



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

改性生物质炭对原油污染土壤中苏丹草萌发的影响

周文君, 朱新萍, 陈康怡, 申志博, 谷林珠, 刘菲, 贾宏涛

引用本文:

周文君, 朱新萍, 陈康怡, 等. 改性生物质炭对原油污染土壤中苏丹草萌发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 165–172.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0700>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质炭对华北平原4种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响

张水清, 张博, 岳克, 孙贇, 张秀玲, 林杉, 黄绍敏

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 127–134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0005>

生物质炭对茶园土壤水溶性氟吸附特性的影响

孙永红, 王文娇, 赵征宇, 蔡葵, 赵明

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 376–383 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0032>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

添加生物质炭改良剂对土壤-烟草中重金属含量的影响

赵建, 朱文彬, 汪玉, 祝乾湘, 彭玉龙, 刘京, 韩小斌, 夏志林, 王慎强

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 664–672 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0129>

减肥条件下生物质炭施用对水稻田土壤细菌多样性的影响

陈重军, 凌学林, 邢龙, 冯健, 吴羽希, 范静, 孙远博, 廖方新

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 385–392 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0327>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周文君, 朱新萍, 陈康怡, 等. 改性生物质炭对原油污染土壤中苏丹草萌发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 165–172.

ZHOU W J, ZHU X P, CHEN K Y, et al. Effect of modified biochar on germination of sorghum-sudangrass in crude oil contaminated soil[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(1): 165–172.



开放科学 OSID

改性生物质炭对原油污染土壤中苏丹草萌发的影响

周文君¹, 朱新萍^{1,2*}, 陈康怡¹, 申志博¹, 谷林珠¹, 刘菲¹, 贾宏涛^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究原油胁迫下改性生物质炭对苏丹草种子萌发和幼苗生长的影响,在土壤含油率4%的原油污染土壤中分别添加硝酸和芬顿试剂改性的棉花秸秆生物质炭,采用土培发芽试验研究两种改性生物质炭不同添加量(炭土质量比为2%和4%)对苏丹草发芽率、胚芽长、胚根长、生物量和土壤总石油烃降解率的影响。结果表明:施用生物质炭和改性生物质炭均能显著提高土壤有机质含量($P<0.05$),未改性生物质炭添加会提升土壤pH值,硝酸和芬顿试剂改性生物质炭添加会降低土壤pH值。相比于未加生物质炭处理,添加生物质炭可以显著提高苏丹草发芽率、胚芽长和植株生物量,改性生物质炭对种子生长的促进效果更好,4%硝酸改性生物质炭处理的胚芽长和生物量比对照组分别增加了67.83%和80.26%。生物质炭和改性生物质炭添加均能显著提高土壤中总石油烃降解率,与未加生物质炭处理相比,添加4%生物质炭和4%芬顿改性生物质炭处理的总石油烃降解率分别增加了23.86、20.89个百分点。研究表明,在原油胁迫下,添加改性生物质炭有助于减缓原油污染对苏丹草种子萌发的负面效应,生物质炭的改性方法和添加量会影响苏丹草与生物质炭共同作用下土壤中石油烃的短期降解效果。

关键词:原油污染;苏丹草;生物质炭;改性;种子发芽;幼苗生长

中图分类号:S544.1;X53 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2022)01-0165-08 doi: 10.13254/j.jare.2020.0700

Effect of modified biochar on germination of sorghum-sudangrass in crude oil contaminated soil

ZHOU Wenjun¹, ZHU Xinping^{1,2*}, CHEN Kangyi¹, SHEN Zhibo¹, GU Linzhu¹, LIU Fei¹, JIA Hongtao^{1,2}

(1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes of Xinjiang, Urumqi 830052, China)

Abstract: To explore the effects of modified biochar on seed germination and seedling growth of sudangrass under crude oil stress, cotton straw biochar modified by nitric acid and Fenton reagent was added to the contaminated soil with 4% oil content. The effects of the two kinds of modified biochar on germination rate, germ length, radicle length, biomass, and total petroleum hydrocarbon degradation rate of sudangrass were studied by soil culture germination test. The results showed that both biochar and modified biochar significantly increased soil organic matter content ($P<0.05$). The addition of unmodified biochar increased soil pH, while the addition of biochar modified by nitric acid and Fenton reagent decreased soil pH. Compared with the treatment without biochar, the addition of biochar significantly increased the germination rate, germ length, and plant biomass accumulation of sudangrass. Modified biochar promoted seed growth. The germ length and biomass in treatments with 4% biochar modified with nitric acid increased by 67.83% and 80.26%, respectively, compared with the control group. The addition of biochar and modified biochar could significantly improve the degradation rate of total petroleum hydrocarbons in soil. Compared with the treatment without biochar, the degradation rate of total petroleum hydrocarbons in treatments with 4% biochar and 4% Fenton-modified biochar increased by 23.86 and 20.89 percentage points, respectively. Therefore, under crude oil stress, the addition of modified biochar mitigates the negative effects of crude oil pollution on seed germination of sudangrass. The modification method and the amount of added biochar will affect the short-term degradation effect of petroleum hydrocarbons in soil under the joint action of sudangrass and biochar.

