guizhou Province, Bijie, Guizhou 551700, China; 2. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266101, China; 3. Liangshan Tobacco Company of Sichuan Province, Xichang, Sichuan 615000, China)

Abstract: In recent years, biochar has attracted a lot of attention from researchers over the world. Many studies have shown that biochar owns characteristics of stability, porosity, and adsorption, thus it can improve soil nutrient availability, energize soil microbes, improve soil structure, increase carbon sequestration, reduce greenhouse gas emissions, reduce soil heavy metals and other harmful organic contaminants by binding them in soils. Biochar thus is a very promising new fertilizer and soil amendment. However, biochar also has the potential to bring heavy metals, organic contaminants and some undesired influence into soils, depending on the feedstocks and pyrolysis temperature, which may produce some soil health and flue-cured production problems. A comprehensive and systematic understanding on these issues does not exist in the current literature. Therefore, this review summarizes the current knowledge in the effect of biochar application on soil health and its potential risks to flue-cured tobacco production based on recent experiment results, so as to provide some theoretical basis for biochar extension.

Keywords: biochar; soil health; risk; flue-cured tobacco

生物炭是在低氧或无氧条件下,对秸秆等生物质材料进行高温分解后的产物。由于其具有多孔性、吸附性、稳定性等特性^[1],近年来受到了土壤、农业和环境等学术界的广泛关注。生物炭在SCI期刊的发文量从2007年的7篇飙升到2017年的1492

篇,增长213倍,目前已经成为土壤学等领域的研究热点。生物炭能在减少温室气体排放、固碳、土壤改良^[2],提高土壤肥力^[3],土壤环境修复^[4]等方面能发挥巨大作用。施用生物炭对土壤和烤烟能产生大量有益的效果,但同时也可能会带来一部分风险,

基金项目:贵州省烟草公司毕节市公司项目“生物炭及炭基肥的应用效果研究及安全性评价”(2018520500240059);四川省烟草公司凉山州公司项目“凉山山地原生态特色烟叶关键生产技术研究应用与品牌开发”(LSYC201601)

作者简介:李彩斌(1989-),男,博士,主要从事烟草栽培方面的研究。E-mail:ynlcb2015@126.com。*通信作者,E-mail:zhangjiuquan@caas.cn

收稿日期:2018-08-23

修回日期:2018-10-25

如在某些条件下,生物炭可能会带来重金属、农药有效性、二噁英、多环芳烃化合物等方面的问题,也可能造成烤烟等作物对养分的不平衡吸收等负面效果。因此,笔者根据现有的研究结果,对生物炭施用对植烟土壤健康和烤烟生长的影响和风险进行综合评估,以期为生物炭的推广应用提供理论基础。

1 生物炭施用对土壤健康的影响

土壤健康主要是指土壤维持和提高作物产、质量的能力。参照国标 GB/T 33469—2016 耕地质量等级和康奈尔土壤健康评价体系^[5],结合我国主产烟区的实际情况,重点关注土壤物理指标,如土壤质地、土壤黏粒含量、土壤容重、田间持水量、总孔隙度、水稳性团聚体总量、土壤表层硬度、土壤次表层硬度;土壤化学指标,如土壤 pH、土壤有机质、活性有机质、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾、可溶性氯、交换性钙、交换性镁、有效锌、有效硼含量;土壤生物指标,如细菌和真菌数量及多样性、土壤酶活性、土壤蛋白等。

1.1 土壤物理指标

研究表明,生物炭的施用能够显著改善土壤物理性状,如提高土壤水稳性团聚体总量、土壤持水容量、土壤孔隙度,土壤比表面积,降低土壤容重等^[6]。施用生物炭有助于形成大团聚体,从而促进团聚体的整体稳定,改良土壤结构^[6]。OBIA 等^[7]研究发现,施用生物炭后,土壤水稳性团聚体含量增加了 17%~20%。OMONDI 等^[6]的研究表明,生物炭能显著降低土壤容重,但这种降低效果随生物炭的用量、原料种类和土壤类型的变化而不同。施用生物炭可以提高土壤饱和含水率和保水能力,MUKHERJEE 等^[8]发现,由于生物炭的施用,土壤持水性增加 1%~2%。生物炭的施用量每增加 1%,土壤总孔隙度增加 2%,土壤有效水含量增加 3%^[7]。总之,施用生物炭能显著改善土壤物理健康状况,提高土壤水分和氧气的供应能力,为烤烟生长提供有利条件。

