

施用超富集植物生物炭对土壤性质及玉米苗期生长的影响

王玺^{1,2}, 林杉¹, 程红光^{2,*}, 邢丹³, 邓朝霞^{2,4}, 毛明明^{3,5}

(1. 华中农业大学 资源与环境学院 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 贵州省农业科学院辣椒研究所, 贵阳 550000; 4. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 5. 贵州大学 农学院, 贵阳 550025)

摘要: 植物提取修复是目前研究较多且极具发展前景的重金属污染土壤治理技术, 广泛应用于砷、镉、铜、锌等重金属污染土壤的修复。然而, 植物提取土壤重金属后产生大量植物残体的处置成为目前环境治理的难点。本研究通过将超富集植物伴矿景天和苜蓿收割后制备成生物炭(350 ℃)进行盆栽实验, 观测了超富集植物生物炭对玉米生长的影响, 评估了超富集植物炭化处理的可行性。结果显示: 添加苜蓿生物炭(ZM)可以显著减少玉米地上部氮磷含量, 但对生物量、光合等指标无显著影响, 同时玉米地上及地下部分重金属 Zn、Cd 含量稍有增加; 而添加景天生物炭处理(JT)玉米的总生物量相比对照降低了 44.4%, 蒸腾速率等光合参数也显著低于对照处理, 根体积、根表面积和总投影面积分别降低了 35.1%、28.1%和 28.1%, 玉米地上部和根部 Zn 含量为对照的 16.0、21.7 倍, Cd 含量为对照的 11.6、25.8 倍。结合原材料以及生物炭中 Zn、Cd 含量分析, 其差异主要由苜蓿、景天中 Zn、Cd 含量不同所致, 景天和苜蓿自身重金属含量是决定其是否可以生物炭化并应用于农田的关键因素。

关键词: 超富集; 生物炭; 再利用; 玉米

中图分类号: X53; X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2022)06-0923-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2022.050.082

近年来, 由于经济的快速发展, 大量工业“三废”的排放, 化肥、农膜的使用以及日益频繁的采矿活动, 造成我国不少省区土壤受重金属污染^[1], 影响着我国农业生产的可持续发展, 其中矿区重金属治理已成为土壤生态保护的焦点^[2]。阻控土壤中重金属迁移与活化成为当前治理工作的首要任务。在众多重金属污染土壤治理方法中, 植物修复技术因其环境友好、适用范围广、成本低廉等优势被广泛应用于重金属污染土壤治理^[3-4]。杨肖娥等^[5]在浙江衢州某铅锌矿区利用景天科植物东南景天降低了污染土壤中 Zn、Pb 等重金属的含量; Deng 等^[6]利用伴矿景天-玉米田间套作八季将土壤镉降低了 18% 以上。尽管上述研究中超富集植物在重金属污染土壤治理中展示了超强的提取、富集功效, 但同时也产生了大量富含重金属的植物残体。这些植物残体如若处置不当(焚烧、丢弃), 会导致富集在

植物中的重金属再次进入土壤, 形成二次污染。因此, 合理处置收获的超富集植物残体成为保障植物修复技术效果的最后瓶颈^[7-8]。

传统的植物残体处置技术有焚烧法、灰化法、堆肥法、压缩填埋法、液相萃取技术等^[9], 上述方法虽达到植物残体减量化的处理要求^[10], 但在大气污染、技术成熟度、处理周期、减量程度等方面仍存在缺陷^[11]。近年来, 将植物残体裂解转化成生物炭, 作为改良剂返回农田土壤, 成为超富集植物残体的一种潜在处理方法^[12]。目前关于重金属超富集植物生物炭能否像常规生物炭一样应用于土壤改良, 还缺乏直接证据。理论上讲, 富集重金属的植物残体热解后, 重金属集中于生物炭中^[13]。虽然生物炭具有强吸附作用与高碱属性, 有着良好的钝化功效, 但依然存在潜在二次污染风险^[14-15]。通常, 富集植物经过高温热解后 90% 难以挥发的重金属都

收稿日期: 2022-01-07; 改回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1802601); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y172)。

第一作者简介: 王玺(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为矿区土壤生态。E-mail: 1104481591@qq.com。

* 通讯作者: 程红光(1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为环境地球化学。E-mail: chenghongguang@vip.gyig.ac.cn。

固存于生物炭中^[16],且相比原材料中重金属形态组成稳定性更高^[17],活性较低^[18-19]。由此可见,富集重金属植物残体生物炭返回土壤,相比植物残体完全腐解而言^[20],虽然也将大部分重金属返回土壤,但重金属活性较低,不易被植物吸收。此外,生物炭应用有着提升土壤肥力、提高作物产量、减少温室气体排放诸多积极影响^[21-22]。然而,目前有关重金属富集植物生物炭对植物的生长影响,自身重金属在土壤中赋存状态以及植物提取情况,缺乏系统研究。

因此,研究收集了不同污染地区两种典型超富集植物(苧麻、伴矿景天),将其制备成生物炭进行玉米盆栽试验,通过观测超富集植物生物炭施加下玉米的生长状况与重金属含量变化,评估富含重金属生物炭对植物的影响,探讨富集植物残体处置的应用途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自贵州省农业科学院附近玉米、蔬菜长期轮作农田(26°30'49''N,106°39'23''E),土壤类型为黄壤,基本理化性质见表1。多点取样收集0~20 cm表层土壤,分拣去除碎石、生物残体等杂质,风干、研磨后过2 mm筛备用。