Keywords: crude oil pollution; sudangrass; biochar; modification; seed germination; seedling growth

收稿日期: 2020-11-28 录用日期: 2021-01-31

作者简介: 周文君(1997—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事环境污染控制与修复研究。E-mail: 2165530338@qq.com

*通信作者: 朱新萍 E-mail: zhuxinping1978@163.com

基金项目: 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目(KYYJ201702)

Project supported: Joint Fund Project of Nanjing Agricultural University and Xinjiang Agricultural University(KYYJ201702)

原油是现代工业的“血液”,是应用最广泛的能源之一,但原油中含有多种难降解的烃类和2 000多种毒性有机物质。原油在生产、运输和提炼过程中可能对空气和水生、陆地生态系统造成污染,对人类健康产生不同程度的影响^[1-2]。原油污染会威胁土壤生态系统安全,造成土地资源浪费,使作物种子萌发、根系生长受到胁迫,地上生物量降低^[3]。因此,探寻有效的土壤污染改良材料并减少原油对土壤植物的毒害作用是环境领域关注的热点之一。

生物质炭作为土壤改良剂,施入土壤中可以增加土壤的持水能力和孔隙度,促进植物生长和提高土壤微生物活性^[4]。研究发现,生物质炭可以显著提高苦草种子萌发率,有利于幼苗生长^[5];在 Pb^{2+} 胁迫下施加生物质炭,可以减弱重金属对玉米幼苗生长的胁迫作用,促进幼苗的早期生长^[6]。此外,生物质炭作为一种新型的土壤吸附剂,还可以高效吸附重金属、农药、染料和多环芳烃(PAHs)等污染物质。孔露露等^[7]的研究发现农作物秸秆生物质炭可以显著降低石油污染土壤中PAHs浓度。石丽芳等^[8]的研究表明,与石油烃的自然降解相比较,添加生物质炭可有效促进总石油烃及各组分降解。由此可见,生物质炭对原油污染的吸附去除效果和对植物生长的促进作用均显著。然而,生物质炭对土壤污染胁迫的研究多集中在东南地区酸性土壤区域,在低肥力的碱性土壤上的研究尚有不足。在碱性土壤中施用生物质炭,生物质炭本身的矿物养分难以被利用,同时会造成土壤pH值升高,阻碍植物对养分的吸收;在处理污染土壤时,生物质炭也存在吸附量小、寿命短和效率低等问题。一些研究者发现通过改性的方式可以改变生物质炭的结构和性质,使其具有更大的优势。研究表明 HNO_3 改性后生物质炭的比表面积和官能团增加,对重金属的吸附性能增强,对植物生长发育具有显著促进作用^[9-10]。研究表明,生物质炭表面存在持久性自由基(PFRs),具有活化 H_2O_2 的作用,将生物质炭作为负载体,与Fe结合组成新型芬顿体系,不仅增强了吸附污染物的能力^[11],还加速了活化 H_2O_2 的速率^[12]。近年来,生物质炭作为芬顿催化剂载体被广泛使用,在芬顿催化去除有机物方面发挥一定作用,但直接将芬顿氧化用于改性生物质炭的研究仍缺乏。硝酸改性生物质炭和利用芬顿氧化改性生物质炭在修复污染土壤和促进作物生长方面具有巨大潜力。杨兰等^[13]的研究发现,在镉污染土壤中施加改性生物质炭,降低了重金属在土壤中的迁移性和生物可利用性。郭大勇等^[14]

的研究发现,在碱性土壤中施用酸改性生物质炭促进了玉米的生长发育。然而,在原油污染胁迫下改性生物质炭对植物生长的影响鲜有报道。

苏丹草是广泛分布于新疆的一种人工牧草,对原油污染具有一定的耐受性和污染修复作用^[15],但同时也会受到污染物的毒害,使修复效果变差。已有研究表明,原油污染浓度越高,其对苏丹草生长抑制作用越强,添加生物质炭可缓解原油污染对苏丹草的胁迫作用^[16]。因此,本研究将硝酸酸化和芬顿氧化应用于改性棉花秸秆生物质炭中,针对西北地区碱性土壤原油污染问题,采用原油污染土壤苏丹草发芽试验,分析不同改性方法和不同添加比例的改性生物质炭对苏丹草种子发芽率、幼苗生长、土壤理化性质以及石油烃降解率的影响,以期探明改性生物质炭对原油污染的缓解作用,为改性生物质炭与植物联合修复原油污染土壤的实践应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试生物质炭为棉花秸秆生物质炭,由新疆农业科学院提供,炭化温度为360℃,炭化时间为16 h,过0.5 mm筛,备用;硝酸改性生物质炭(HBC)由供试生物质炭制成^[17],在 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液中25℃恒温振荡24 h后,反复过滤、冲洗至滤液澄清,60℃烘干,备用;芬顿改性生物质炭(FBC)由供试生物质炭制成,在配制的芬顿试剂中25℃恒温振荡24 h后,反复过滤、冲洗至滤液澄清,60℃烘干,备用。芬顿试剂由30% H_2O_2 溶液与 $FeSO_4\cdot 7H_2O$ 按照摩尔比20:1进行配制,具体方法:将 $FeSO_4$ 溶于水,用 H_2SO_4 调节pH为4,再加入30% H_2O_2 溶液。

以新苏2号苏丹草为研究材料,供试土壤来自乌鲁木齐米东区农田,土壤过0.5 mm筛,备用。供试原油来源于新疆某油田,人工模拟原油污染土壤浓度设置为4%^[18]。将供试原油按照1:5配比(1 g原油加入5 mL石油醚充分混合)施入土壤后陈化,原油污染土壤平衡20 d后加入不同比例的生物质炭进行发芽试验,供试土壤和模拟原油污染土壤理化性状见表1。

