

生物质炭修复有机物污染土壤的研究进展^①

郭彦蓉¹, 曾 辉¹, 刘阳生^{2*}, 李占宇¹

(1 北京大学深圳研究生院, 循环经济重点实验室, 广东深圳 518055;

2 北京大学环境科学与工程学院, 北京市固体废弃物资源化技术与管理重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 生物质炭由于其特殊的多孔性结构、强的吸附性能, 以及富含多种营养元素和特殊官能团等特点, 成为近年来在农业应用和环境污染治理方面的热点。本文介绍了生物质炭的基本特性, 提出生物质炭可能在今后成为活性炭的替代品; 综述了生物质炭在修复有机物(石油烃、有机农药、PAHs、PCBs)污染土壤中的研究进展, 并探讨了生物质炭应用于污染土壤修复的环境风险。生物质炭在修复有机物污染土壤方面有巨大的潜力, 但在大规模应用之前还需要做长期深入的研究。

关键词: 生物质炭; 土壤; 有机物污染; 环境风险

中图分类号: X5

农药的大量使用、城市污水和污泥的农用、石油化工产品的泄露、污染物就地排放以及大气污染物沉降等, 造成了严重的土壤有机物污染问题。土壤中的污染物经过食物链进入人体, 严重威胁人体健康。土壤中有机污染物的类型主要有石油烃类、酚类、有机农药类、多环芳烃类以及多氯联苯类等。现有的有机污染土壤的修复方法主要有: 热分解法^[1]、蒸汽浸提法^[2]、表面活性剂法、有机溶剂萃取法、光化学催化降解法、吸附固定法、微生物代谢降解或者固定和植物固定和吸收等。但很多方法由于破坏土壤结构、带来二次污染、修复条件局限性强或者成本过高等问题, 不能在实际中得到很好的推广应用。

近年来国内外一些土壤学和环境科学学者将目光转移到了一种新兴复合材料生物质炭上。生物质炭不仅是一种新型能源^[3]和新型碳汇^[4-5], 而且在改善土壤质量、改良酸性土壤^[6-7]、增加作物产量^[8]、去除水体和土壤中的污染物等方面有一定的成效, 在农业和环境领域有巨大应用前景。Petter 等^[9]在巴西地区将生物质炭作为改良剂加入到土壤中, 10 年发现土壤的肥力和营养状况显著增强。匡家婷^[10]研究发现生物质炭可以显著降低土壤中有效态铜锌的含量, 对铜锌污染土壤有很好的修复效果。

现阶段, 生物质炭在改良土壤质量、修复重金属

污染方面已经取得了一定的进展, 但是对于修复有机物污染土壤还处于试验阶段。为了解生物质炭在修复有机污染土壤方面的应用进展和修复效果, 是否有推广应用价值以及应用风险等, 本文综述了近年来生物质炭在修复有机物污染土壤方面的应用以及存在的环境风险, 为今后运用生物质炭修复有机物污染土壤提供参考。

1 生物质炭的基本性质

生物质炭(biochar, BC), 是指由富含碳的生物质在厌氧或者绝氧的条件下通过裂解或者不完全燃烧, 生成的一种含碳丰富的固体物质。常用于制造生物质炭的原料有: 秸秆等农业废弃物, 林业产品加工产生的木屑、锯末, 食品加工的壳、皮, 动物代谢粪便, 以及城市污泥等^[11]。将生物质原料转化为生物质炭, 不仅实现了废弃资源的高附加值再利用, 还大大地减少了可再生能源的利用。

生物质炭主要由单环和多环的芳香族化合物组成, 具有较高的化学和生物学稳定性; 主要由 C、H、O、N 等元素组成, 同时含有大量 P、S、K、Ca、Mg 等植物所需的营养元素^[12]; 一般呈碱性, 据文献报道其 pH 为 5~12^[13]; 具有复杂的孔隙结构和很大的比表面积, 吸附能力极强; 表面含有丰富的 -COOH、

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077002)资助。

* 通讯作者(yshliu@pku.edu.cn)

作者简介: 郭彦蓉(1990—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤、城市污泥的处理与处置。E-mail: guoyanrong1990@126.com