1.2 土壤化学指标

研究表明,施用生物炭会引起诸多土壤化学健康指标的变化,如土壤 pH 值,CEC,土壤有机质和养分含量等。绝大部分生物炭由于其本身为碱性,施入土壤可以提高土壤 pH,对酸性土壤有明显的改良作用^[9]。生物炭由于其多孔性和较高的比表面积,能够吸附大量的交换性阳离子。施用生物炭后,土壤溶液中的磷、钾、钙等离子浓度大大增加,而活性 Al 离子浓度明显降低^[10]。施用生物炭能增加烟田土壤 pH 值、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量。生物炭对土壤碳、氮具有良好的调节作用。李志刚等^[11](2016)通过培养试验发现,在土壤中添加 2.0%生物炭能显著降低土壤总有机碳的矿化率,土壤有机碳含量提高,此结论也被张璐等^[12](2018)研究所证实,研究发现施用生物炭后,土壤总有机碳和活性有机碳含量在烤烟不同生育期都有大幅度增加。葛少华等^[13](2018)发现生物炭与氮肥配施能提高土壤氮素含量,减少氮肥用量,且连续施用对氮素固持和提高烤烟的氮肥利用率效果明显。

1.3 土壤生物指标

生物炭中含有一部分易分解的炭,可作为微生物生长的基质,因而生物炭的施用会刺激土壤微生物的生长和活性,并带来起爆效应^[14]。土壤微生物和生物炭的稳定性密切相关,一方面,生物炭能为微生物提供能源,促进微生物活动,并改变微生物的群落结构;另一方面,生物炭的稳定性取决于土壤中作为分解者的微生物类型。微生物群落的组成及其代谢过程对生物炭在土壤中的稳定性发挥重要作用^[15]。研究表明,施用生物炭后,特定微生物群落的改善与土壤中本身的和生物炭作为外源带入的可分解的有机炭均有关系^[16]。CHENG 等^[17](2006)报道,生物炭施用后第 1 个月内土壤微生物活性显著增加,随后逐渐变弱。HAMER 等^[18](2004)在实验室的研究结果也表明,所施生物炭的 0.79%会在 2 个月内被消耗掉。因此,可以推测,含有生物炭的复合肥(炭基肥)由于其中的炭能增

加微生物活性，养分循环应该会更好。在土壤酶方面，张继旭等^[19]（2016）发现，生物炭能增加土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶的活性。土壤酶活性通常是通过人造基质进行测定的，由于生物炭具有极强的吸附性，在测定酶活时基质和酶反应产物均可能被生物炭吸附，这样就给测定带来了很大的误差。对此，目前还没有更好的解决方案。因此，目前有关生物炭对土壤酶的影响报道较少，现有数据的准确性也有待提高。

2 生物炭施用对烤烟产质量的影响

2.1 烤烟生长和烟叶经济性状

张春等^[20]（2015）发现，施用生物炭能有效改善土壤的理化性质，为根系提供较好的生存环境，导致烟苗根系体积、根系表面积和根总长增加，且这种现象随着生物炭施用量的增加而增加。施用生物炭能显著促进烤烟旺长期后的生长，最终提高烤烟干物质质量^[3,21]。邢光辉等^[22]（2016）研究表明，生物炭施用量为 30 g/穴时，烤烟的经济效应最高，用量增加反而会降低烤烟经济效益，但这种效应会因土壤类型不同存在较大差异。毛家伟等^[23]（2013）研究也表明，施用生物炭后烤烟的产量增加 170.5 ~ 506.5 kg/hm²，产值增加 1146 ~ 7739 元/hm²，且随着生物炭用量的增加，烟叶产量和产值呈增加的趋势。王毅等^[24]（2018）在山东诸城也有类似发现。