1.2 种子萌发试验

将棉秆生物质炭(BC)、硝酸改性生物质炭(HBC)和芬顿改性生物质炭(FBC)按2%和4%(质量比)的施用比例与人工模拟的原油污染土壤混合均匀后装入50孔育苗盘中,并设置不添加生物质炭的对照处理组(CK),浇水陈化24 h后进行土培发芽试验,

表1 供试土壤和模拟原油污染土壤理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil and simulated crude oil contaminated soil									
项目 Item	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	pH	总石油烃 TPH/%
供试土壤	0.85	0.78	5.27	18.52	38.99	156.22	32.71	8.18	—
原油污染土壤	2.24	3.57	8.96	142.9	31.00	92.63	111.22	8.01	3.63

不同处理设置见表2。将种子用清水冲洗后,取下饱满种子,播种于育苗盘中,每孔播种8粒,每处理设置5个重复,每日浇水一次,使土壤保持湿润。试验结束后,计算苏丹草种子的发芽率,测量苏丹草幼芽长、幼根长、鲜质量和干质量,并测定土壤pH、电导率、有机质含量和总石油烃含量。

表2 试验设置

Table 2 Different treatment groups		
处理 Treatment	生物质炭 Biochar	生物质炭添加量 Biochar addition/%
CK	—	—
BC1	棉秆生物质炭	2
BC2	棉秆生物质炭	4
HBC1	硝酸改性生物质炭	2
HBC2	硝酸改性生物质炭	4
FBC1	芬顿改性生物质炭	2
FBC2	芬顿改性生物质炭	4

1.3 生物质炭特性表征和土壤理化性质测定

生物质炭pH测定参照《木质活性炭试验方法》(GB/T 12496.7—1999);生物质炭电导率测定参照《粉状活性炭电导率测定方法》(LY/T 1616—2004);生物质炭灰分含量采用缓慢灰化法(GB/T 17664—1999)测定;生物质炭所含C、H、N元素用元素分析仪测得,O元素含量由C、H、N元素和灰分含量经差减法计算而得;利用扫描电镜(SEM)对生物质炭进行表征,观察其表面形貌特征和结构变化。土壤理化性质测定参考鲁如坤《土壤农业化学分析方法》^[19]。

1.4 种子萌发指标测定

自播种后每日同一时间观察苏丹草的发芽数,以胚芽长0.1 cm为标志,至第8天停止计数;试验结束后,用细线和直尺(单位0.1 mm)测量苏丹草胚芽长和胚根长;用分析天平称量幼苗鲜质量和干质量(杀青烘干至恒质量后称量);并计算植物叶片数。

1.5 总石油烃(TPH)含量测定

土壤总石油烃含量采用超声-质量法测定^[20]。称取5.00 g风干土样于50 mL离心管中,加20 mL二氯甲烷充分混合,在60 W功率下超声萃取15 min,

4 000 r·min⁻¹离心10 min,用0.45 μm有机系针头过滤器将萃取液过滤至已知质量的锥形瓶中,重复以上步骤3次,将全部萃取液放入锥形瓶中,后放入通风橱中,等待溶剂挥发干后测定质量,得到从土壤中萃取的石油质量,前后质量差即为土壤中总石油烃的含量。

1.6 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据统计分析,用SPSS 23.0进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较分析(Duncan法),用不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。使用SigmaPlot 14.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭和改性生物质炭特性

生物质炭和改性生物质炭的性质见表3。未改性生物质炭呈碱性,硝酸和芬顿改性后生物质炭均呈酸性,硝酸改性生物质炭pH最低,为2.33,芬顿改性生物质炭pH为4.79。硝酸和芬顿改性后生物质炭的灰分含量显著低于改性前($P<0.05$)。不同改性方式生物质炭的电导率差异显著($P<0.05$),与未改性生物质炭相比,硝酸改性生物质炭的电导率提高了75%,而芬顿改性生物质炭的电导率下降了2%。改性后生物质炭的C、H、N、O含量均显著增加,其中生物质炭的原子比C/H和(O+N)/C可用于表征生物质炭的芳香性和极性大小,硝酸和芬顿改性后生物质炭的C/H和(O+N)/C增大,说明两种改性生物质炭的芳香性和极性增大。

用扫描电镜观察未改性和改性生物质炭表面结构,结果如图1所示。未改性生物质炭表面存在大量灰分,有瘤状的凸起结构,各夹层之间疏松多孔;硝酸改性生物质炭呈明显的蜂窝状结构,孔道数量有所增加,孔内没有灰分物质存在,表面结构排列更为规则;芬顿改性生物质炭表面附着大量不规则团块,孔内出现多级褶皱,表面形成形状各异、大小不同的孔隙结构。可见,硝酸酸化和芬顿氧化均改变了生物质炭原有的表面纹理、孔隙结构和孔径大小,这些孔隙是生

表3 生物质炭特性

Table 3 Characteristics of biochar

参数 Parameter	未改性 生物质炭 BC	硝酸改性 生物质炭 HBC	芬顿改性 生物质炭 FBC
pH	10.29±0.04a	2.33±0.03c	4.79±0.07b
电导率/(mS·cm ⁻¹)	2.41±0.02b	4.22±0.01a	2.36±0.02c
灰分/%	56.30±0.30a	5.90±0.02c	16.16±0.18b
C/%	36.61±0.18c	63.88±0.21b	68.22±0.15a
H/%	2.18±0.03c	3.74±0.02b	3.86±0.03a
N/%	1.34±0.06c	4.14±0.12a	1.84±0.06b
O/%	3.20±0.03c	22.17±0.29a	8.07±0.27b
C/H	16.81±0.13c	17.09±0.01b	17.69±0.06a
(O+N)/C	0.12±0.00c	0.41±0.01a	0.15±0.01b

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The different lowercase letters in the same row indicated significant differences among treatments ($P<0.05$).

