

# 土壤改良中生物炭施用量对重金属形态转化影响

徐丽丽<sup>1</sup> 金苗<sup>2</sup>

1 武汉中地环科水工环科技咨询有限责任公司

2 中地环科(湖北)生态环境有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16769

**[摘要]** 为探究土壤改良中生物炭施用量对重金属形态转化的影响,分析生物炭特性及其对土壤结构、肥力的改善作用,通过实验数据发现,生物炭施用量增加可提升土壤对重金属的吸附能力,减少有效态含量,但过量施用可能导致重金属重新释放。同时,生物炭施用量影响重金属形态分布、土壤微生物群落及酶活性,适量施用能促进重金属稳定转化,提高土壤固定能力。据此提出合理确定施用量、联合它修复材料施用及长期监测管理等优化策略。

**[关键词]** 生物炭施用量; 重金属形态转化; 土壤改良; 微生物群落

中图分类号: X53 文献标识码: A

## The Effect of Biochar Application Rate on the Transformation of Heavy Metal Forms in Soil Improvement

Lili Xu<sup>1</sup> Miao Jin<sup>2</sup>

1 Wuhan Zhongdi Huanke Hydro-Environmental Technology Consulting Co., Ltd.

2 Zhongdi Huanke (Hubei) Eco-Environment Co., Ltd.

**[Abstract]** To investigate the effect of biochar application rate on the transformation of heavy metal forms in soil improvement, and to analyze the characteristics of biochar and its role in improving soil structure and fertility, experimental data showed that increasing biochar application rate can enhance soil adsorption capacity for heavy metals and reduce their available content; however, excessive application may cause the re-release of heavy metals. Meanwhile, the biochar application rate affects the speciation distribution of heavy metals, soil microbial community, and enzyme activity. Appropriate application can promote the stable transformation of heavy metals and improve soil immobilization capacity. Based on this, optimization strategies are proposed, including rationally determining the application rate, combined application with other remediation materials, and long-term monitoring and management.

**[Key words]** Biochar application rate; Heavy metal speciation transformation; Soil improvement; Microbial community

### 引言

重金属形态转化机制是土壤污染修复领域的关键研究内容,其中生物有效性调控直接影响生态风险评估<sup>[1]</sup>。生物炭作为热解衍生材料,其多孔结构与表面官能团赋予其独特的重金属吸附能力,可通过离子交换、表面络合及 $\pi-\pi$ 相互作用等机制实现重金属形态转化<sup>[2]</sup>。现有研究表明,生物炭施用量是影响土壤重金属固定效率的核心因素,过量施用可能改变土壤氧化还原条件,导致重金属重新活化<sup>[3]</sup>。生物炭的孔隙结构特点(比表面积、孔径分布)和表面化学性质(pH、官能团类型)一起影响着其对重金属的吸附容量与选择性。土壤中生物炭可调控土壤pH值、阳离子交换能力及有机质含量,间接影响重金属的溶解特性

与迁移规律。深入探究生物炭施用量对重金属形态转化产生的剂量效应,能给土壤污染修复提供科学支撑。

### 1 生物炭的基本特性及其对土壤改良的作用

#### 1.1 生物炭的制备与特性

生物炭是生物质在缺氧或低氧环境里经热解反应制成的多孔炭质材料,核心特性有:比表面积通常超 $200\text{m}^2/\text{g}$ ,孔隙结构呈微孔-介孔-大孔并存状态,还具备抗微生物降解与化学氧化的化学稳定性。这些特性使其具备双重作用:首先,通过物理吸附锁住土壤中的重金属离子(如 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ ),抑制其迁移;其次,借助表面官能团(如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ )与重金属进行络合或离子交换反应,进一步降低生物可利用性。研究表明,稻秆生物炭

在450℃热解条件下,对Cd的吸附容量可达58.3mg/g,且吸附过程符合Langmuir等温模型。孔隙结构特征和表面化学性质一起影响着对重金属的固定效果,是生物炭修复土壤污染的重要理论依据。