-COH 和 -OH 等含氧官能团，它们产生的表面负电荷使生物质炭具有较高的阳离子交换量 (CEC)^[14-15]。

生物质炭在很多方面与生产应用较为成熟的活性炭(AC)类似，但是其在原料来源、生产成本等方面有着更为明显的优势^[16]。表 1 对比了生物质炭和活性炭

的某些性能。活性炭在饮用水深度处理、制药行业等精度要求高的行业更为适合，而对于水中污染物的处理、污染土壤的修复等方面，生物质炭由于其来源广泛、成本低廉更为适合。并且随着生物质炭的生产技术进一步提高，很可能在今后成为活性炭的替代品^[13]。

表 1 生物质炭与活性炭的性能比较
Fig. 1 Performance comparison of BC and AC

项目	生物质炭(BC)	活性炭(AC)	对比
作用原理	表面吸附、静电作用、化学沉淀	表面吸附、催化作用	AC 仅依靠表面吸附，其吸附容量有限；BC 具有多种作用，对于复合污染的修复能力更强 ^[13]
性能表征	发达的孔隙结构、较高的比表面积、较高的稳定性	发达的孔隙结构、高比表面积 (500 ~ 3 000 m ² /g)、高稳定性 ^[17]	与 BC 相比，AC 具有更大的比表面积和吸附能力，以及更好的稳定性
主要原料	农副产品的废料、动植物残体等废弃资源	煤、木屑、果壳等	与 AC 相比，BC 的生产原料来源更为广泛，节省了不可再生能源，并实现了废弃资源的高附加值再利用
元素组成	C(>60%) ^[13] H、O、N、S、K、Ca 等	主要以 C 为主(80% ~ 90%)，含有少量杂质 ^[18]	BC 中含有植物可利用的元素，加入土壤中利于植物生长；而 AC 中的其他元素可能限制其吸附和催化性能
生产条件	生产条件简单，生产成本较低	生产条件要求高，生产成本高	BC 生产过程简单，成本低，比 AC 更具有市场竞争力

2 生物质炭在有机污染土壤修复中的应用

生物质炭对有机污染物的去除机理，主要有以下几方面：生物质炭的弱碱性、多孔性，以及能够保持水分和空气的特点为微生物的聚集提供了条件。添加生物质炭到土壤中可以激活土著微生物的活性，促进其对有机污染物的代谢活性^[19]；生物质炭由于其多孔性以及巨大的比表面积，可作为特殊功能微生物的良好载体，辅助微生物的修复作用；生物质炭有良好的吸附能力，将污染物吸附到其周围，减少污染物在土壤中的浓度和生物可利用性，改变其迁移、降解规律；生物质炭的复杂孔隙结构对大分子有机污染物有固定作用；生物质炭有强极性，对有机物质的亲和能力强，有效地去除有机污染物^[13]。且通常生物质炭对有机污染物的去除作用是几种机理共同作用的结果。

基于上述的机理，一些学者已经将生物质炭应用到了有机污染土壤的修复当中。石油烃类(TPHs)、有机农药类、多环芳烃类(PAHs)以及多氯联苯类(PCBs)是土壤中最常见的有机污染物。生物质炭已经应用到了以上几种有机污染土壤的修复当中，并取得了一定的进展。应用到其他类有机污染土壤修复的报道相对较少。

2.1 石油烃类(TPHs)污染土壤的修复

石油烃是目前环境中广泛存在的有机污染物之一，包括汽油、煤油、柴油、润滑油、石蜡和沥青等，是多种烃类(正烷烃、支链烷烃、环烷烃、芳烃)和少量其他有机物如硫化物、氮化物、环烷酸类等的混合

物^[20]。在石油开采加工场所、加油站、石油泄漏场地以及道路两边的农田中含量较高。

生物质炭的加入，会促进土壤中污染物的生物降解作用。Bushnaf 等人^[21]向被挥发性石油烃污染的有氧砂壤中加入了 20 g/kg 的生物质炭，用以研究生物质炭的加入对石油烃类污染物降解作用的影响。结果显示，虽然加入生物质炭后被吸附的石油烃污染物增加，但支链、环状以及分支烷烃的快速降解加速了整体石油烃的降解速率，被生物降解的污染物总量较未加入生物质炭时增加显著。

生物质炭由于其巨大的比表面积，也可作为特殊微生物的载体，特殊微生物进入土壤中发挥其特殊功能。Khokhlova 等人^[22]将生物炭表面固定石油氧化微生物加入到石油污染的土壤中，对土壤中石油组分的降解性能进行了研究。结果表明，10 ~ 14 天后石油生物降解率达到 40% ~ 50%，30 ~ 40 天后石油污染物降解率超过 90%，土壤中石油烃含量下降至 2% ~ 3%。该方法对土壤中的石油污染物具有较高的降解率。