超富集植物苧麻(*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich.)、伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)分别采自广西省阳朔县和云南省兰坪县重金属铅锌污染土壤治理修复现场。将上述植物烘干粉碎后,装入石英坩埚中,在高温管式炉中进行生物炭制备。通入气流量0.1 L/min的氮气作为保护气隔绝氧气,保持11 °C/min的升温速率,升至350 °C持续热解0.5 h,然后自然冷却,制备成超富集植物生物炭。生物炭研磨过2 mm筛后备用。

试验选用种植的玉米品种为我国广泛种植的“京粘一号”黄粘糯玉米,由山东寿光金鹏种业公司提供。

1.2 试验设计

试验于2020年8~10月在贵州省农科院温室大棚展开,设置3种处理,分别是不添加生物炭的对照处理(CK)、景天生物炭处理(土与生物炭质量比为96:4,下同。标记为JT)、苧麻生物炭处理(标记为ZM),每个处理种植4盆为4次重复。将混合均匀的土壤(或已施入生物炭的土壤)用自来水调至25%含水率(质量),预培养2周,称取(相当于干重500 g)至塑料花盆中(高9.8 cm,口直径14.8 cm,底面直径12 cm),将两粒预先萌发好的玉米种子移栽至盆中,每隔2 d补充水分,两周后间苗,后期每隔10 d每盆浇50 mL改良的霍格兰营养液(成分见表2),以保证养分供应。

1.3 测定内容与与方法

1.3.1 生物炭、土壤性质测定

土壤与生物炭的pH采用pH计(pHS-3E,上海雷磁仪器有限公司)测定,其中土壤pH按照水土比2.5:1,生物炭pH按照水土比10:1;电导率(EC)用电导率仪(DDS-307,上海雷磁仪器有限公司)室温下测定;硝态氮和铵态氮分别用紫外双波长分光光度法和靛酚蓝比色法用分光光度计测定;生物炭与土壤重金属含量经HNO₃-HF-HCl(v:v:v=4:2:2)消解后用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS,Thermo Fisher Scientific X2)测定;生物炭灰分含量在576 °C的马弗炉中灼烧16 h后根据质量差计算所得;生物炭表面结构和表面元素组成用扫描电子显微镜-X射线能谱仪(SEM-EDS)在电流25 KV下完成;比表面积(SSA)使用表面积和孔隙度分析仪(ASAP2460,Micromeritics,美国)测定;总碳、总氮、总硫采用元素分析仪Vario micro cube(Elementar,德国)测定;土壤有机质用重铬酸钾外加热法测定;土壤阳离子交换量用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;有效磷用0.5 mol/L的NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾用1 mol/L的NH₄OAc浸提-火焰光度计法测定。

表1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil

pH	电导率/ (H ₂ O)	有机质/ (g/kg)	铵态氮/ (mg/kg)	硝态氮/ (mg/kg)	全钾/ (g/kg)	速效钾/ (mg/kg)	交换性钙/ (g/kg)	Cu/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)	Cd/ (mg/kg)	Pb/ (mg/kg)
6.54±	218.75±	49.56±	5.60±	3.22±	11.82±	593.25±	8.89±	83.48±	225.33±	0.66±	27.57±
0.14	6.55	0.76	0.98	0.09	0.26	3.88	0.65	0.28	42.40	0.04	1.74

注:所有数值均为平均值±标准差(n=4),下同。

表2 霍格兰营养液配方

Table 2 Hoagland nutrient solution formula

成分	母液浓度/(g/L)	配制营养液 取用量/(mL/L)
KH ₂ PO ₄	136	1
KNO ₃	101	5
Ca(NO ₃) ₂	236	5
MgSO ₄	246.5	2
H ₃ BO ₄	2.86	1
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81	1
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22	1
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08	1
H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	0.02	1
FeEDTA	EDTA	7.45
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	5.57

1.3.2 生物指标测定

株高、茎粗在收获前用卷尺、游标卡尺测定。玉米生长 50 d 后,将地上与地下部分分离,用去离子水洗净擦干后,在 105 °C 下杀青 0.5 h,于 75 °C 下烘至恒重,记录其地上和地下部分干质量。在收获日选取每株从上至下第三片叶子,用刻度尺测量叶宽和叶长。单叶面积=长×宽×0.75(其中 0.75 为校正系数)。在实验结束时,使用 WinRHIZO 根系扫描分析系统对玉米根系进行扫描(分辨率设为 300 dpi)。将玉米根系用去离子水洗涤放入透明托盘,加入自来水并晃动,拨开缠绕的根系,然后盖上遮光板进行全景扫描。通过 WinRHIZO 2012b 软件对所得扫描图像进行分析,测得玉米根系的根长、根直径、根体积、根表面积、总投影面积和根尖数等特征参数。

1.3.3 光合特性指标测定

在玉米生长期每隔 7 d,用 SPAD 仪(soil and plant analyzer development, SPAD)测定植株顶端完全展开且健康叶片的相对叶绿素含量值(SPAD 值)。在收获前夕的晴天 9:00~11:00,采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(Li-COR,美国)测定叶片的气体交换参数:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)等光合参数,水分利用效率(WUE)依照 $WUE = P_n/T_r$ 计算。测量条件如下:光强为 1 000~1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,样品室 CO₂ 浓度为 470~480 cm^3/m^3 ,叶片温度为 23.4 °C~25.5 °C,相对湿度 60%。

1.3.4 玉米植株养分及重金属含量测定

玉米地上部分养分含量参考鲁如坤^[23]的方法,

样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,全氮用凯氏定氮仪测定,全磷用钼锑抗比色法测定,全钾用火焰光度计测定。玉米植株中的重金属含量通过 HNO₃-HClO₄ (v:v=4:2) 消解后用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。