### 1.2 生物炭对土壤结构的改善作用

生物炭对土壤结构的改善作用已得到实验数据充分证实,其多孔特性与颗粒形态是核心作用机制。实验数据显示,施用2%~5%剂量的稻秆生物炭后,砂质土壤黏粒含量占比提升8%~12%,土壤团聚体(>0.25mm)数量增加35%以上,团聚体稳定性(MWD值)从0.8mm升至1.5mm,有效降低土壤板结风险。对于黏质土壤,生物炭可填充黏粒间隙形成多孔结构,使土壤容重平均降低18%,总孔隙度提升22%,通气孔隙占比从12%增至19%,显著改善土壤透气性与透水性。此外,生物炭表面的负电荷特性可增强土壤颗粒间的胶结作用,促进水稳性团聚体形成。相关实验表明,连续两年施用生物炭的土壤,其团聚体破坏率较未施用组降低28%,土壤保水能力提升30%,在干旱条件下可使土壤含水量维持在田间持水量的65%以上。这种结构改良效应不仅为植物根系生长提供疏松环境,还能通过孔隙截留重金属离子,减缓其迁移速率,为后续重金属形态稳定化奠定物理基础。

### 1.3 生物炭对土壤肥力的提升作用

生物炭提升肥力的效应,源于其两种提供养分的方式:一是直接提供含有丰富有机质(有机碳含量>60%)和多种矿质元素(如K、Ca、Mg)的物质,二是通过调节土壤的酸碱度和离子交换能力来提升养分。研究表明,施用5%稻秆生物炭可使土壤有效磷含量提高18%,速效钾含量增加25%<sup>[4]</sup>。生物炭的碱性特性可中和酸性土壤(pH<5.5),有助于让土壤pH值达到更合适的6.0—7.0区间,让土壤环境更利于微生物和养分活动。生物炭表面众多官能团可吸附并缓释氮素,减少氨挥发损失,氮肥利用效果更好。肥力提升效应与结构改良效应相互配合,为植物生长带来“养分—水分—氧气”的立体保障,这成为生物炭修复污染土壤的一个重要理论依据。

## 2 生物炭施用量对土壤重金属形态转化的影响

### 2.1 生物炭施用量对重金属吸附固定的影响

对于生物炭而言,吸附固定作用是作为土壤改良剂很关键的作用。生物炭表面有很多羧基、酚羟基等化学基团,借助静电吸附、络合反应以及 $\pi-\pi$ 键作用,能有效捕捉土壤里的重金属离子。生物炭施用量增大时,其比表面积与孔隙结构能更好地展开,为重金属提供了更多吸附位点,土壤对重金属的吸附能力也就明显提升<sup>[5]</sup>。查阅资料显示,在Cu、Pb复合污染土壤中,施用4%微纳米生物炭时,土壤有效态Pb、Cu含量分别降低72.63%、53.87%;灌漠土中施加15000kg/hm<sup>2</sup>生物炭,有效Pb、Cd削减率达42.4%、41.9%,较5000kg/hm<sup>2</sup>处理分别提升21%、32.2%。低剂量(≤1%)生物炭对重金属固定效果有限,而施用量超5%后,部分重金属固定率增幅不足5%,且可能引发土壤通气性下降等问题。