2.2 农药类污染土壤的修复

农药包括除草剂、杀虫剂、杀菌剂等，其作用是为了抑制杂草的生长和控制病虫害。但是喷洒到农田中的农药，有很大一部分随着地表径流和大气流动而带入到水环境和空气当中，造成了严重的水体和空气污染，也加大了人体的暴露水平。由于这部分农药的流失，使得土壤中农药的浓度不足，进而会导致农药更大力度的使用。也有部分农药没有起到作用而自然分解，产生了很多的中间产物滞留在土壤当中，带来土壤污染、土壤板结等问题。

目前生物质炭在农药方面的应用主要集中在将生物质炭作为除草剂和杀虫剂等农药的缓释载体。可以很好地解决上述农药使用当中的问题。

生物质炭加入到农田土壤中可以改变农药的迁移转化途径和降解规律。Jones 等人^[22]评估了生物质炭对于土壤中除草剂西玛津的吸附、降解和浸出作用的影响。研究得出, 10 ~ 100 t/hm² 的生物质炭投加量可以影响西玛津在土壤中的空间分布和生物利用性。¹⁴C 的示踪试验表明, 生物质炭对西玛津的强烈吸附作用抑制了其生物降解作用和地表径流, 减少了除草剂的重复用量和人体暴露机会。

不同的生物质炭投加量对农药的作用有所差异。Sopena 等人^[24]发现, 20 g/kg 和 40 g/kg 的生物质炭投加量均可以增加异丙隆的吸附, 而 1 g/kg 的投加量对异丙隆没有显著的吸附作用, 但是 3 种投加率都可以减少异丙隆的矿化。生物质炭的加入可以很好地保持异丙隆的除草效力, 也大大地减少了其由降解作用带来的中间产物的污染。

此外, 生物质炭加入到不同类型的土壤中其作用也不尽相同。Yu 等人^[25]研究了在不同的土壤中, 用废旧刨花做成的生物质炭对烟碱类杀虫剂啶虫脒的吸附作用和损耗的差别。研究发现, 生物质炭对啶虫脒的吸附作用由大到小为: 红土 > 水稻土 > 黑土。且啶虫脒的损耗在添加生物质炭的土壤中较缓, 杀虫作用更为持久。

土壤中添加生物质炭, 可以影响植物体对于污染物的吸收作用。Yu 等人^[26]对比研究了土壤中是否添加生物质炭, 对植物体对杀虫剂的吸收作用的影响。结果表明, 在添加了 10 g/kg 的生物质炭的土壤中, 其植物残体内的杀虫剂毒死蜱和卡巴呋喃只有空白试验中的 10% 和 25%。证明土壤中添加生物质炭可以大大地减少植物体对杀虫剂的吸收, 减少了其在食物链中的流动。

不过, 也有人指出农田土壤中添加生物质炭会抑制农药的正常功效。Graber 等^[27]研究指出, 由于生物质炭对杀虫剂的吸附能力过强, 导致杀虫剂不能发挥其功效, 反而不能有效地控制农田中的虫害。

2.3 多环芳烃(PAHs)污染土壤的修复

多环芳烃是指 2 个或 2 个以上的苯环稠合在一起的一类化合物, 是环境中普遍存在的一种持久性有机污染物。该类化合物常被吸附于土壤颗粒上, 在土壤中有较高的稳定性^[28]。且易分配到生物体内, 通过食物链在生物体内富集和放大^[29]。

生物质炭加入土壤可促使土壤中的污染物向生物质炭中转移, 从而降低污染物在土壤中的浓度, 减

少植物体的吸收。

Gomez-Eyles 等人^[30]向受 PAHs 污染的石灰质土壤中加入生物质炭, 56 天后, 发现土壤中总的 PAHs 的浓度由 440 mg/kg 降低至 306 mg/kg, 其中生物可利用部分的浓度由 276 mg/kg 降至 182 mg/kg。同时研究指出, 生物质炭在土壤修复领域具有很大的潜力, 但是需要对其的长期利用做出评估。