实验中同步消解国家标准物质大米生物成分分析标准物质[GBW10010(GSB-1)]、土壤成分标准物质[GBW07448(GSS-19)]以及空白样进行质量控制,测试回收率均在 85%~115%之间。转运系数(TF)=玉米地上部重金属含量/根部重金属含量;富集系数(BCF)=玉米地上部(或根部)重金属含量/盆栽土壤重金属含量。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理作图,采用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析,用多重比较法(Least significance difference, LSD)检验处理之间的差异显著性。

2 结果

2.1 超富集植物以及生物炭的性质

超富集植物的重金属含量及其生物炭的性质如表 3、4 所示。苎麻植株中的 Zn、Cd、Pb 含量均值分别为 155.97、2.97、13.99 mg/kg,景天植株中的 Zn、Cd、Pb 含量均值分别为 7 279.44、217.49、6.72 mg/kg,不同材料制备成生物炭后重金属浓度富集倍数为 1.77~6.44。苎麻、景天生物炭 pH 均为碱性,分别为 9.68、8.41;苎麻生物炭的灰分含量、电导率、比表面积均值分别为 13.82%、5.12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、2.77 m^2/g ,Zn、Cd、Pb 含量均值分别为 585.82、12.34、65.57 mg/kg;景天生物炭的灰分含量、电导率、比表面积均值分别为 35.36%、11.35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、3.08 m^2/g ,Zn、Cd、Pb 含量均值分别为 24 120.89、385.64、43.28 mg/kg。由图 1 中两种生物炭的 SEM 图可以看出,苎麻生物炭为纤维状生物炭,有条状孔隙及少量絮状物,而景天生物炭有大量中空孔隙,层状结构明显且无填充物;由能谱分析元素组成表可以看到,两种生物炭主要元素成分都为 C、O,其他少量元素组成中,苎麻生物炭按占比高低顺序为 Ca、K、Pb、Mg、P 等,景天生物炭为 Ca、K、Fe、Zn、Mg、Si 等。

2.2 施用超富集植物生物炭后的玉米生长状况

玉米的株高、茎粗以及叶面积等生长指标如表 5 所示。与对照相比,添加苎麻生物炭处理显

表3 超富集植物及生物炭中的重金属含量

Table 3 Heavy metal content in hyperaccumulator and biochar

元素	苈麻			景天		
	苈麻植株/(mg/kg)	苈麻生物炭/(mg/kg)	富集倍数	景天植株/(mg/kg)	景天生物炭/(mg/kg)	富集倍数
Zn	155.97±15.64	585.82±42.07	3.76	7 279.44±157.64	24 120.89±881.47	3.31
Cd	2.97±0.40	12.34±1.04	4.15	217.49±18.36	385.64±16.88	1.77
Pb	13.99±0.90	65.57±5.89	4.69	6.72±0.75	43.28±3.46	6.44

注:富集倍数为生物炭中重金属含量与生物炭原材料中重金属含量的比值。

表4 生物炭的基本性质

Table 4 Basic properties of biochar

指标	苈麻生物炭	景天生物炭	指标	苈麻生物炭	景天生物炭
pH (H ₂ O)	9.68±0.04	8.41±0.07	C/%	50.91±12.77	47.52±1.38
电导率/(μS/cm)	5.12±0.08	11.35±0.17	H/%	5.35±0.82	2.92±0.03
灰分含量/%	13.82±0.29	35.36±0.55	S/%	1.06±0.13	1.25±0.42
铵态氮/(mg/kg)	14.95±3.17	18.09±1.85	C/N比	22.67±5.61	12.65±0.24
硝态氮/(mg/kg)	8.15±2.26	8.02±2.37	比表面积/(m ² /g)	2.77±0.21	3.08±0.11
阳离子交换量/(cmol/kg)	21.56±0.41	20.16±1.05	孔隙/(cm ³ /g)	0.0041±0.000	0.0055±0.0001
N/%	2.24±0.03	3.76±0.05	孔径/nm	5.68±0.04	6.92±0.17