2.2 烟叶质量

研究表明，施用生物炭后烟叶质量能得到提高，包括外观质量、化学成分协调性^[3,21]、评吸质量^[25]等。肖战杰等^[25]研究表明，施用生物炭能改善烟叶外观质量，能不同程度地提高烟叶成熟度，增加烟叶油分及弹性。在生物炭对烟叶化学成分的影响方面，人们做了大量研究。薛超群等^[26]研究发现，生物炭的施用对烟叶香气物质含量有显著影响，生物炭用量太高和太少都对烟叶香气物质含量不利，当生物炭用量为 600 kg/hm² 时烟叶总香味物质含量最高。肖战杰等^[25]（2015）发现，施用生物炭后烟叶的总糖及还原糖含量下降，总氮、烟碱和钾含量增加，烟叶化学成分更加协调。赵殿峰等^[21]（2014）

的研究也表明，生物炭能显著提高烟叶内化学成分的协调性，但过量施用对烟叶质量不利。施用生物炭还有利于成熟期烟叶色素的代谢及调制后烟叶中性致香物质的形成；提高烤后烟叶类胡萝卜素降解产物、西柏烷类降解产物、新植二烯及致香物质总量，提高烤后烟叶化学成分的协调性^[22]；显著降低污染土壤中烤烟叶片镉^[27]和汞对烟草的危害，抑制烟草对汞的富集，提高烟叶的保护酶活性。王毅等^[24]报道，在大田施用秸秆生物炭后，烤烟中部叶身份、油分及外观质量总分显著增加，中、上部叶含钾量分别显著提高 8.39% 和 22.63%。施用生物炭能明显改善烟叶品质。施用生物炭对烟叶钾含量的显著提高也被其他学者证实^[28]。然而，上述效应会因生物炭用量和种类、土壤类型、气候条件而异，目前有关生物炭对烤烟生长、产量和质量等的研究刚刚起步，还没有达成一致的结论，尤其是许多机理还缺乏系统研究。

3 生物炭的潜在风险

到目前为止，大多数学者主要关注施用生物炭的积极作用，对其不足和潜在风险研究较少，尤其是环境方面的风险，存在较大的知识缺口^[29]。为了充分发挥生物炭的应用潜力，有必要对其不足和潜在风险进行深入研究，以便制定和实施更好的控制和管理措施。生物炭对环境的负面影响主要与热解过程^[30]和土壤污染有关。生物炭可能会释放多环芳烃化合物(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、二噁英、酞酸酯和向土壤中输入外源重金属^[31]；也可能抑制微生物活性^[32]等。

3.1 生物炭在土壤中的稳定性

由于其芳香结构，生物炭中的一些化合物在土壤中可以长时间保存。生物炭在土壤中的分解速度与 C/N 和活性炭(labile C)含量密切相关。对生物炭在土壤中的贮存年限进行模拟试验，结果发现生物炭施入土壤后，在土壤中的贮存时间可达 1000 ~ 10 000 年^[33]。生物炭的贮存时间与其分解能力呈反比关系，随着热解温度的升高，生物炭的稳定性增加，在土壤中的贮存更长^[34]。由于生物炭一般为

粉状,施入土壤后很难将其清除,施用前如果对其负面影响认识不足,事先没有做好预防措施,对土壤和烤烟等会带来长期的破坏作用。

3.2 农药有效性和残留

虽然生物炭主要是作为一种土壤改良剂,但其在农药有效性方面的作用一直受到人们的关注^[35]。人们发现,土壤中的生物炭不仅能吸附农药,而且还会改变农药的吸附机制和生物有效性^[36]。关于生物炭对农药吸附的有益影响人们进行了大量研究^[15,37]。但有关生物炭对农药吸附和解吸所带来的负面影响,如农药效果降低,额外的毒害作用等少见报道。

