

# 改性生物炭在土壤改良方面的应用进展

王嘉炜<sup>1,2,3,4</sup>, 徐艳<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年8月18日; 录用日期: 2021年9月21日; 发布日期: 2021年9月28日

## 摘要

随着社会经济的不断发展, 生态环境越来越易被人类的生产生活所影响, 土地作为万物赖以生存的生命之本, 时刻面临被污染的风险, 污染土地已经成为危害生态系统稳定、农产品安全以及人类健康的重要问题。生物炭具有高比表面积、大孔隙率、低成本和来源广等优势, 生物炭及改性生物炭在处理土壤污染方面具有很大的应用潜力。本文综述了生物炭的基本概念、生物炭的改性方法以及在改良污染土地理化性质、修复重金属和有机物污染土地方面的应用, 并就该领域提出展望, 以期生物炭的进一步改良与推广提供理论参考。

## 关键词

改性生物炭, 制备方法, 土壤改良

# Application Progress of Modified Biochar in Soil Remediation

Jiawei Wang<sup>1,2,3,4</sup>, Yan Xu<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Land and Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Centre, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 18<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the continuous development of social economy, the ecological environment was destroyed due to anthropogenic activities in some extent. As the foundation of life for all things, land is always faced with the risk of pollution. Soil pollution has become an important problem that endangers the stability of the ecosystem, the safety of agricultural products and human health. Biochar has the advantages of high specific surface area, large porosity, low cost and wide source. Biochar and modified biochar have great application potential in the treatment of soil pollution. This paper summarizes the basic concepts of biochar, the methods of biochar modification and its application in improving the physical and chemical properties of contaminated land, repairing land polluted by heavy metals and organic matter, and at last, puts forward some prospects in this field in order to provide theoretical references for the further improvement and popularization of biochar.

## Keywords

Modified Biochar, Preparation, Soil Remediation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生物炭(Biochar)是废弃生物质经高温热解产生的固态产物,具体而言是林业废物、动物粪便、食品加工废物、造纸厂废物、城市固体废物和污水处理排放的污泥等农作物废弃物和工业废弃物[1],在缺氧或限养条件下,高温(通常<700℃)热解制备的富含炭素的高度芳香化固体产物。生物炭强调其材料来源广泛及其在农业科学、环境污染修复、土壤改良、温室气体减排等领域的应用[2][3],生物炭的组成元素主要为碳、氢、氧等,而且以高度富含碳(约70%~80%)为主要标志[4][5],其含碳量随热解温度的升高而升高。 $H/C$ 、 $(N+O)/C$ 、 $(C+H)/O$ 分别代表芳香性、极性和还原性。近年来,生物炭因其在改良土壤、提高作物产量等优点被广泛研究,科学界将生物炭称为“黑色黄金”。

虽然生物炭因其具有来源广、低成本、环境友好等优点广泛应用于农业、环境及工业等方面,但由于传统生物炭表面官能团种类较少,且官能团主要是负电荷,只对阳离子的吸附效果较好,在应用时仍存在一些弊端,吸附高浓度污染物的能力有限,影响生物炭吸附能力的主要参数是其比表面积、孔容积、孔径分布和官能团的数量和种类,含氧官能团越多,其酸性越强,表面的亲水性越强[6],孔隙是其于目标物质发生反应的主要场所,而起主要作用的是羟基、羧基、醚基、酰胺基团、胺基团、烷基基团、炔基基团、烷基基团和羰基基团等官能团[7]。

目前,国内外对改性生物炭的研究多集中在对环境污染修复、土壤性质改良、水体污染吸附以及固碳等方面,通过物理、化学和生物方法对传统生物炭进行改性,从而获得具有更强吸附能力的改性生物炭,制备生物炭的原料通常因地制宜,如玉米秸秆[8]、梧桐树木屑[9]、小麦秸秆[10]、甘蔗蔗渣[11]、稻草[11]、水生植物[12]等,并采用不同的改性方法,如利用特定有机改性剂与生物炭的相互作用来提高其吸附作用[13];利用金属或者金属氧化物与生物炭负载,从而使改性生物炭兼具二者的磁性、催化性、吸附性等优势[14],也采用将具有某些特定功能的微生物与生物炭结合进行改性,进而改变其空隙结构等方