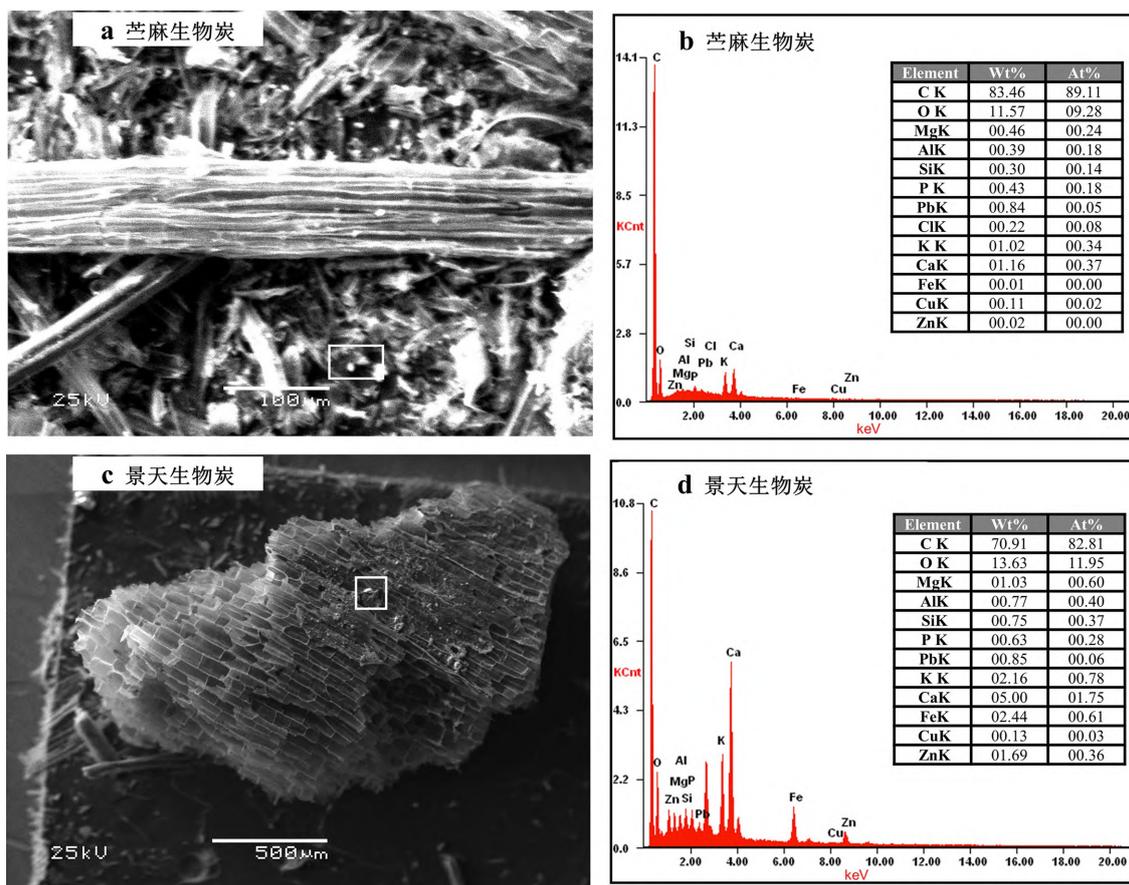


图1 两种生物炭的SEM图以及EDS分析结果

Fig. 1 SEM images and EDS analysis results of two kinds of biochar

著增加了玉米的株高 ($P < 0.05$), 对其它指标无显著影响。而添加景天生物炭处理相比对照处理, 玉米株高没有明显差别, 但是玉米的茎粗、

叶面积、地上部和根部生物量显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 23.1%、41.1%、44.9% 和 41.4%。

表5 施用生物炭后玉米的生长状况

Table 5 Growth status of maize after application of biochar

处理	株高/cm	茎粗/mm	叶面积/cm ²	生物量/(g/pot, DW)	
				地上部	根部
CK	54.03±3.45b	5.58±0.13a	96.03±2.96a	1.67±0.07a	0.29±0.02a
JT	54.73±6.90ab	4.29±0.24b	56.55±9.73b	0.92±0.12b	0.17±0.03b
ZM	63.58±4.37a	5.91±0.39a	86.75±12.12a	1.97±0.49a	0.31±0.06a

注:不同小写字母表示同一时间不同处理间在0.05水平上差异显著,下同。

2.3 施用超富集植物生物炭后的玉米根系形态

三种处理下玉米的根系形态学指标如表6所示。与对照相比,苜蓿生物炭处理中玉米的根系指标基本没有差别,但景天生物炭处理中显著降低了玉米的根体积、根表面积和总投影面积($P<0.05$),分别降低了35.1%、28.1%和28.1%。

2.4 施用超富集植物生物炭后的叶绿素含量 (SPAD值)变化

不同处理中的叶绿素含量结果如图2所示。在前21 d,各处理之间的SPAD值并无显著差异。从第28 d起到第49 d,景天生物炭处理的SPAD值均显著低于对照处理($P<0.05$),为对照处理的78.4%~87.6%;但苜蓿生物炭处理的SPAD值与对照处理没有明显差异。

2.5 不同处理中玉米光合气体交换参数

试验表明,两种生物炭处理均不同程度降低了玉米叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂浓度,增加了玉米叶片的水分利用效率(表7)。其中,苜蓿生物炭处理与对照相比, P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 这四项参数影响并不显著;景天生物炭处理与对照相比显著降低了玉米叶片的 T_r 、 G_s 和 C_i ($P<0.05$),分别为对照处理的33.9%、32.6%和63.1%。

2.6 施用超富集植物生物炭后的玉米养分含量

种植50 d后玉米地上部分全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)含量如图3所示,可知生物炭添加对这三种养分含量均有显著影响($P<0.05$)。景天生物炭处理玉米地上部全氮、全磷含量分别较对照显著降低了14.8%和43.4%,但其全钾含量是对

表6 生物炭处理中玉米根系形态指标

Table 6 Maize root morphological indices under biochar treatment

处理	根长/mm	平均根直径/mm	根体积/mm ³	根表面积/mm ²	总投影面积/mm ²	根尖数/个
CK	2 011.95±304.93a	0.20±0.01ab	125.84±7.22a	1 260.96±116.77a	401.38±37.17a	1 158.75±208.25a
JT	1 562.68±250.38a	0.19±0.01b	81.67±15.60b	907.05±145.02b	288.72±46.16b	1 079.00±124.02a
ZM	1 916.11±202.28a	0.22±0.03a	139.01±29.24a	1 309.73±119.00a	416.90±37.88a	1 373.50±206.06a