人们普遍认为,减少农药的生物利用度是减少农药对土壤和水污染最有效的一种方法,因其能够减少动、植物对农药的积累和毒性^[38]。大量研究表明,生物炭可以吸附、螯合和代谢土壤中的农药,从而显著减少农药对土壤的污染^[35,37,39]和因淋失而造成的地下水污染^[35]。TATARKOVA 等^[37] (2013)发现,生物炭由于其高吸附能力而导致土壤中二甲四氯的扩散和植物吸收量显著下降,从而降低其利用度。CAO 等^[40]研究表明,生物炭对阿特拉津(atrazine)有很强的吸附力,溶液中的去除率高达77%。因此,生物炭会对农药产生吸附,减少扩散,降低环境污染和对人类健康的为害。

由于生物炭与农药的相互作用,土壤中农药的利用度降低,残留时间延长,烤烟等植物吸收减少,农药功效减弱^[39]。即使是施用少量生物炭,敌草隆的生物降解也会受到抑制^[41]。YU 等^[39]发现生物炭能对新烟碱类农药产生吸附,限制其扩散,降低其效果。YANG 等^[36]发现小麦和水稻秸秆生物炭对敌草隆的吸附能力比土壤强 2500 倍。因此,生物炭施用后,为了达到预期的效果,某些农药的用量应该增加,尤其是除草剂和土壤杀虫剂等施入土壤的农药,但这样会给农民带来额外购买农药的成本。

3.3 二噁英

生物炭是在低氧或缺氧条件下形成的,其生产过程可能会产生二噁英等剧毒物质^[42]。联合国环境规划署已将其列为持久性有机污染物(Persistent

Organic Pollutants, POPs)。POPs 不仅在环境中表现出三致性(致癌、致畸、致突变),还具有内分泌干扰特性,其危害已为人们所公认,并引起了公众与研究者的关注。

原料中的氯是生产生物炭热解过程中二噁英形成的主要来源。秸秆、禾草、食品废弃物等都可能含有氯化钠等氯源。其他生物炭原料,如来源于盐碱地或沿海的原料,也可能含有较高的氯离子,制作生物炭容易产生二噁英。此外,城市垃圾和其他含有聚氯乙烯(PVC)或其他含氯塑料也是生物炭二噁英的主要来源^[42]。城市固体废弃物如废管、板材、薄板、瓷砖、玩具、油漆和粘合剂等都含氯,用他们生产生物炭不可避免的会产生二噁英^[43]。所幸的是,烤烟种植过程中对氯离子进行了严格控制,采用废弃烟叶和烟秆所生产的生物炭,二噁英含量应该极低。除了原料来源外,热解温度对二噁英的产量也有很大影响。二噁英主要在 200~400 °C 热解温度范围内产生,在生物炭的生产温度为 300 °C 时,二噁英浓度最高,达到 12.2 pg/g^[42]。LYU 等^[44]也发现,当木屑在 300 °C 进行热解生产生物炭时,二噁英的产量高达 610 pg/g。总之,学者们已经发现生物炭含有二噁英,有可能随生物炭的施用进入土壤产生危害。

3.4 PAH 等有机污染物

多环芳烃(PAH)是由苯环组成的有机化合物,具有剧毒性、诱变性和强致癌性等特点,被欧盟和美国环保署(EPA)列为重点高危化合物^[45]。研究表明^[46],生物炭含有相当数量的 PAH,施用生物炭可能会提高 PAH 在土壤中的含量,对环境和人类健康造成严重危害^[45]。由于 PAH 具有疏水性,能被土壤颗粒所吸附,其在土壤中的持久性可能会对烤烟等植物、土壤微生物和无脊椎动物产生极端的毒性作用^[45]。据报道,热解温度、生物炭生产方法和生物质原料是影响 PAH 分布和浓度的重要因素。然而,文献中各种研究结论存在差异。研究表明,由草本植物制成的生物炭 PAH 含量显著高于木本植物的生物炭,且低温制作的生物炭 PAH 比高温制作

的生物炭多^[30]。KUSMIERZ^[45]等发现,当小麦秸秆生物炭的用量达到45 t/hm²时,土壤中的PAH浓度增加了5倍,且PAH的 $\Sigma 16$ 浓度高达33.7 mg/kg,造成了严重的土壤污染。