法[15]。在改良土壤理化性质、吸附土壤重金属及改善有机物污染方面都能够广泛使用。

## 2. 改性生物炭制备方法

生物炭的物理吸附能力有限, 主要吸附机理是静电作用和离子交换作用, 针对传统生物炭比表面积小、官能团种类单一等弊端, 同时进一步强化其功能, 需要采用改性方法活化生物炭表面性质, 使其性质得到较好的改善。目前, 常用的改性方法有物理、化学及生物改性法[16]。

热处理是最常用的物理改性方法, 通过高温煅烧(800℃~900℃下加热 1~2 小时) [17], 清除生物炭孔隙中的有机物等杂物, 从而使其孔隙结构发生改变, 比表面积增加, 增强其吸附能力, 但会导致含氧官能团的损耗。

化学改性法是目前最主要的改性方法, 通常包括酸碱改性法、氧化改性法和还原改性法等[18]。

酸碱改性主要是通过  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{KOH}$  等酸碱处理之后, 使生物炭的表面官能团和比表面积发生变化, 增加含氧官能团的种类和数量, 从而利于与目标物的结合, 经酸碱活化的生物炭在去除水中有机和无机污染物方面发挥着巨大的潜力[19]。氧化改性法是指利用金属盐溶液(一般为铁盐、锌盐、钙盐等)进行改性, 使金属氧化物或氢氧化物负载在生物炭表面, 以提高生物炭对某些阴离子的吸附能力。还原改性法通常是指通过加入还原剂(如  $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{KOH}$ 、氨水等)对生物炭表面官能团进行改性, 使其表面含氧碱性官能团和羧基官能团数目增加, 表面非极性增强[16]。

生物法改性是使微生物固定生长在生物炭的表面, 通过二者的协同作用提高污染物的去除能力[20]。Teng [21]等人采用吸附-包埋法将非脱羧梭杆菌固定在以稻壳为基质的生物炭上, 对污水中的二价铅进行吸附, 结果表明, 固定化改性生物炭对水中二价铅可以达到很好的修复效果,  $\text{Pb}^{2+}$  的最高去除率可 93%, 明显优于未固定微生物的生物炭; Huang [22]等人将蜡样芽孢杆菌包埋于以稻草、鸡粪、污泥为基质的生物炭中, 极大提高了水体中的二价镉的吸附效果。

综上所述, 由于高温热解过程会使生物炭官能团数量减少而降低其对某些特定污染物的吸附性能, 以及原始生物炭存在固液分离难的问题, 所以通过生物炭改性以提高其理化性质, 并应用于环境修复领域, 受到了学术界和工业界的广泛关注。改性生物炭技术代表了一个新的研究领域。改性技术通过增加生物炭的比表面积、孔体积、含氧官能团、负的 Zeta 电位以及吸附能力来提升原始生物炭的性能。获得的改性生物炭具有高效、成本低、环境友好的优势, 在许多领域, 尤其是环境修复领域中具有巨大的应用潜力。

## 3. 改性生物炭对土壤理化性质的改良

生物炭对土壤的改良功效主要包括肥力改善、提高土壤 pH、提高阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)和含氮量、植物生长和作物增产、改善微生物群落等几个方面。pH 值是影响作物养分有效性的重要土壤因素之一。生物炭中芳香烃官能团能吸附土壤溶液中的  $\text{H}^+$ , 使土壤溶液  $\text{H}^+$  浓度降低[23], 生物炭中的硅酸盐、碳酸盐和碳酸氢盐也可以与土壤溶液中的  $\text{H}^+$  结合而使土壤 pH 值上升[24]; 通常生物炭本身又具有一定碱性, 其含有的盐基离子进入土壤后会有一定的释放, 交换土壤中的  $\text{H}^+$  和  $\text{Al}^{3+}$ , 从而降低致酸离子浓度, 提高盐基饱和度并增加土壤 pH 值[25]。

郭大勇[26]等人以玉米作为供试作物, 探讨碱性低肥力土壤中施加生物炭和改性生物炭对玉米生长发育、养分吸收和土壤理化性状的影响, 结果表明, 改性生物炭处理的处理组较空白组, 土壤的有机质含量、全氮、全磷含量都有不同程度的上升, 2%改性生物炭处理组的土壤 pH 值较对照组也显著增加。

王雪玉[27]等人为探究生物炭对黄瓜根际土壤细菌丰度、速效养分含量及酶活性的影响, 以黄瓜为试验材料开展温室试验, 施入生物炭能明显提高黄瓜结果期根际土壤细菌低级和高级物种的丰度, 同时能