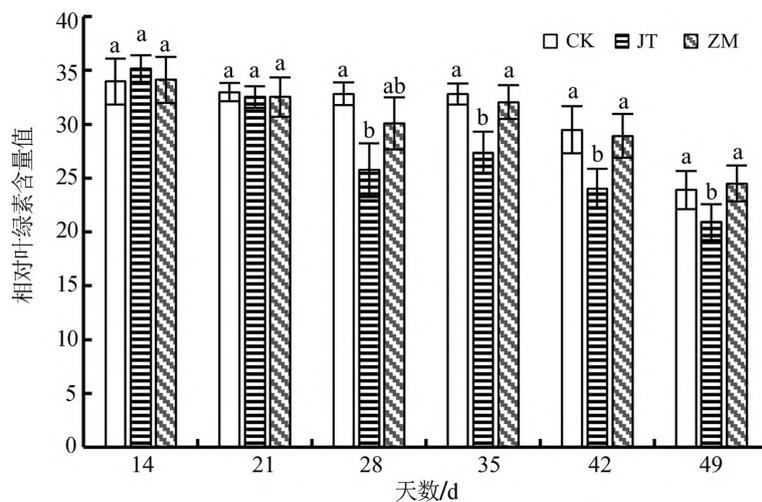


图2 不同处理中的相对叶绿素含量

Fig. 2 The SPAD value under different treatments

表7 生物炭处理中的玉米叶片气体交换参数和水分利用效率

Table 7 The gas exchange parameters and water use efficiency under different treatments

处理	净光合速率 P_n / [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 T_r / [$\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 G_s / [$\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 C_i / [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)/\text{mol}$]	水分利用效率 WUE / [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)/\text{mmol} \cdot (\text{H}_2\text{O})$]
CK	3.62±1.20a	1.12±0.15a	78.59±4.72a	389.90±26.44a	2.27±1.53a
JT	3.38±0.35a	0.38±0.06b	25.61±5.09b	245.92±61.48b	2.32±0.39a
ZM	3.14±0.52a	0.83±0.37a	57.21±27.97a	358.67±54.37a	3.32±0.98a

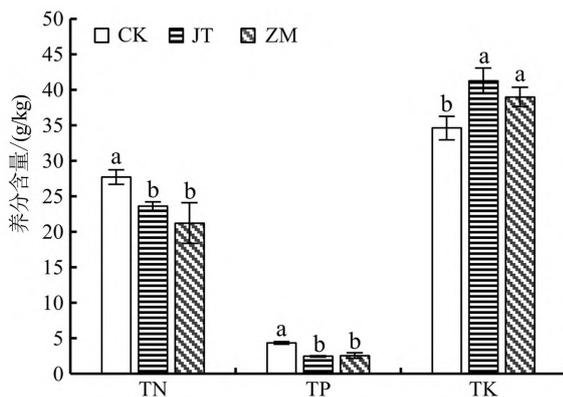


图3 不同处理下的玉米地上部养分含量

Fig. 3 The nutrient content of shoot part of maize

照处理的 1.19 倍;苕麻生物炭处理玉米地上部全氮、全磷含量分别较对照降低了 23.3% 和 40.9%, 其全钾含量是对照处理的 1.13 倍。

2.7 不同处理中土壤养分情况

由表 8 可知,两种生物炭处理均显著提高了土壤 pH, 土壤有机质较对照分别提升了 76.4%、124.5% ($P < 0.05$), 对土壤阳离子交换量无显著影响;两种生物炭处理显著提高了土壤速效钾含量,

分别为对照的 3.40 和 3.71 倍;同样生物炭对土壤速效磷含量也有显著提高作用 ($P < 0.05$), 苕麻生物炭的提高程度更大;对照和景天生物炭处理的土壤碱解氮含量无明显差异,但是苕麻生物炭处理对其有显著降低的效果 ($P < 0.05$)。

2.8 不同处理中植株及土壤 Zn、Cd 含量

不同处理中植株与土壤的 Zn 和 Cd 含量如表 9、10 所示。与对照处理相比,景天生物炭施加显著提高了玉米中 Zn、Cd 的含量 ($P < 0.05$), 其玉米地上部和根部 Zn 含量分别是对照的 16.01、21.70 倍, Cd 含量为 11.64、25.81 倍;施加苕麻生物炭对玉米 Zn、Cd 含量无显著影响。施用景天生物炭提高了玉米对 Zn 的富集能力且降低了对 Cd 的富集能力 ($P < 0.05$);施用苕麻生物炭显著提高了玉米对 Zn、Cd 的转运能力,提高了玉米地上部对 Zn 的富集能力,降低了玉米根部对 Cd 的富集能力 ($P < 0.05$)。由表 10 可知,施用景天生物炭显著提高了土壤 Zn、Cd 总量,高达 1 131.36 和 31.56 mg/kg, 为对照处理的 7.59 和 45.74 倍 ($P < 0.05$), 但苕麻生物炭的施加未对其产生显著影响。

表 11、12 展示了生物炭处理对土壤-玉米系统

表8 不同处理中土壤养分情况

Table 8 Soil nutrients under different treatments

处理	pH (H_2O)	有机质 /(g/kg)	CEC /(cmol/kg)	碱解氮 /(mg/kg)	速效钾 /(mg/kg)	速效磷 /(mg/kg)
CK	7.03±0.06c	56.09±0.91c	14.82±0.56a	130.84±4.95a	413.59±15.28b	29.46±4.57c
JT	7.67±0.07b	98.97±3.45b	15.36±0.15a	128.71±4.74a	1 405.04±126.21a	50.71±3.77b
ZM	7.94±0.05a	125.91±5.91a	14.91±0.42a	105.80±1.74b	1 536.38±120.61a	64.27±5.08a