表4 不同生物质炭添加后原油污染土壤的pH、电导率和有机质含量

Table 4 The pH, electrical conductivity and organic matter in crude oil contaminated soil treated by different biochars

处理 Treatment	pH	电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)
CK	8.04±0.03ab	24.90±0.50c	106.68±3.34d
BC1	8.17±0.12ab	26.13±1.23bc	120.66±0.73c
BC2	8.27±0.09a	29.67±1.73b	127.06±5.01bc
HBC1	7.79±0.09b	25.21±1.24bc	124.15±8.90c
HBC2	7.73±0.02bc	30.77±0.33b	137.39±8.42ab
FBC1	7.80±0.05b	30.63±2.63b	128.33±2.38abc
FBC2	7.65±0.06c	38.50±0.30a	138.37±5.74a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

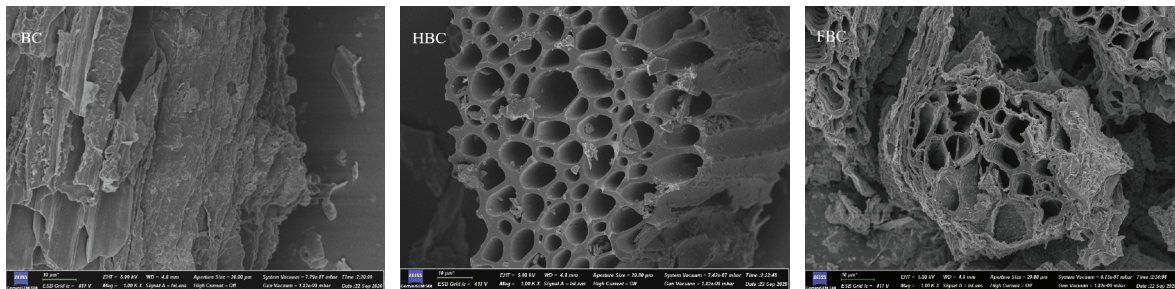


图1 生物质炭和改性生物质炭的扫描电镜观察结果(×1 000倍)

Figure 1 Scanning electron microscopy (SEM) of biochars and modified biochar (×1 000 times)

物质炭具有较强吸附能力的主要原因,也是土壤微生物活动的主要场所。

2.2 不同改性生物质炭对原油污染土壤性质的影响

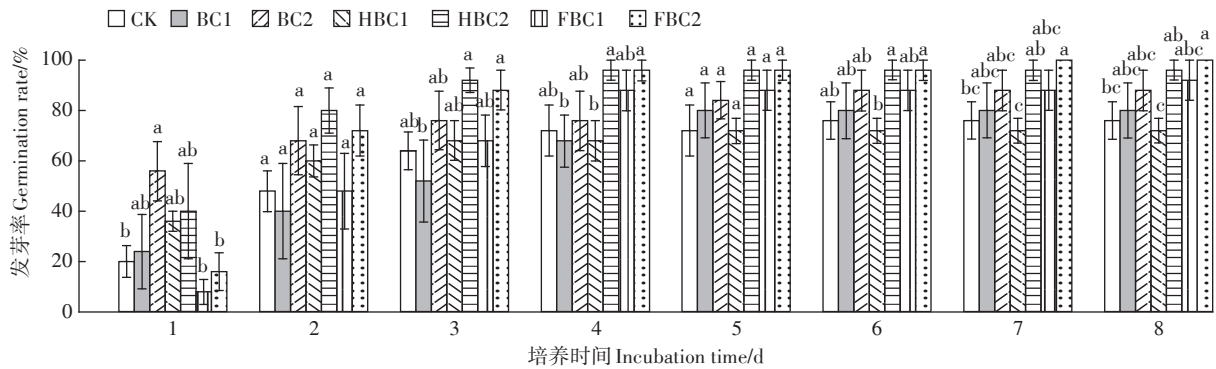
不同改性生物质炭处理后土壤的性质见表4。与CK相比,BC处理下土壤pH有所上升,且随生物质炭添加量的增加而增加。HBC和FBC处理下土壤pH降低,且随生物质炭添加量的增加而降低,在添加量为4%时与CK、BC处理呈显著性差异($P<0.05$)。添加生物质炭处理的土壤有机质含量均显著高于CK处理,且增幅随生物质炭添加量的增加而增大,其中芬顿改性生物质炭处理组的促进效果最为明显。FBC2处理的电导率和有机质含量均最大,与CK相比分别增加了54.62%和29.71%($P<0.05$)。