不同程度地提高根际土壤养分含量和脲酶、蔗糖酶活性。Leng [28]的研究显示, 贫瘠土壤在施用了生物炭后, 碳、钾、磷等多种营养物质均得到提升, 虽然这些营养元素的生物可利用性并没有得到充分研究, 但是事实上土壤的理化性质和作物的生长情况均得到改善。

## 4. 改性生物炭对土壤污染物的治理

### 4.1. 重金属污染

近年来, 由于工业粗放式生产对环境带来不可逆的影响, 重金属作为工业生产的主要副产物, 其不可降解性和生物链高度积累性, 对土壤、水体造成了深远影响, 污染的土壤会进一步在农作物等农林食用产品中累积, 严重危害食品健康安全[29]。

生物炭作为一种具有良好吸附特性的环境友好性材料, 在土壤重金属吸附中发挥了关键作用。研究表明[30], 水稻秸秆生物炭对土壤中 Pb-Cd 的复合污染具有良好的修复效果, 此类生物炭能够促进弱酸提取态的 Cd 向可氧化态 Cd 转化, 从而减少 Cd 的迁移。董双快[31]等通过盆栽试验研究了不同砷污染水平下, 添加不同量改性前后的生物炭对土壤砷形态及植物吸收砷规律的影响, 改性生物炭能降低土壤中水溶态砷的含量, 同时能显著降低砷在小白菜中的富集, 可食部分由 18.28 mg/kg 显著降低至 2.66 mg/kg。Zhang [32]等人对 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 改性生物炭对水稻镉积累的影响的试验中表明, 施加 0.05%、0.2% 和 0.4% 的改性生物炭后, 显著降低了水稻中富集的镉的含量, 在农田施用 1.6% 生物炭材料后, 土壤中有效态镉含量由 0.88 降至 0.66 mg/kg。

Xu [33]等人研究表明, 不仅能够采用生物炭固定和去除土壤中的金属类污染物, 而且根据污染金属种类的不同, 可以针对性的选择不同基质的生物炭进行修复以保证修复效果达到最佳, 例如玉米秸秆生物炭更适合用在锌和铬的去除应用中, 而花生果壳生物炭在去除水中的铅污染方面具有更好的效果。王丹丹[34]等通过添加牛粪生物炭对土壤中重金属镉、铬、铜钝化作用的影响研究发现, 牛粪生物炭的热解温度越高, 对土壤中重金属的修复效果越明显; 牛粪生物炭添加量越增加, 对土壤中重金属的钝化效果越好。当热解温度为 700℃ 的牛粪生物炭添加量固定为 10 g/kg 时, 较空白对照, 钝化土壤中的重金属铬、镉、铜含量也有不同程度的提高。大量的研究表明, 生物炭及改性生物炭在土壤重金属污染修复领域发挥着巨大作用。

### 4.2. 有机污染物

在工业生产、畜禽养殖、交通运输及居民生活等过程中将会排放大量有机物, 包括多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、滴滴涕(DDT)、多氯代二苯并二噁英(PCDDs)、氨基甲酸酯类等[35], 这些有机物在土壤中不断积累并超过了土壤所能承受的最高浓度, 影响土壤的理化性质, 导致土壤生态被破坏, 产生一系列难以逆转的永久损伤。

生物炭修复土壤时, 可将具有挥发性或半挥发性的有机污染物固持在土壤中, 减少其挥发量。研究表明, 在土壤中加入生物炭会明显减少六氯苯(HCB)的挥发量, HCB 挥发量随着生物炭含量的增加而减少[36], 姜宇[37]主要对牛粪生物炭热解温度、投加量、土壤 pH、温度以及降解时间对土壤中石油烃的降解效果进行试验, 结果表明, 当热解温度为 700℃, 牛粪生物炭施加量为 75 g/kg 时, 土壤中石油烃的降解效果最佳。而土壤条件确定温度为 30℃、土壤 pH = 7 时, 土壤中石油烃的降解效果最明显且牛粪生物炭对土壤中石油烃具有良好的长效修复作用。

土壤中有机污染物的生物性会在加入生物炭后有一个明显的下降。生物炭能把土壤中的有机污染物从易解吸位点转移到难解吸位点, 从而降低土壤溶液中污染物浓度及其生物有效性。生物炭除了能作为吸附剂外, 还能作为催化剂和催化剂载体, 催化土壤中部分污染物水解, 生物炭与过氧化氢共同氧化能