表9 生物炭处理下玉米的 Zn、Cd 含量

Table 9 Contents of Zn and Cd in maize under different treatments

处理	Zn 含量/(mg/kg)		Zn 的转移/富集系数			Cd 含量/(mg/kg)		Cd 的转移/富集系数		
	地上部	根部	TF	地上部 BCF	根部 BCF	地上部	根部	TF	地上部 BCF	根部 BCF
CK	14.82±	21.78±	0.68±	0.08±	0.15±	0.28±	0.54±	0.51±	0.40±	0.78±
	4.18b	2.68b	0.15b	0.00b	0.03b	0.15b	0.04b	0.26b	0.21a	0.05a
JT	237.22±	472.62±	0.51±	0.20±	0.42±	3.26±	13.94±	0.23±	0.10±	0.44±
	24.06a	45.67a	0.10b	0.03a	0.02a	0.90a	2.03a	0.04b	0.03b	0.06b
ZM	34.79±	20.83±	1.73±	0.20±	0.12±	0.64±	0.69±	0.97±	0.35±	0.36±
	5.91b	5.58b	0.44a	0.03a	0.04b	0.09b	0.14b	0.25a	0.06a	0.06b

表 10 生物炭处理下盆栽土壤的 Zn、Cd 含量

Table 10 Contents of Zn and Cd in soil under different treatments mg/kg

处理	Zn	Cd
CK	149.02±14.59b	0.69±0.08b
JT	1 131.36±58.12a	31.56±1.41a
ZM	177.39±7.51b	1.86±0.13b

中 Zn、Cd 总量分配占比情况的影响。可以看到景天生物炭引入的 Zn 量占到 81.69%，苜蓿生物炭引入的 Zn 量占到 9.78%；景天生物炭引入的 Cd 量占到 96.05%，苜蓿生物炭引入的 Cd 量占到 43.79%。景天生物炭处理土壤由于其远高于其他两处理的 Zn、Cd 含量，使得玉米生物量下降，更多的重金属留在了土壤-植物系统的土壤中；苜蓿生物炭由于其较景天生物炭更低的 Zn、Cd 含量，一定程度上发挥了生物炭的特性及功能优势，增加了玉米地上及地下部的生物量，其土壤-植物系统中土壤重金属总量占比相对更低。

3 讨论

3.1 富集生物炭对植物生长和土壤养分的影响

生物炭通过改良对土壤理化性质来影响植物的生长发育。首先自身含有的矿质养分具有缓释效果，其次生物炭的多孔结构、较大的比表面积可以有效地吸持养分。通过调节土壤 pH、阳离子交换量改变可利用磷钾、可交换钙镁钠含量，提高植物的养分利用效率^[24]。研究中，相比对照两种富集植物生物炭施用均显著提高了玉米地上部钾含量及

土壤 pH、有机质、速效钾与速效磷，表明生物炭添加改善了土壤对植物根系所需的 K^+ 、 PO_4^{3-} 等营养元素的供应，有利于植物的生长^[25]，然而，两种生物炭对玉米生物量、光合等指标的影响并不一致。苜蓿生物炭的施加对玉米的生物量、SPAD 值、光合参数、根系形态指标等并无显著抑制作用，对植株生长并无显著负效应，这与大多数的生物炭盆栽实验结果一致^[26-27]。景天生物炭的施加显著降低了玉米的茎粗、叶面积、生物量、部分根系形态、SPAD 值和光合指标，这与以往大多数生物炭的添加实验结果并不相同^[28]。可能原因是两种不同原材料的性质差异所致，尤其是原材料中重金属含量。植物根系是重金属等污染物进入植物地上部参与物质循环的重要媒介，植物会通过改变根系形态来适应重金属胁迫下的生长和代谢^[29-30]。研究中景天生物炭施加抑制了植物根系的生长(表 6)，导致作物生物量减小、光合作用活性降低及叶绿素合成减少，这与景天生物炭含有高浓度重金属密切相关^[31-32]。由此可见超富集植物生物炭对植物生长的促进作用与生物炭释放的重金属毒害作用共同控制植物的生长^[33]。

3.2 富集生物炭对植物重金属含量的影响

两种重金属富集植物裂解过程中大部分重金属都残留在生物炭中，数据表明苜蓿生物炭的 Zn、Cd 含量分别是苜蓿植株的 3.76、4.15 倍，景天生物炭的 Zn、Cd 含量分别是景天植株的 3.31、1.77 倍。其中景天生物炭的 Zn、Cd 含量是苜蓿生物炭的 41.17 和 31.25 倍。盆栽实验结果显示苜蓿生物炭

表 11 生物炭施入后对土壤-植物系统重金属 Zn 总量变化的影响

Table 11 Effects of biochar application on the content of Heavy metal Zn in soil-plant system

处理	种植前土壤 Zn 总量 (生物炭引入量)/mg	种植前土壤中生物炭 引入 Zn 量占比/%	土壤-植物系统 Zn 总量/mg	土壤-植物系统 土壤 Zn 总量占比/%
CK	112.67(0)	0	74.54	99.96
JT	590.58(482.42)	81.69	565.98	99.95
ZM	119.87(11.72)	9.78	88.77	99.92

表 12 生物炭施入后对土壤-植物系统重金属 Cd 含量变化的影响

Table 12 Effects of biochar application on the content of Heavy metal Cd in soil-plant system

处理	种植前土壤 Cd 总量 (生物炭引入量)/mg	种植前土壤中生物炭 引入 Cd 量占比/%	土壤-植物系统 Cd 总量/mg	土壤-植物系统 土壤 Cd 总量占比/%
CK	0.33(0)	0	0.35	99.82
JT	8.03(7.71)	96.05	15.79	99.97
ZM	0.56(0.25)	43.79	0.93	99.84