史明等人^[29]通过等温吸附试验以及玉米幼苗的盆栽试验, 研究了加入生物质炭对土壤吸附菲的性能以及玉米幼苗对土壤中菲的吸收量的影响。结果表明, 生物质炭的加入使土壤对菲的吸附能力显著增强, 并且有效地减少玉米幼苗对土壤中菲的吸收。

也有人将生物质炭与微生物修复技术联用, 把污染物降解能力强的微生物吸附在生物质炭表面, 对土壤有机物污染进行修复研究。Chen 等^[31]以生物质炭作为微生物的载体, 用固定微生物的技术对土壤中 PAHs 进行修复实验。研究发现, 生物质炭增强了土壤中 PAHs 的可移动性, PAHs 被生物质炭吸附并以高浓度聚集在其周围, 被附着在活性炭上的微生物所分解, 从而大大地降低了土壤中 PAHs 的浓度, 提高了生物降解的效率。

生物质炭也被应用到改良污泥。花莉等^[32]研究得出, 生物质炭可以作为污泥堆肥调理剂, 可以有效限制污泥-土壤体系中多环芳烃在环境中的迁移, 解决了污泥农用中的环境污染问题, 降低潜在的污染风险。

2.4 多氯联苯(PCBs)污染土壤的修复

PCBs 是一类性质稳定、在土壤中滞留时间长的持久性有机污染物, 可通过植物吸收进入食物链, 在机体中富集, 具有很强的致癌性, 是目前土壤中主要的有机污染物之一。

目前单独研究用生物质炭修复土壤 PCBs 污染的研究相对较少, 现有的研究主要是在降低 PCBs 的生物有效性方面。Denyes 等人^[33]在 PCBs 浓度高达 3.1 μg/g 的污染场地添加不同质量比的生物质炭, 对 PCBs 的生物可利用性和植物有效性进行了研究。结果发现, 施加了生物质炭后, 该污染场地的地上生物量和蠕虫存活率均增加, 且用以研究的蚯蚓体内和 *Cucurbita pepo* L. 植物根系中和嫩芽中的 PCBs 均比对照实验中的少; 且随着生物质炭施加量的增加, 生物体内的 PCBs 含量越少。在土壤中施加生物质炭可以减少有机污染物的生物有效性, 减少其进入食物链的可能。

3 生物质炭应用于土壤修复的环境风险研究

随着生物质炭在土壤改良和修复方面研究的兴

起,也有人开始着重研究生物质炭在加入土壤后的稳定性以及土壤环境风险。

3.1 生物质炭对土壤的影响

生物质炭加入到土壤中会引起土壤一些性质的变化。花莉等^[34]发现秸秆生物质炭的添加对土壤中的养分具有较好的持留功能,并能有效减少水冲刷造成的氮磷流失。周桂玉等人^[35]向土壤中添加秸秆生物质炭和松枝生物质炭培养 45 天后,土壤有机碳含量、胡敏酸和富里酸含量、有效养分含量都有不同程度的增加。但是也有一些负面的研究发现:章明奎和唐红娟^[36]发现虽然施用生物质可在短时间内增加微生物量碳,但随着培养时间的增加,其微生物量碳逐渐下降,而且长期单一施用生物质炭可能会引起土壤有机质生物活性的下降。

3.2 生物质炭上的污染物

一些研究指出,施加生物质炭可能会将其上附着的污染物带入到土壤当中。Xu 等人^[37]提出生物质炭是土壤腐殖质中高芳香结构物质的可能来源。仓龙等人^[38]研究发现,不同有机废弃物来源制备的生物质炭中均含有一定量的重金属 (0.301 ~ 128 mg/kg) 和多环芳烃 (1.48 ~ 5.48 mg/kg); 高温制备有助于降低生物质炭中的多环芳烃含量; 低施用量的田间条件下,生物质炭的施用不易对土壤造成多环芳烃的环境风险,但在高施用量条件下,生物质炭中含有的多环芳烃容易使土壤中多环芳烃含量达到中度或重度污染的程度。Rogovska 等人^[39]也发现有一部分生物质炭由于其附带了如 PAHs 等有毒物质,对植物种子的萌发率和嫩芽的生长存在一定的副作用。

但是, Freddo 等人^[40]发现,不同热解温度和原材料制作出的生物质炭中 PAHs 的含量由 0.08 ~ 8.7 mg/kg 不等。在与土壤背景值和美国环保署(EPA)以及欧盟(UN)的相关规定对比后发现,由施用生物质炭而引入的污染物对于土壤质量存在很低的风险,几乎可以忽略。Hilber 等人^[41]也提出了用以检测生物质炭中 PAHs 的有效方法。