去除有机污染物, 甚至是无法生物降解的物质, 生物炭会加快有机污染物的氧化-还原降解过程[38]。

## 5. 结论

越来越多的研究表明生物炭在有机污染治理修复领域具有巨大潜力, 应用前景广阔, 吸附能力强是生物炭的重要特性, 也是其应用于有机污染治理的重要理论依据, 然而根据现有研究, 在生物炭及改性生物炭领域仍存在一些问题。

1、现阶段对于生物炭的研究大多集中于实验室条件下的小规模应用, 而生物炭的野外试验则鲜有报道, 同时施用生物炭后的长期效果、消耗速率等问题也缺乏一定的研究。

2、对生物炭的吸附机制缺乏全面系统的体系, 如在多种污染物共同污染的环境中, 生物炭是如何吸附污染物, 从而对环境进行改善的机制并不明确。

3、生物炭的广泛应用还处于探索阶段, 目前的研究多针对于单一改性手段生物炭的应用, 而如何将不同原料、不同改性方式的生物炭进行合理搭配, 从而实现协同作用, 也是值得深入研究的方向。

## 基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2021-34)。

## 参考文献

- [1] 尚璐. 改性生物炭吸附水中氮磷性能及其资源化研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [2] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 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.
- [3] Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. (2006) Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems—A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**, 395-419. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- [4] Lehmann, J. and Joseph, S. (2009) Biochar for Environmental Management: An Introduction. *Biochar for Environmental Management Science & Technology*, **25**, 15801-15811.
- [5] Demirbas, A. (2004) Effects of Temperature and Particle Size on Biochar Yield from Pyrolysis of Agricultural Residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **72**, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- [6] 马兆昆, 刘杰. 改性碳纤维及表面含氧官能团对反硝化菌固着化的影响[J]. 功能材料, 2003, 34(5): 592-594.
- [7] Ahmed, M.B., Zhou, J.L. and Ngo, H.H. (2016) Progress in the Preparation and Application of Modified Biochar for Improved Contaminant Removal from Water and Wastewater. *Bioresource Technology*, **214**, 836-851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.057>
- [8] Khan, Z.H., Gao, M.L., Qiu, W.W., et al. (2020) Mechanisms for Cadmium Adsorption by Magnetic Biochar Composites in an Aqueous Solution. *Chemosphere*, **246**, Article ID: 125701. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125701>
- [9] Li, R.H., Liang, W., Huang, H., et al. (2018) Removal of Cadmium(II) Cations from an Aqueous Solution with Amino-thiourea Chitosan Strengthened Magnetic Biochar. *Journal of Applied Polymer Science*, **135**, 46239. <https://doi.org/10.1002/app.46239>
- [10] Zhao, Y.L., Zhang, R.Y., Liu, H.B., et al. (2019) Green Preparation of Magnetic Biochar for the Effective Accumulation of Pb(II): Performance and Mechanism. *Chemical Engineering Journal*, **375**, Article ID: 122011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122011>
- [11] Yi, Y.Q., Tu, G.Q., Zhao, D.Y., et al. (2019) Biomass Waste Components Significantly Influence the Removal of Cr(VI) Using Magnetic Biochar Derived from Four Types of Feedstocks and Steel Pickling Waste Liquor. *Chemical Engineering Journal*, **360**, 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.205>
- [12] 李桥, 高屿涛, 姜蔚, 等. 紫外辐照改性生物炭对土壤中 Cd 的稳定化效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5708-5714.
- [13] Lyu, H.H., Xia, S.Y., Tang, J.C., et al. (2020) Thiol-Modified Biochar Synthesized by a Facile Ball-Milling Method for Enhanced Sorption of Inorganic Hg<sup>2+</sup> and Organic CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>. *Journal of Hazardous Materials*, **384**, Article ID: 121357. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121357>