注:种植前盆中基质重金属总量为供试土壤重金属浓度(mg/kg)×土壤质量(CK 为 500 g 或加炭处理 480 g),引入生物炭重金属总量为生物炭重金属浓度(mg/kg)×生物炭质量(20 g);植物重金属总量为植株重金属浓度(mg/kg)×生物量(g)。

处理中玉米植株 Zn、Cd 含量相比对照处理没有显著差异,而景天生物炭的施加导致玉米中 Zn、Cd 含量(相比对照、苎麻生物炭处理)达 10 倍以上。由此可以推测景天生物炭在土壤环境中释放大量的 Zn、Cd,并被植物吸收,造成景天生物炭处理中玉米重金属累积^[28]。而苎麻生物炭的施加对玉米植株 Zn、Cd 含量稍有提高但并不显著,一方面因为苎麻生物炭中含有的 Zn、Cd 含量较低,能够释放到土壤中的可溶态 Zn、Cd 较少;另一方面,生物炭可通过物理吸附、离子交换、络合作用等对土壤重金属实现钝化作用^[34],同时,也有研究表明生物炭在土壤过程中的稳定性与其自身重金属的可提取态和潜在释放性有关^[35],苎麻生物炭在促进生长和释放重金属产生毒害两方面的影响较为均衡,从而未对玉米生长产生显著负效应,可见富集植物生物炭能否施用于土壤中与其对重金属钝化与释放的平衡关系有关。由于超高重金属含量的景天生物炭施入使得原始种植基质中 80% 以上的重金属都来自于生物炭,因此相对于其自身来说尽管浸出能力较小,但其浸出部分仍有大量重金属可被植物吸收,可见富集植物生物炭能否施用有一定重金属浓度范围,若重金属含量过高,难以避免其再一次进入土壤-植物循环。本研究中苎麻生物炭可通过改性、提高热解温度、增加保温时长等措施使其发挥更多正向功能,有进一步应用的可能性;而景天生物炭除进一步研究制备条件外可发挥其超高 Zn 含量的特点,为制备生物炭基锌肥提供思路。

3.3 富集植物炭化处理对土壤环境的影响

本研究中的伴矿景天作为锌镉超富集植物已广泛应用在我国铅锌矿区的污染治理过程^[36],一年

内可以收获地上部 3~4 次且单季干物质量可达 1 800 kg/hm²,苎麻也是我国南方地区大面积种植的多年生草本植物^[37],这两种植物均为急需探求低污染处置方法的富集者。通常使用的富集植物处置方法焚烧法和堆肥法往往将高重金属含量的产物残留于土壤中,有土壤实验表明作物秸秆直接还田在初期会显著提高土壤水溶态 Cd 和 EDTA 结合态 Cd^[38],而高含量重金属植物高温炭化处理在显著减少富集生物质的生物量的同时也将进一步富集重金属,且绝大部分重金属以残渣态存在^[39]。本研究两种富集生物炭的农用于超富集植物处置及资源化利用提供了依据与参考,虽然均提高了土壤的 Zn、Cd 含量,但在土壤-植物系统的应用中需关注植物的转运富集能力,较低 Zn、Cd 含量的苎麻生物炭存在施用的可行性但需进一步评估,而较高 Zn、Cd 含量的景天生物炭在农前必须去除或降低其含量,在具体应用中仍要依据富集植物材料及其裂解后生物炭中重金属含量及活性来决定,这需要在后续实验中进一步探索。

4 结论

植物修复技术产生的超富集植株体能否炭化处置主要受原材料中重金属含量控制,施用更高 Zn、Cd 含量的景天生物炭会显著降低玉米的生物量、根系形态、部分光合参数、地上部氮磷含量等指标,使玉米地上部和根部的 Zn、Cd 含量显著高于对照组 11~26 倍,二次污染风险较大;苎麻生物炭的施加提高了玉米株高和土壤有机质、速效钾等养分含量,对植株及土壤 Zn、Cd 含量无显著提高,对玉米苗期生长的毒害作用相对较小,存在施用的可能性,其具体应用潜力需进一步评估。

参 考 文 献

- [1] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.
- [2] 赵云峰,张涛,田志君,等. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. *城市地质*, 2020, 15(1): 22-33.
- [3] 沈洽金,刘德良,郭宇翔,等. 煤矿废弃地重金属含量及 3 种土著先锋植物吸收特征[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(20): 134-138.
- [4] 赵首萍,叶雪珠,张棋,等. 重金属污染土壤几种生物修复方式比较[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(20): 83-91.
- [5] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等. 东南景天(*Sedum alfredii* H)——一种新的锌超积累植物[J]. *科学通报*, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [6] Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(2): 134-140.
- [7] Sas-Nowosielska A, Kucharski R, Małkowski E, et al. Phytoextraction crop disposal—An unsolved problem[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 128(3): 373-379.
- [8] 聂亚平,王晓维,万进荣,等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. *生态科学*, 2016, 35(2): 174-182.