2.3 改性生物质炭对原油污染土壤中苏丹草种子萌发的影响

原油污染土壤中添加生物质炭后苏丹草种子的发芽率如图2所示。由图2可见,第8天不同处理的苏丹草发芽率均超过70%,添加生物质炭各处理中除

HBC1外,苏丹草发芽率均高于CK处理,且随生物质炭添加量的增加而增加。未改性生物质炭处理组和添加量为2%的改性生物质炭处理组的发芽率与CK相比均无显著差异($P>0.05$),说明未改性生物质炭和低添加量对苏丹草发芽率影响较小。在生物质炭添加量为4%的处理组中,FBC2处理的苏丹草种子发芽率最高,达到100%,HBC2处理的种子发芽率次之,为96%,分别较CK处理显著增加了24、20个百分点($P<0.05$)。

不同处理原油污染土壤中苏丹草的胚芽长和胚根长如图3所示。与CK相比,添加生物质炭的各处理组苏丹草胚芽长显著增加($P<0.05$),并随生物质炭添加量的增加而增加。与未改性生物质炭和芬顿改性生物质炭相比,硝酸改性生物质炭对苏丹草胚芽的促进效果最好,当HBC添加量为4%时,苏丹草胚芽长达到最大值,较CK显著增加了67.83%($P<0.05$)。添加生物质炭处理对苏丹草胚根长具有一定的促进作用,但随着土壤中生物质炭添加量的增大,生物质



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图2 不同处理原油污染土壤中苏丹草的发芽率

Figure 2 Germination rate of sudangrass in crude oil contaminated soil with different treatments

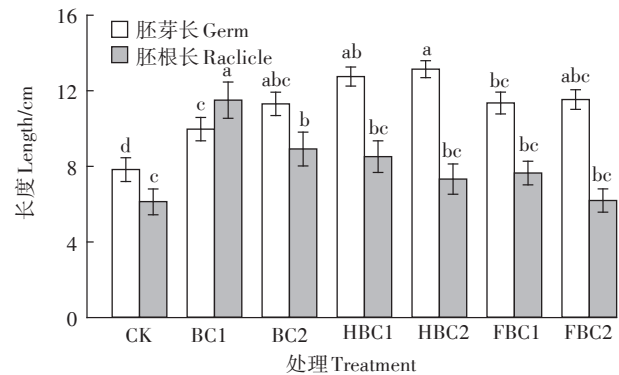


图3 不同处理原油污染土壤中苏丹草的胚芽长和胚根长

Figure 3 Germ length and radicle length of sudangrass in crude oil contaminated soil under different treatments

表5 不同处理原油污染土壤中苏丹草的鲜质量、干质量和叶片数

Table 5 Fresh weight, dry weight and leaf number of sudangrass in crude oil contaminated soil under different treatments

处理 Treatment	鲜质量 Fresh weight/ 10^{-2} g	干质量 Dry weight/ 10^{-2} g	叶片数 Leaf number
CK	3.09±0.16a	1.27±0.27b	2.26±0.74b
BC1	4.69±0.47a	1.65±0.10a	2.63±0.37a
BC2	5.03±0.17a	1.53±0.23ab	2.48±0.52a
HBC1	5.53±0.97a	1.48±0.27ab	2.89±0.11a
HBC2	5.57±0.27a	1.43±0.29ab	2.61±0.39a
FBC1	4.57±0.57a	1.40±0.28ab	2.76±0.24a
FBC2	5.43±1.07a	1.51±0.09ab	2.74±0.26a

炭对胚根长的促进作用逐渐减弱。其中,未改性生物炭处理对苏丹草胚根的促进作用最好,在添加量为2%时苏丹草胚根长达到最大值,为11.5 cm,较CK显著增加了87.50% ($P<0.05$),而改性生物炭处理组的苏丹草胚根长与CK相比无显著差异 ($P>0.05$),说明苏丹草根系对改性生物炭添加不敏感。

原油污染土壤中添加不同生物炭对苏丹草鲜质量、干质量和叶片数的影响见表5。不同处理下苏丹草鲜质量、干质量差异不显著 ($P>0.05$),但添加生物炭的处理组与CK相比有增加的趋势。HBC施加量为4%时鲜质量比CK增加了80.26%;而BC施加量为2%时苏丹草干质量与其他施加生物炭的处理组无显著差异 ($P>0.05$),说明生物炭作为基质对苏丹草生物量的影响较小。从叶片数来看,生物炭添加可以显著增加苏丹草叶片数 ($P<0.05$),而生物炭种类及不同添加量之间的叶片数差异不显著 ($P>0.05$)。

2.4 添加改性生物炭对土壤中原油降解的短期影响

不同处理原油污染土壤中总石油烃降解率如表6所示。与CK相比,添加生物炭处理组的总石油烃降解率显著增加 ($P<0.05$),其中未改性生物炭与芬顿改性生物炭处理组的总石油烃降解率随生物炭添加量的增加而提高,而硝酸改性生物炭处理组则随添加量的增加而降低。未改性生物炭对土壤中总石油烃的降解效果最好,在添加量为4%时总石油烃降解率达到最高,为35.77%,与CK相比提高了23.86个百分点;芬顿改性生物炭对总石油烃的降解作用次之,FBC2处理降解率比CK显著提高了20.89个百分点;硝酸改性生物炭对总石油烃降解率的促进作用最小,HBC1处理的降解率为18.24%。可知未改性生物炭和两种改性生物炭短期内可显著提高种植苏丹草的原油污染土壤中总石油烃的降解率,而生物炭改性方法和添加量的不同会影响

表6 不同处理原油污染土壤的总石油烃降解率

Figure 6 Degradation rate of TPH in crude oil contaminated soil with different treatments