3.5 重金属

生物炭由于其丰富的孔隙和巨大的比表面,能够大量吸附土壤中的重金属,使其失活,降低重金属的毒害作用。但也有报道提到,生物炭施用后,土壤可溶性有机质增加,pH值降低,形成了更多的“重金属-可溶性有机物”复合物,土壤重金属的有效性和可移动性反而会提高,这样有可能增加烤烟等植物中重金属的吸收和含量,严重的甚至有造成植物死亡的现象^[47]。另一方面,原料中的重金属一般会原封不动地转移到生物炭中,随生物炭的施用进入土壤。Cd、Cr、Pb、Hg、As等重金属均有可能残存于生物炭中^[48]。从而造成土壤中的重金属含量和有效性增加^[31],影响烤烟等作物的生长和产量。

3.6 土壤生物

土壤生物对土壤养分和碳循环具有关键作用,也是衡量土壤健康质量的重要指标。生物炭对土壤生物具有积极的和负面的双重作用,早期的研究主要集中在积极作用方面,但近期也发现了一些负面影响。CHEN等^[14]报道,生物炭能抑制土壤微生物的生长,在某些情况下,通过释放一些有毒物,对土壤生物产生严重的毒害作用。OLESZCZUK等^[46]等发现,土壤PAH浓度与其对土壤生物的毒性有显著的相关性。生物炭能造成细菌活性下降已被多种迹象所证实,如甲烷氧化减少、产生N₂O和乙烯等抗菌化合物^[32]。KHAN等^[29]发现,稻草、稻壳和木屑生物炭的施用降低了根瘤菌、铁氧化菌和硫还原菌的量,从而导致了土壤健康质量下降。研究表明某些类型的生物炭对土壤中的蚯蚓具有负面的影响^[49]。生物炭不仅增加了蚯蚓的死亡率,而且由于蚯蚓与土壤的交互作用,使土壤重金属的浸出增加,并影响了土壤养分的有效性。土壤生物的多样性对土壤健康非常重要,对诸多土壤指标如土壤结构、土壤通气性、养分循环、水分利用、碳储存能力和

抗病性等具有很大影响。因此,有必要进行更深入的研究,弄清生物炭与土壤生物的关系,以期减少生物炭对土壤生物的负面影响。

4 结论与展望

施用生物炭能带来固炭、减少温室气体排放、提高土壤肥力和烤烟产、质量等多重效益。这种效应在酸性土壤和粗质地土壤中尤其明显。然而,目前的大部分结果来自于室内模拟试验、盆栽试验和短期的田间试验,缺乏说服力。尽管生物炭能产生广泛的积极影响,但风险仍然存在,主要涉及重金属、有毒化合物、农药残留等问题,需要进一步研究。笔者认为,针对生物炭施用后的土壤健康和烤烟产、质量问题,重点需要研究以下两方面的问题。

(1) 开展烟田施用生物炭的长期定位试验,研究生物炭对土壤理化性状、烤烟产质量的长期影响,对生物炭的施用效果进行全面评价。

(2) 开展生物炭对农药、重金属、PAH等有害有机化合物的长期影响方面的研究,以及这些影响对土壤健康和烤烟产、质量的影响研究,并弄清其影响机理,找出合理的解决方案。

参考文献

- [1] BLANCO C H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [2] 刘会,朱占玲,彭玲,等. 生物炭改善果园土壤理化性状并促进苹果植株氮素吸收[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 454-460.
LIU H, ZHU Z L, PENG L, et al. Applying biochar to improve soil physical and chemical properties and nitrogen utilization by apple trees[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 454-460.
- [3] 牛政洋,闫伸,郭青青,等. 生物炭对两种典型植烟土壤养分、碳库及烤烟产质量的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 155-161.
NIU Z Y, YAN S, GUO Q Q, et al. Effects of biochar on yield and quality of flue-cured tobacco and nutrients and carbon pool in two typical soils planted with tobacco[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 155-161.
- [4] GODLEWSKA P, SCHMIDT H P, OK Y S, et al. Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 193-202.