3.3 生物质炭的稳定性研究

Jones 等人^[23]研究发现,处在土壤中两年的生物质炭与新的生物质炭具有同样的效力,生物质炭的性质稳定且持续有效。章明奎等人^[42]添加生物质炭至土壤中进行室内培养试验,模拟研究生物质炭在土壤环境中的降解特征,结果也同样表明生物质炭在土壤环境中具有较高的稳定性,其降解的半衰期约为玉米秸秆等普通植物生物质的 20 多倍,可见生物质炭在土壤中的稳定程度比较高,可长期发挥作用。

4 总结与展望

生物质炭在有机物污染土壤修复方面,可以有效地吸附污染物,配合微生物作用,加快污染物的降解,或者作为缓释剂减慢农药等的降解使其发挥长效作用,减少污染物的植物有效性和生物可利用性,减少污染物进入食物链的风险和生物的暴露水平。但是由于生物质炭在国内外的研究处于初期,研究过程中采用的生物质炭其制备材料和制备方法^[43-44]、研究方法、以及研究的具体对象等不尽相同,以至于研究的结果显示生物质炭在土壤中的稳定性,以及可能会对土壤带来新的风险等方面仍存在不同结论和争议。目前生物质炭的研究多集中在表面宏观现象上,对其深入的机理研究仍较欠缺^[45]; 且研究结果都来源于短期实验,缺乏长效数据。这些空缺还有待做进一步、长期的研究。

参考文献:

- [1] 陈刚才, 甘露, 万国江. 土壤有机物污染及其治理技术[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 45-49, 62
- [2] 殷甫祥, 张胜田, 赵欣, 封克, 林玉锁. 气相抽提法(SVE)去除土壤中挥发性有机污染物的实验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1 454-1 461
- [3] 吕微, 蒋剑春, 刘石彩, 徐俊明. 生物质炭成型燃料的制备及性能研究进展[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(5): 48-52
- [4] 邱虎森, 王翠红, 盛浩. 生物质炭对土壤温室气体排放影响机制探讨[J]. 湖南农业科学, 2012(11): 49-52
- [5] Yoo G, Kang H. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1 193-1 202
- [6] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 541-547
- [7] Hass A, Gonzalez JM, Lima IM, Godwin HW, Halvorson JJ. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid appalachian soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1 096-1 106
- [8] Revell KT, Maguire RO, Agblevor FA. Field trials with poultry litter biochar and its effect on forages, green peppers, and soil properties[J]. Soil Science, 2012, 177(10): 573-579
- [9] Petter FA, Madari BE. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012, 16 (7): 761-768
- [10] 匡崇婷. 生物质炭对红壤水稻土有机碳分解和重金属形态的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011
- [11] 李保强, 刘钧, 李瑞阳, 李文东, 冯玉杰, 宫鑫. 生物质炭的制备及其在能源与环境领域中的应用[J]. 生物质化学工程, 2012, 46(1): 34-38