处理 Treatment	总石油烃含量 TPH/%	总石油烃降解率 Degradation rate of TPH/%
CK	3.19	11.91±1.51f
BC1	2.85	21.24±1.23c
BC2	2.33	35.77±0.47a
HBC1	2.96	18.24±2.70d
HBC2	3.07	15.16±1.50e
FBC1	3.02	16.53±1.32de
FBC2	2.43	32.80±1.45b

原油污染土壤中总石油烃降解率。

3 讨论

种子萌发是幼苗建立和植物种群维持与发展的基础,容易受到机械伤害、病害和环境胁迫的影响,种子萌发除了需要自身生命力之外,还需要适宜适量的温度、水分和空气。利用植物修复原油污染土壤,其修复效果的影响因素错综复杂^[21]。有研究表明,原油性质黏稠,进入土壤环境后会影响到土壤通气性和保水性,降低土壤质量,原油中的化合物会进入植物组织,破坏植物的生理机能,对植物生长产生毒害作用,主要表现为发芽率低、生育期延后、结实率减少和贪青晚熟等^[22]。因此,植物修复污染土壤通常需要与其他物理化学方法相结合,以达到联合修复的目的。生物质炭施入土壤后可以有效改善土壤物理结构、增加土壤肥力,对植物生长具有显著促进作用^[23]。在碱性土壤中施加生物质炭会造成土壤pH过高,使土壤中有效营养物质减少,对植物种子萌发产生不良影响^[24]。因此,通过硝酸和芬顿试剂对生物质炭进行改性处理,研究改性后生物质炭对土壤理化性质和植物幼苗生长的影响,可评价改性生物质炭联合植物修复原油污染土壤的潜力。

研究发现,硝酸和芬顿改性后生物质炭的pH值降低,C、H、N、O含量均有明显增加,这与改性后生物质炭表面灰分减少、酸性官能团增多有关^[25-26]。硝酸改性及芬顿改性均改变了棉花秸秆生物质炭原有的表面纹理及孔径分布。硝酸改性生物质炭表面结构更加疏松,孔道数量增加,具有更大的比表面积,有利于吸附污染物^[27],这与刘蕊等^[9]的研究结果一致。芬顿改性生物质炭内部空间构造发生改变,存在不规则的孔隙结构,表面更加粗糙,并分散着较多小颗粒物,这可能与芬顿氧化反应中·HO、·HO₂等活性自由基增

加,或Fe离子以氧化物的形式负载在生物质炭表面有关^[28-29]。生物质炭本身呈碱性,施入碱性原油污染土壤后,其高度芳香化的结构可以吸附土壤中的H⁺,使土壤pH升高,这与张圣也等^[24]的研究结果一致。硝酸改性和芬顿改性生物质炭的pH较低,施入土壤后,土壤pH显著降低,而土壤电导率和有机质含量显著增加,说明改性生物质炭具有固碳能力,可以改善土壤环境,显著提高土壤理化性质和养分含量,这与改性后生物质炭C、O含量和表面含氧官能团增加有关^[30],可见改性生物质炭在土壤改良方面具有较大的潜在应用价值。

在原油污染条件下施加生物质炭与改性生物质炭,减缓了原油对苏丹草幼苗生长的抑制作用,明显促进了苏丹草种子萌发、胚芽生长和干物质积累。其中,添加生物质炭处理的发芽率显著高于未添加生物质炭处理,硝酸和芬顿改性生物质炭处理对苏丹草生长的促进作用强于未改性生物质炭,说明两种改性生物质炭均有助于植物种子的萌发和生长,这可能是因为改性生物质炭较低的pH中和了土壤碱性,使其达到适宜植物发芽和生长的中性环境条件,且改性生物质炭较大的比表面积和孔隙结构有效改善了土壤理化性质,使土壤电导率和有机质含量升高,增强了土壤营养水平,不仅有助于减缓原油对苏丹草幼苗的胁迫作用,而且会促进植物种子发芽和生长,这与郭大勇等^[14]的研究结果一致。随生物质炭添加量的增加,各处理组苏丹草胚根长均呈低添加量促进、高添加量抑制的趋势,说明生物质炭的添加对植物根系影响较大,过量生物质炭的添加不利于植物根系的生长,阻碍了植物对养分和水分的吸收,这与李瑞霞等^[31]的研究结果一致。因此,应根据土壤类型、污染物性质和修复场地特点适当选择不同类型的生物质炭,从而降低污染对修复植物带来的负面效应^[32],提高修复效率。

总石油烃降解率是直接反映土壤污染修复效果的重要指标之一^[33],它受修复植物种类和土壤环境因子的共同影响。本研究发现,施加生物质炭处理的总石油烃降解率显著高于未施加生物质炭处理,说明生物质炭添加有助于土壤中原油的降解。硝酸和芬顿改性生物质炭处理下总石油烃降解率显著低于未改性生物质炭处理,且不同添加量处理的总石油烃降解率显著不同,这是因为总石油烃的降解主要发生在植物根际微生物环境中。一方面,生物质炭的添加改善了植物生长的土壤环境条件,促进植物生长发育,保