- [14] Fang, L., Li, J.S., Donatello, S., *et al.* (2020) Use of Mg/Ca Modified Biochar to Take Up Phosphorus from Acid-Extract of Incinerated Sewage Sludge Ash (ISSA) for Fertilizer Application. *Journal of Cleaner Production*, **244**, Article ID: 118853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118853>
- [15] Yao, Y., Gao, B., Wu, F., *et al.* (2015) Engineered Biochar from Biofuel Residue: Characterization and Its Silver Removal Potential. *ACS Applied Materials Interfaces*, **7**, 10634-10640. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03131>
- [16] 计海洋, 汪玉瑛, 刘玉学, 等. 生物炭及改性生物炭的制备与应用研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(11): 207-213.
- [17] RI, A., Yz, A., Hd, B., *et al.* (2020) Removing Tetracycline and Hg(II) with Ball-Milled Magnetic Nano-Biochar and Its Potential on Polluted Irrigation Water Reclamation. *Journal of Hazardous Materials*, **384**, Article ID: 121095. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121095>
- [18] 杨广西. 生物炭的化学改性及其对铜的吸附研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [19] 廖娜, 文方, 曾琪静, 等. 功能性生物炭的制备及其在重金属污染土壤修复领域应用的研究进展[J]. 新疆环境保护, 2019, 41(3): 33-38.
- [20] 蒋旭涛. 生物炭对水中氨氮和磷酸盐吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [21] Teng, Z.D., Shao, W., Zhang, K.Y., *et al.* (2020) Enhanced Passivation of Lead with Immobilized Phosphate Solubilizing Bacteria Beads Loaded with Biochar/Nanoscale Zero Valent Iron Composite. *Journal of Hazardous Materials*, **384**, Article ID: 121505. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121505>
- [22] Huang, F., Li, K., Wu, R.R., *et al.* (2020) Insight into the Cd<sup>2+</sup> Biosorption by Viable *Bacillus cereus* RC-1 Immobilized on Different Biochars: Roles of Bacterial Cell and Biochar Matrix. *Journal of Cleaner Production*, **272**, Article ID: 122743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122743>
- [23] Chintala, R., Schumacher, T.E., Kumar, S., *et al.* (2014) Molecular Characterization of Biochars and Their Influence on Micro Biological Properties of Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **279**, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.074>
- [24] Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., *et al.* (2015) Physico-Chemical Properties and Microbial Responses in Biochar-Amended Soils: Mechanisms and Future Directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **206**, 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- [25] Glaser, B. (2005) Manioc Peel and Charcoal: A Potential Organic Amendment for Sustainable Soil Fertility in the Tropics. *Biology and Fertility of Soils*, **41**, 15-21. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0804-9>
- [26] 郭大勇, 商东耀, 王旭刚, 等. 改性生物炭对玉米生长发育, 养分吸收和土壤理化性状的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(505): 27-32.
- [27] 王雪玉, 刘金泉, 胡云, 等. 生物炭对黄瓜根际土壤细菌丰度, 速效养分含量及酶活性的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(2): 370-376.
- [28] Leng, L., Yuan, X., Huang, H., *et al.* (2015) Bio-Char Derived from Sewage Sludge by Liquefaction: Characterization and Application for Dye Adsorption. *Applied Surface Science*, **346**, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.014>
- [29] Diels, L., Van, D., and Bastiaens, L. (2002) New Developments in Treatment of Heavy Metal Contaminated Soils. *Reviews in Environmental Science & Biotechnology*, **1**, 75-82. <https://doi.org/10.1023/A:1015188708612>
- [30] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉, 铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [31] 董双快, 徐万里, 吴福飞, 等. 铁改性生物炭促进土壤砷形态转化抑制植物砷吸收[J]. 农业工程学报, 2016(15): 204-212.
- [32] Zhang, J.Y., Zhou, H., Gu, J.F., *et al.* (2020) Effects of Nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Modified Biochar on Iron Plaque Formation and Cd Accumulation in Rice. *Environmental Pollution*, **260**, Article ID: 113970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113970>
- [33] Xu, W., Hou, S., Li, Y., *et al.* (2020) Bioavailability and Speciation of Heavy Metals in Polluted Soil as Alleviated by Different Types of Biochars. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **104**, 484-488. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02804-1>
- [34] 王丹丹, 林静雯, 丁海涛, 等. 牛粪生物炭对重金属镉污染土壤的钝化修复研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 183-187.
- [35] Song, Q., Wang, Z. and Li, J. (2013) Sustainability Evaluation of e-Waste Treatment Based on Emery Analysis and the LCA Method: A Case Study of a Trial Project in Macau. *Ecological Indicators*, **30**, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.016>
- [36] Yang, S., Fang, W., Bian, Y., *et al.* (2012) Bioavailability Assessment of Hexachlorobenzene in Soil as Affected by

Wheat Straw Biochar. *Journal of Hazardous Materials*, **217-218**, 391-397.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.055>

- [37] 姜宇. 牛粪生物炭对沈抚灌区石油烃污染土壤的修复研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
- [38] 王道涵, 山峰, 汤家喜, 等. 生物炭修复有机污染土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(4): 460-466.