- [12] Tsai WT, Liu SC, Chen HR, Chang YM, Tsai YL. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(2): 198–203
- [13] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 钟哲科, 陈英旭. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 977–982
- [14] 王怀臣, 冯雷雨, 陈银广. 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(4): 907–914
- [15] 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(4): 779–785
- [16] 庄晓伟, 刘志坤, 陈顺伟, 叶黎佳. 生物质炭复合材料结构与性能的研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2008, 24(2): 45–49
- [17] 魏娜, 赵乃勤, 贾威. 活性炭的制备及应用新进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2003, 21(5): 777–780
- [18] 黄伟, 贾艳秋, 孙盛凯. 活性炭及其改性研究进展[J]. *化学工业与工程技术*, 2006, 27(5): 39–44
- [19] 宋延静, 龚骏. 施用生物质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
- [20] 马强, 林爱军, 马薇, Choi D, Shim H, 朱永官. 土壤中总石油烃污染 (TPH) 的微生物降解与修复研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2008, 3(1): 1–8
- [21] Bushnaf KM, Puricelli S, Saponaro S, Werner S. Effect of biochar on the fate of volatile petroleum hydrocarbons in an aerobic sandy soil[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, 126 (3-4): 208–215
- [22] Khokhlova L, Strelko V, Khokhlov AI, Lapko V, Wang JN. Bioremediation of oil-polluted soil with sorptive bio-complexes[J]. *Shandong Science*, 2010, 23(6): 1–4
- [23] Jones DL, Edwards-Jones G, Murphy DV. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(4): 804–813
- [24] Sopena F, Semple K, Sohi S, Bending G. Assessing the chemical and biological accessibility of the herbicide isoproturon in soil amended with biochar[J]. *Chemosphere*, 2012, 88(1): 77–83
- [25] Yu XY, Mu CL, Gu C, Liu L, Liu XJ. Impact of woodchip biochar amendment on the sorption and dissipation of pesticide acetamiprid in agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(8): 1 284–1 289
- [26] Yu XY, Ying GG, Kookana RS. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(5): 665–671
- [27] Graber ER, Tsechansky L, Khanukov J. Sorption, volatilization, and efficacy of the fumigant 1,3-Dichloropropene in a biochar-amended soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4): 1 365–1 373
- [28] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 丁克强, 蒋先军. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展[J]. *土壤*, 2002, 34(5): 257–265
- [29] 史明, 胡林潮, 黄兆琴, 代静玉. 生物质炭的加入对土壤吸附菲能力以及玉米幼苗对菲吸收量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5): 912–916
- [30] Gomez-Eyles JL, Sizmur T, Collins CD, Hodson CD. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(2): 616–622
- [31] Chen BL, Yuan MX, Qian LB. Enhanced bioremediation of PAH-contaminated soil by immobilized bacteria with plant residue and biochar as carriers[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(9): 1 350–1 359
- [32] 花莉, 陈英旭, 吴伟祥, 马宏瑞. 生物质炭输入对污泥施用土壤-植物系统中多环芳烃迁移的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(8): 2 419–2 424
- [33] Denyes MJ, Langlois VS, Rutter A, Zeeb BA. The use of biochar to reduce soil PCB bioavailability to *Cucurbita pepo* and *Eisenia fetida*[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 437: 76–82
- [34] 花莉, 张成, 马宏瑞, 余旺. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2 489–2 492
- [35] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2 075–2 080
- [36] 章明奎, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 127–131, 137
- [37] Xu G, Lv YC, Sun JN, Shao HB, Wei LL. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(10): 1 093–1 098
- [38] 仓龙, 朱向东, 汪玉, 谢祖彬, 周东美. 生物质炭中的污染物含量及其田间施用的环境风险预测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 163–167
- [39] Rogovska N, Laird D, Cruse RM, Trabue S, Heaton E. Germination tests for assessing biochar quality[J]. *Journal of environmental quality*, 2012, 41(4): 1 014–1 022
- [40] Freddo A, Cai C, Reid BJ. Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 171: 18–24
- [41] Hilber I, Blum F, Leifeld J, Schmidt HP, Bucheli TD. Quantitative determination of PAHs in biochar: A prerequisite to ensure its quality and safe application[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3 042–3 050
- [42] 章明奎, 顾国平, 王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(3): 329–335
- [43] Abit SM, Bolster CH, Cai P, Walker SL. Influence of feedstock and pyrolysis temperature of biochar amendments on transport of *Escherichia coli* in saturated and unsaturated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8 097–8 105
- [44] Singh BP, Cowie AL, Smernik RJ. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(21): 11 770–11 778
- [45] 王典, 张祥, 姜存仓, 彭抒昂. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 963–967

The Application of Biochar in Organic Polluted Soil

GUO Yan-rong¹, ZENG Hui¹, LIU Yang-sheng^{2*}, LI Zhan-yu¹

(1 *Shenzhen Key Laboratory of Circular Economy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055, China*; 2 *College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing Key Laboratory for Solid Waste Utilization and Management, Beijing 100871, China*)

Abstract: Biochar, with the characteristics of porosity structure, high capability of adsorption, and containing much nutrient elements and functional groups, is a new functional material which has been paid more and more attentions in the fields of environment and agricultural application. In the present article, the basic properties of biochar were briefly introduced, and the probability that biochar became a substitute for activated carbon in the future was proposed. The applications of biochar to remediate contaminated soil with organic contaminant such as TPHs, pesticide, PAHs, PCBs, and also the environmental risk of using biochar as soil addition were reviewed in the paper. The conclusion indicated that biochar has a great potential to remediate contaminated soils, but both its effect and environment impact deserve more studies.

Key words: Biochar; Soil; Organic contaminant; Environmental risk