证植物在原油胁迫条件下具有一定的抗逆性和耐受性,提升了植物对土壤原油污染物的降解能力;另一方面,生物质炭较大的比表面积和高度芳香化的结构,不仅能够吸附土壤中的污染物质,还可以提高土壤中碳氢化合物的生物利用度以及根系分泌物和石油降解细菌的活性,有利于污染物的降解,但生物质炭的过量添加不利于植物根系的生长,这可能是本研究中硝酸改性生物质炭在高添加量处理下石油烃降解率较低的主要原因。有研究表明,不同生物质炭材料对石油烃去除率的影响随修复时间延长而增大,生物质炭对污染土壤的修复需要长期观察^[8]。BARATI等^[34]比较了两种有机改良剂(鸡粪和鸡粪生物质炭)对大麦降解污染土壤中石油烃的效果,发现生物质炭处理具有较高的石油烃降解率,提高了植物修复效率。因此,改性生物质炭对原油污染植物修复效果的影响与生物质炭原料种类、改性方式、投加比例和投加时间有关,然而这种影响的机制是复杂的,本研究仅进行了短期初步研究与分析,今后还需要从改性生物质炭进入土壤后与植物根系、有机物相互作用以及长期降解效果等方面深入探讨。

4 结论

(1)施用生物质炭和改性生物质炭均能显著提高土壤有机质含量,未改性生物质炭添加会提升土壤pH值,硝酸和芬顿试剂改性生物质炭添加会降低土壤pH值。

(2)在碱性原油污染土壤中施用生物质炭有利于提升苏丹草发芽率、胚芽长、胚根长,促进植株干物质积累,且经过硝酸和芬顿试剂改性后的生物质炭对苏丹草种子萌发的促进效果更好,有助于减缓原油污染对苏丹草种子萌发的负面效应。

(3)生物质炭施用联合苏丹草修复显著促进了土壤中总石油烃的降解,短期内,未改性生物质炭对土壤中总石油烃的降解效果最好,芬顿改性生物质炭次之。在修复植物生长初期,生物质炭的改性方法和添加量均会显著影响苏丹草联合生物质炭对土壤中总石油烃的降解效果。

参考文献:

- [1] HATAMI E, ABBASPOUR A, DOROSTKAR V. Phytoremediation of a petroleum-polluted soil by native plant species in Lorestan Province, Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 24323-24330.
- [2] ATHAR H, AMBREEN S, JAVED M, et al. Influence of sub-lethal crude oil concentration on growth, water relations and photosynthetic capacity of maize (*Zea mays* L.) plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 18320-18331.
- [3] 韩妮,朱新萍,贾宏涛,等.新疆原油污染土壤的植物修复效果初步研究[J]. *环境工程*, 2013, 31(6): 104-107, 137. HAN N, ZHU X P, JIA H T, et al. Preliminary research on phytoremediation effect of three plants to petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(6): 104-107, 137.
- [4] 宋婷婷,陈义轩,李洁,等.不同材料生物质炭和施用量对小麦和黄瓜种子萌发和根茎生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 297-306. SONG T T, CHEN Y X, LI J, et al. Effect of different biochar types and applications on germination and rhizome growth of wheat and cucumber seeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 297-306.
- [5] 张瑄文. 生物质炭对苦草发芽和生长的影响[D]. 南京: 南京大学, 2018: 65-66. ZHANG X W. Effect of biochar on seed germination and growth of *Vallisneria Natans*[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 65-66.
- [6] 杨晓智,郭建华,于凯川,等. Pb^{2+} 胁迫下生物质炭对玉米种子萌发和幼苗早期生长的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(33): 237-243. YANG X Z, GUO J H, YU K C, et al. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of maize under Pb^{2+} stress[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(33): 237-243.
- [7] 孔露露,周启星.新制备生物质炭的特性表征及其对石油烃污染土壤的吸附效果[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2462-2468. KONG L L, ZHOU Q X. Characterization of new-prepared biochars and their adsorption effectiveness on petroleum hydrocarbon contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(5): 2462-2468.
- [8] 石丽芳,李法云,王艳杰,等.不同生物质炭对辽河油田石油污染土壤总烃及各组分修复效果研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(1): 199-206. SHI L F, LI F Y, WANG Y J, et al. Removal of total petroleum hydrocarbons and specific components by various biochars in petroleum contaminated soil from Liaohu oilfield[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 199-206.
- [9] 刘蕊,李松,张辉,等.硝酸改性生物质炭对水体中阴阳离子染料吸附特性[J]. *水处理技术*, 2019, 45(3): 28-34. LIU R, LI S, ZHANG H, et al. Adsorption characterization of cationic and anionic dye from aqueous solution by HNO_3 modifies biochar[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(3): 28-34.
- [10] 骆俊鹏,方茹,史娟娟,等.硝酸改性油菜生物质炭对四环素的吸附性能研究[J]. *环境科技*, 2019, 32(2): 17-23. LUO J P, FANG R, SHI J J, et al. Adsorption performance of tetracycline on nitric acid-modified rape biochar[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(2): 17-23.
- [11] DENG J, DONG H, ZHANG C, et al. Nanoscale zero-valent iron/biochar composite as an activator for Fenton-like removal of sulfamethazine[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 202: 130-137.
- [12] LI L, LAI C, HUANG F, et al. Degradation of naphthalene with magnetic bio-char activate hydrogen peroxide: Synergism of bio-char and Fe-Mn binary oxides[J]. *Water Research*, 2019, 160: 238-248.
- [13] 杨兰,李冰,王昌全,等.改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3562-3574. YANG L, LI B, WANG C Q, et al. Effect of modified biochars on soil cadmium stabilization in paddy soil suffered from original or exogenous con-