### 2.2 生物炭施用量对重金属形态分布的影响

土壤中重金属的形态分布,会直接影响到其迁移转化行为与生物有效性。生物炭施用量改变土壤物理化学性质后,对重金属形态分布产生间接作用。适量施用生物炭能推动重金属从可交换态转变为有机结合态和残渣态,重金属变成这些形态后就不太容易迁移,生物也很难利用,进而降低环境风险。实验数据显示,在石灰性镉污染土壤中,施用2%醋糟生物炭时,镉可交换态占比从38.2%降至15.6%,有机结合态与残渣态占比从41.5%升至68.3%;施用量增至4%时,残渣态占比进一步提升至75.1%。而施用量超6%后,可交换态镉占比回升至21.4%,因吸附位点饱和导致重金属解吸。对铅污染土壤的研究表明,1.5%稻秆生物炭处理下,铅可还原态占比降低28.7%,残渣态占比提升35.2%,且该转化效果在中性土壤中比酸性土壤高12.5%,体现施用量与土壤性质的协同作用。

### 2.3 生物炭施用量对土壤微生物群落及酶活性的影响

生物炭施用量能通过改变土壤物理化学性质,对土壤微生物群落结构和酶活性产生间接作用。适当用点生物炭能给土壤微生物带来碳源和栖息地,能促进有益微生物生长繁殖,像固氮菌、解磷菌等。实验显示,施用2%稻秆生物炭的土壤,固氮菌、解磷菌数量较对照提升65%、58%,脲酶活性增加42%;施用量超5%时,微生物群落均匀度指数下降18%,蔗糖酶活性降低25%。此外,1.5%生物炭处理使土壤病原菌数量减少37%,而4%以上处理对微生物的抑制效应显著增强,体现施用量的调控阈值特性。

## 3 生物炭施用量对土壤重金属污染修复的优化

### 3.1 生物炭施用量的合理确定

土壤理化性质决定了生物炭使用多少是个关键因素,不同质地、pH值和有机质含量的土壤,吸附重金属的能力差别很大。例如,黏土矿物含量较高的土壤因比表面积大,对生物炭的吸附固定能力更强,可适当降低生物炭施用量;而砂质土壤因孔隙度大、保水性差,需增加施用量以增强重金属固定效果。重金属污染程度对生物炭的吸附阈值有显著影响,轻度污染土壤能用低剂量生物炭达成重金属形态稳定化,对于中重度污染土壤,则需要采用梯度施用策略,分阶段地来调控重金属的活性。此外,植物种类对生物炭的需求量存在特异性,超积累植物因根系分泌有机酸可促进重金属活化,需配合较高剂量生物炭以平衡其生物有效性;而非超积累植物则需精准控制施用量以避免重金属过度固定导致的营养元素竞争。

研究表明,生物炭的孔隙结构参数和吸附容量是正相关关系,要根据目标重金属种类来选更适合的生物炭类型。比如,处理Cd<sup>2+</sup>这类小分子重金属时,适合用微孔多(孔径小于2nm)的生物炭;而面对Pb<sup>2+</sup>这类大分子重金属,就得用中孔(2—50nm)占比大的生物炭,能更好地截留重金属。热解温度调控生物炭表面官能团种类进而影响其吸附效果,在600到700度之间热解制得的生物炭含氧官能团多,对重金属离子的络合作用比低温热解产物强。

### 3.2 生物炭与其他修复材料的联合施用

生物炭与微生物联合修复体系通过“吸附—降解”协同机制实现重金属形态转化,例如根际促生菌(PGPR)分泌的铁载体可螯合 $Fe^{3+}$ ,间接促进生物炭对 $As^{3+}$ 的氧化固定;而硫酸盐还原菌(SRB)通过产生 $H_2S$ 将 $Cd^{2+}$ 沉淀为 $CdS$ ,与生物炭的物理吸附形成双重固定屏障。植物—微生物—生物炭三元修复体系里,超积累植物(像东南景天)能用根系吸收并富集重金属,根际微生物会分泌有机酸来活化土壤里的重金属,生物炭就像个“电子传递小帮手”,能推动微生物参与的氧化还原反应,比如在 $Cr(VI)$ 污染的土壤中,生物炭能让 $Cr(VI)$ 更快地转化成 $Cr(III)$ ,还能给功能微生物提供碳源和安身的地方。