- [5] 盛丰. 康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1289-1296.
SHENG F. Introduction and application of cornell soil health assessment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1289-1296.
- [6] OMONDI M O, XIA X, NAHAYO A, et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data[J]. Geoderma, 2016, 274: 28-34.
- [7] OBIA A, MULDER J, MARTINSEN V, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155: 35-44.
- [8] MUKHERJEE A, LAL R. The biochar dilemma[J]. Soil Research, 2014, 52(3): 217-230.
- [9] 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.
- [10] YAMATO M, OKIMORI Y, WIBOWO I F, et al. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, 52(4): 489-495.
- [11] 李志刚, 张继光, 申国明, 等. 烟秆生物质炭对土壤碳氮矿化的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(2): 16-22.
LI Z G, ZHANG J G, SHEN G M, et al. Study on the effects of tobacco stem biochar on soil organic carbon and nitrogen mineralization[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(2): 16-22.
- [12] 张璐, 任天宝, 阎海涛, 等. 不同有机物料对烤烟根际土壤碳库、酶活性及根系活力的影响[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(2): 39-45.
ZHANG L, REN T B, YAN H T, et al. Effects of different organic materials on rhizosphere soil carbon pool, enzyme activity and root activity of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2018, 39(2): 39-45.
- [13] 葛少华, 丁松爽, 杨永锋, 等. 生物炭与化肥氮配施对土壤氮素及烤烟利用的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 84-92.
GE S H, DING S S, YANG Y F, et al. Effects of mined application of biochar and nitrogen fertilizer on effective nitrogen in soil and nitrogen accumulation in flue-cured tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(2): 84-92.
- [14] CHEN J, LI S, LIANG C, et al. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 24-33.
- [15] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota-a review[J]. Soil Biol Biochem, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [16] NOVAK J M, BUSSCHER W J, WATTS D W, et al. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typical kandiudult[J]. Geoderma, 2010, 154(3-4): 281-288.
- [17] 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.
- [18] HAMER U, MARSCHNER B, BRODOWSKI S, et al. Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(7): 823-830.
- [19] 张继旭, 张继光, 张忠锋, 等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 36(5): 16-21.
ZHANG J X, ZHANG J G, ZHANG Z F, et al. Effects of straw biochar on tobacco growth, soil organic carbon and soil enzyme activities[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 36(5): 16-21.
- [20] 张春, 赵浩淳, 郭涛, 等. 生物炭用量对烟苗生长的影响[J]. 烟草科技, 2015, 48(6): 9-12, 26.
ZHANG C, ZHAO H C, GUO TAO, et al. Influences of biochar application rate on tobacco seedling growth[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(6): 9-12, 26.
- [21] 赵殿峰, 徐静, 罗璇, 等. 生物炭对土壤养分、烤烟生长以及烟叶化学成分的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 85-92.
ZHAO D F, XU J, LUO X, et al. Effect of biochar on soil nutrients, growth and chemical composition of tobacco [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinic, 2014, 23(3): 85-92.
- [22] 邢光辉, 典瑞丽, 陈光辉, 等. 施用生物炭对烤烟根系生长和经济性状的影响[J]. 作物研究, 2016, 30(5): 549-554.
XIN G H, DIAN R L, CHEN G H, et al. The effects of biochar application on root growth and economic characters of tobacco[J]. Crop Research, 2016, 30(5): 549-554.
- [23] 毛家伟, 张锦中, 张翔, 等. 豫东烟区生物炭对烤烟生长发育及经济性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(35): 13516-13517.
MAO J W, ZHANG J Z, ZHANG X, et al. Influence of biocarbons on growth and economic characters of tobacco in east Henan tobacco producing regions[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(35): 13516-13517.
- [24] 王毅, 宋文静, 吴元华, 等. 小麦秸秆还田对烤烟叶片发育及产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(2): 32-38.
WANG Y, SONG W J, WU Y H, et al. Effects of returning wheat straw to soil on leaf development, yield and quality of tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2018, 39(2): 32-38.
- [25] 肖佳冰, 张文静, 李莉, 等. 生物炭不同用量对烤烟外观质量、化学成分和经济性状的影响[J]. 山东农业科