- tamination[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9):3562-3574.
- [14] 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(2): 22-27. GUO D Y, SHANG D Y, WANG X G, et al. Effects of modified biochar on growth, nutrients uptake of maize and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(2): 22-27.
- [15] 肖易, 李先梅, 金涛, 等. 土壤石油污染对几种牧草植物发芽的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(11): 60-62, 67. XIAO Y, LI X M, JIN T, et al. Influence of petroleum contaminated soil on germination of several kinds of pasture grass[J]. *Journal of Yangtze University(Nat Science Edit)*, 2014, 11(11): 60-62, 67.
- [16] 王丽萍, 张凯, 贾宏涛, 等. 生物炭对原油污染土壤中苏丹草光合生理特征的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(1): 59-64. WANG L P, ZHANG K, JIA H T, et al. Effects of biochar addition on photosynthetic characteristics of *Sorghum sudanense* in crude oil polluted soils[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2019, 42(1): 59-64.
- [17] 杜文琪, 曹玮, 周航, 等. 磁性生物炭对重金属污染废水处理条件优化及机理[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 492-500. DU W Q, CAO W, ZHOU H, et al. Optimization and the mechanism in treatment of heavy metals wastewater with magnetic biochar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2): 492-500.
- [18] 李政, 顾贵洲, 宁春莹, 等. 固体微生物菌剂在克拉玛依石油污染土壤生物修复中的应用[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(6): 1195-1204. LI Z, GU G Z, YU C Y, et al. Application of solid microbial agent in bioremediation of petroleum contaminated soil in Karamay oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2016, 32(6): 1195-1204.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 22-36. LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 22-36.
- [20] 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.
- [21] 徐恒恒, 黎妮, 刘树君, 等. 种子萌发及其调控的研究进展[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1141-1156. XU H H, LI N, LIU S J, et al. Research progress in seed germination and its control[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1141-1156.
- [22] 徐佰青, 李平平, 王山榕, 等. 植物修复石油污染土壤的研究进展[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1527-1531. XU B Q, LI P P, WANG S R, et al. Research progress in the phytoremediation of oil-contaminated soil[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(7): 1527-1531.
- [23] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 509-517. SHANG J, GENG Z C, CHEN X X, et al. Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 509-517.
- [24] 张圣也, 付东波, 刘慧敏, 等. 土壤中添加生物炭对盐碱胁迫下绿豆生长的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(2): 68-73. ZHANG S Y, FU D B, LIU H M, et al. Effects of biochar addition in soil on the growth of mung bean under salt-alkali stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(2): 68-73.
- [25] 王思源, 申健, 李盟军, 等. 不同改性生物炭功能结构特征及其对铵氮吸附的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 1037-1045. WANG S Y, SHEN J, LI M J, et al. Functional and structural characteristics of different modified biochar and its impacts on ammonium nitrogen adsorption[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5): 1037-1045.
- [26] 骆俊鹏, 方茹, 史娟娟, 等. 硝酸改性油菜生物炭对四环素的吸附性能研究[J]. 环境科技, 2019, 32(2): 17-23. LUO J P, FANG R, SHI J J, et al. Adsorption performance of tetracycline on nitric acid-modified rape biochar[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 32(2): 17-23.
- [27] 朱益刚, 刘桂龙, 孔宪昌, 等. 玉米秸秆和花生壳生物炭改性研究[J]. 农产品加工, 2019(24): 19-20, 27. ZHU Y G, LIU G L, KONG X C, et al. The modified study of biochar from corn straws and peanut shells[J]. *Farm Products Processing*, 2019(24): 19-20, 27.
- [28] 王文刚, 陶红, 戴晓虎. 脱水污泥基铁炭复合材料用于光Fenton催化降解有机污染物[J]. 环境工程学报, 2020, 14(8): 2232-2241. WANG W G, TAO H, DAI X H. Dewatered sludge derived iron-carbon composite as a photo-Fenton catalyst for organic pollutant degradation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(8): 2232-2241.
- [29] 由晗杨, 张毅, 李文英, 等. 酸洗-铁改性生物炭对水中 NO_3^- -N的吸附特性[J]. 水处理技术, 2020, 46(6): 39-44. YOU H Y, ZHANG Y, LI W Y, et al. Adsorption of NO_3^- -N in water by pickling-iron modified biochar[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(6): 39-44.
- [30] 蒲生彦, 上官李想, 刘世宾, 等. 生物炭及其复合材料在土壤污染修复中的应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 629-635. PU S Y, SHANGGUAN L X, LIU S B, et al. A review of the application of biochar and its composites in soil remediation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(3): 629-635.
- [31] 李瑞霞, 李洪杰, 霍艳丽, 等. 生物炭对华北冬小麦根系形态和内生真菌多样性的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 235-242. LI R X, LI H J, HUO Y L, et al. Effect of biochar on root morphology and endophytic fungal diversity of winter wheat in north China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 235-242.
- [32] 赵洁, 贺宇宏, 张晓明, 等. 酸碱改性对生物炭吸附 Cr(VI) 性能的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 28-34. ZHAO J, HE Y H, ZHANG X M, et al. Effect on Cr(VI) adsorption performance of Acid-base modified biochar[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 28-34.
- [33] WARNOCK D, LEHMANN J, KUYPE T, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil: Concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 9-20.
- [34] BARATI M, BAKHTIARI F, MOWLA D, et al. Comparison of the effects of poultry manure and its biochar on barley growth in petroleum-contaminated soils[J]. *International journal of phytoremediation*, 2018, 20(2): 9-12.