生物炭与化学钝化剂配合施用,能通过调节土壤pH值和氧化还原电位(Eh)来影响重金属形态,比如磷酸盐和生物炭一起用时,磷酸根离子能和铅离子结合成不易溶解的磷酸铅,同时生物炭让土壤pH值升高( $pH>7$ ),进一步减少铅的溶解度。有机肥和生物炭一起施用能形成“有机—无机复合体”,有机质分解出的腐殖酸与生物炭表面官能团结合成络合物,让 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 等特定金属更稳定。纳米材料(像纳米羟基磷灰石)和生物炭结合能大幅提升对Pb、Cd的吸附量,其极小的纳米尺寸( $1\sim 100nm$ )可填入生物炭孔隙,构建出一种分层吸附的模式,有效截留重金属。

### 3.3 生物炭施用后的长期监测与管理

长期监测体系要包含重金属总量、有效态含量及形态分布这三个方面,用BCR连续提取法能把重金属分成酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态,其中酸溶态和可还原态生物有效性高,需要特别关注。原位光谱技术(如X射线吸收近边结构光谱,XANES)能不破坏样品地检测重金属价态变化,像监测 $Cr(VI)$ 转变成 $Cr(III)$ 的转化率,以此评估生物炭的氧化还原效能。生物传感器技术借助植入土壤中的特定生物传感器,能够实时反馈重金属活性变化,检测限可达ppb级,为评估修复效果提供高精度数据。动态管理策略要构建“预警—响应—调整”体系,一旦监测数据表明重金属有效态含量超出阈值(比如 $Cd^{2+}>0.6mg/kg$ ),系统会立即启动响应措施,像增加生物炭施用量、调控土壤水分(维持田间持水量在60%~80%)或者接种功能微生物。

通过机器学习构建的预测模型,能整合土壤理化特性、气候信息及重金属变化的相关参数,提前3—6个月预判修复效果衰减走向,为调整管理策略提供科学支撑。修复后土壤生态风险评估要参照重金属形态转化率与生物可利用性指数(BAI),运用常用的健康风险评估方法算出致癌风险(CR)与非致癌风险(HQ),当CR大于万分之一或HQ大于1时,要启动二次修复程序。

## 4 结论

生物炭施用量调控土壤孔隙结构参数及表面化学性质后,进而对重金属的吸附量及形态变化效率产生直接影响。适量施用可提升土壤阳离子交换量(CEC)和有机质含量,促进重金属向稳定态转化,降低生物可利用性;过量施用则可能改变土壤氧化还原条件,引发重金属重新活化,增加迁移转化风险。研究显示,生物炭和沸石一起施用能协同调控土壤里镉的形态分布,明显降低有效态含量,说明了联合修复策略很有必要。所以依据土壤性质、污染程度还有植物需求,确定生物炭临界施用量得讲究科学方法,再结合长期监测数据对策略进行动态调整,以此达成重金属污染修复的可持续与生态安全。

### [参考文献]

- [1]黎紫珊,胡志文,梅闯,等.稻秆生物炭和蜡状芽孢杆菌联合作用对土壤重金属形态转化及微生物群落的影响[J].环境工程,2024,42(10):165-176.
- [2]张伟华,张伟丽,周晶.生物炭与柠檬酸对石灰性土壤镉形态转化及紫花苜蓿镉富集的影响[J].山东农业科学,2024,56(10):119-126.
- [3]刘洁,孙可,韩兰芳.生物炭对土壤重金属形态及生物有效性影响的研究进展[J].环境化学,2021,40(06):1643-1658.
- [4]梅闯,蔡昆争,黎紫珊,等.稻秆生物炭对稻田土壤Cd形态转化和微生物群落的影响[J].生态环境学报,2022,31(2):380-390.
- [5]裴广鹏,刘奋武,李俞昕.醋糟生物炭对石灰性土壤镉形态转化和小麦镉积累的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(03):76-85.