- 学, 2016, 48(3): 82-85.
- XIAO J B, ZHANG W J, LI L, et al. Effects of different biochar application rates on appearance quality, chemical compositions and economic characters of flue-cured tobacco[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(3): 82-85.
- [26] 肖战杰, 肖佳冰, 李莉, 等. 不同生物炭施用量对烤烟中性致香成分与评吸质量的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(12): 69-73.
- XIAO Z J, XIAO J B, LI L, et al. Effects of different biochar application rates on neutral aroma components and smoking quality of flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(12): 69-73.
- [27] 李岭, 刘冬, 吕银斐, 等. 生物炭施用对镉污染土壤中烤烟品质和镉含量的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 228-232.
- LI L, LIU D, LV Y F, et al. Effect of adding biochar to cd contaminated tobacco soil on flue-cured tobacco quality and cd content[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(2): 228-232.
- [28] 高林, 王瑞, 张继光, 等. 生物炭与化肥混施对烤烟氮磷钾吸收累积的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(2): 19-24.
- GAO L, WANG R, ZHANG J G, et al. Effects of mixed application of biochar and chemical fertilizers on uptake and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38(2): 19-24.
- [29] KHAN T F, AHMED M M, HUQ S M I. Effects of biochar on the abundance of three agriculturally important soil bacteria[J]. Journal of Agricultural Chemistry and Environment, 2014, 3(2): 31-38.
- [30] TAN X, LIU Y, ZENG G, et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions[J]. Chemosphere, 2015, 125: 70-85.
- [31] QIAN K, KUMAR A, ZHANG H, et al. Recent advances in utilization of biochar[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1055-1064.
- [32] ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M-Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. Soil Biol Biochem, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [33] SWIFT R S. Sequestration of carbon by soil[J]. Soil Science, 2001, 166(11): 858-871.
- [34] PENG X, YE L L, WANG C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 112(2): 1591-66.
- [35] AHMAD M, RAJAPAKSHA A U, LIM J E, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review[J]. Chemosphere, 2014, 99: 19-33.
- [36] YANG Y N, SHENG G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(16): 3635-3639.
- [37] TATARKOVA V, HILLER E, VACULIK M. Impact of wheat straw biochar addition to soil on the sorption, leaching, dissipation of the herbicide (4-chloro-2-methylphenoxy) acetic acid and the growth of sunflower[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 92: 215-221.
- [38] SOHI S P. Carbon Storage with Benefits[J]. Science, 2012, 338(6110): 1034-1035.
- [39] YU X Y, MU C L, GU C, et al. Impact of woodchip biochar amendment on the sorption and dissipation of pesticide acetamiprid in agricultural soils[J]. Chemosphere, 2011, 85(8): 1284-1289.
- [40] CAO X, HARRIS W. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5222-5228.
- [41] ZHANG P, SHENG G Y, FENG Y C, et al. Role of wheat-residue-derived char in the biodegradation of benzonitrile in soil: nutritional stimulation versus adsorptive inhibition[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(14): 5442-5448.
- [42] HALE S E, LEHMANN J, RUTHERFORD D, et al. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(5): 2830-2838.
- [43] COWIE A L, DOWNIE A E, GEORGE B H, et al. Is sustainability certification for biochar the answer to environmental risks?[J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 2012, 47(5): 637-648.
- [44] LYU H, HE Y, TANG J, et al. Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1-7.
- [45] KUSMIERZ M, OLESZCZUK P, KRASKA P, et al. Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar-amended soil[J]. Chemosphere, 2016, 146: 272-279.
- [46] OLESZCZUK P, JOSKO I, KUSMIERZ M. Biochar properties regarding to contaminants content and ecotoxicological assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 375-382.
- [47] VENEGAS A, RIGOL A, VIDAL M. Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2015, 119: 190-198.
- [48] STEFANIUK M, OLESZCZUK P, BARTMINSKI P. Chemical and ecotoxicological evaluation of biochar produced from residues of biogas production[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 318: 417-424.
- [49] LIESCH A M, WEYERS S L, GASKIN J W, et al. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival[J]. Annals of Environmental Science, 2010, 4(1): 1-9.