- [9] 刘维涛, 倪均成, 周启星, 等. 重金属富集植物生物质的处置技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 15-27.
- [10] 牛慧斌, 顾彦, 张常安, 等. 富 Mn 鸢尾生物炭的制备及在类 Fenton 体系中的应用[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(12): 2598-2605.
- [11] 李方洲, 滕玉婷, 张亚平, 等. 土壤重金属修复植物处置技术研究现状与展望[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(S2): 213-220.
- [12] 王敏捷, 盛光遥, 王锐. 土壤重金属污染修复植物处置技术进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 151-159.
- [13] Li S M, Chen G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures[J]. Waste Management, 2018, 78: 198-207.
- [14] Huang H, Yao W L, Li R H, et al. Effect of pyrolysis temperature on chemical form, behavior and environmental risk of Zn, Pb and Cd in biochar produced from phytoremediation residue[J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 487-493.
- [15] Zhong D X, Zhong Z P, Wu L H, et al. Pyrolysis of *Sedum plumbizincicola*, a zinc and cadmium hyperaccumulator: Pyrolysis kinetics, heavy metal behaviour and bio-oil production[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(7): 2315-2323.
- [16] Wang S S, Gao B, Li Y C, et al. Biochar provides a safe and value-added solution for hyperaccumulating plant disposal: A case study of *Phytolacca acinosa* Roxb. (*Phytolaccaceae*) [J]. Chemosphere, 2017, 178: 59-64.
- [17] 吴贤豪, 李建新, 王永川, 等. 超积累植物热解中重金属迁移及渗滤特性研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2707-2712.
- [18] Schievano A, Sciarria T P, Gao Y C, et al. Dark fermentation, anaerobic digestion and microbial fuel cells: An integrated system to valorize swine manure and rice bran[J]. Waste Management, 2016, 56: 519-529.
- [19] 吕宏虹, 张慧, 刘颖, 等. MnOx/生物炭复合材料对土壤重金属的固化效果及其机理研究[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2704-2714.
- [20] 胡容平, 石军, 黄廷友, 等. 土施超富集植物秸秆对芥菜生长及镉积累的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 217-221.
- [21] 王义祥, 叶菁, 林怡, 等. 花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和 NH₃ 排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 114-125.
- [22] 范拴喜, 崔佳茜, 李丹, 等. 不同改良措施对设施蔬菜土壤肥力和番茄品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 58-64.
- [23] 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.
- [24] Lu T, Yuan H R, Wang Y Z, et al. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(4): 725-733.
- [25] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 115-121.
- [26] 杨刚, 周威宇. 生物炭对盐碱土壤理化性质、生物量及玉米苗期生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 68-72.
- [27] 陶玲, 张倩, 张雪彬, 等. 凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1512-1520.
- [28] 黄辉. 富含重金属生物炭的环境风险及潜在应用探讨[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] 谢换换, 叶志鸿. 湿地植物根形态结构和泌氧与盐和重金属吸收、积累、耐性关系的研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 864-875.
- [30] Keller C, Hammer D, Kayser A, et al. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: Comparison of different plant species in the field[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 67-81.
- [31] 孙君艳, 李淑梅, 张淮, 等. 自然干旱条件下叶面喷施 Zn、Mo 肥对玉米光合特性的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 9-13.
- [32] 彭辉辉, 刘强, 荣湘民, 等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 132-135.
- [33] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1914-1920.
- [34] 李鸿博, 钟怡, 张昊楠, 等. 生物炭修复重金属污染农田土壤的机制及应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 173-185.
- [35] Hagemann N, Joseph S, Schmidt H P, et al. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility[J]. Nature Communications, 2017, 8: 1089.
- [36] Jiang J P, Wu L H, Li N, et al. Effects of multiple heavy metal contamination and repeated phytoextraction by *Sedum plumbizincicola* on soil microbial properties[J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(1): 18-26.
- [37] Yang B, Zhou M, Shu W S, et al. Constitutional tolerance to heavy metals of a fiber crop, ramie (*Boehmeria nivea*), and its potential usage[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(2): 551-558.
- [38] 黄界颖. 秸秆还田对铜陵矿区土壤 Cd 形态及生物有效性的影响机理[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [39] Lievens C, Yperman J, Vangronsveld J, et al. Study of the potential valorisation of heavy metal contaminated biomass via phytoremediation by fast pyrolysis: Part I. Influence of temperature, biomass species and solid heat carrier on the behaviour of heavy metals[J]. Fuel, 2008, 87(10-11): 1894-1905.

Effects of Hyperaccumulator Biochar Application on Soil Properties and Seedling Growth of Maize

WANG Xi^{1,2}, LIN Shan¹, CHENG Hongguang², XING Dan³,
DENG Zhaoxia^{2,4}, MAO Mingming^{3,5}

- (1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, College of Recourses and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. Guizhou Academy of Agricultural Science, Institute of Pepper Guiyang, Guiyang 550000, China;
4. College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
5. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Phytoextraction is a promising remediation technology for removal heavy metal from the contaminated soil, which has been widely used in the remediation of heavy metal contaminated soil such as arsenic, cadmium, copper and zinc. However, the disposal of a large amount of plant residues after extraction of heavy metals from soil has become a difficulty in current environmental governance. In this study, a pot experiment was conducted to observe the effect of hyperaccumulator biochar on maize growth and to assess the feasibility of hyperaccumulator charring treatment by preparing hyperaccumulator from *Sedum plumbizincicola* and *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich harvested into biochar (350 °C). The results showed that the addition of *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich biochar (ZM) had no significant effect on biomass, photosynthesis and other indicators, except for a significant reduction in the N and P content of the shoot of the maize, the contents of heavy metals Zn and Cd in maize increased slightly; while the photosynthetic characteristics parameters such as transpiration rate of maize treated with *Sedum plumbizincicola* biochar (JT) were significantly lower than those of the control, with a 44.4% reduction in total biomass compared to the control. The root volume, root surface area and total projected area were reduced by 35.1%, 28.1% and 28.1%, respectively, and the Zn content in the shoot and root of maize was 16.0 and 21.7 times higher than that of the control, while the Cd content was 11.6 and 25.8 times higher than that of the control. Combined with the analysis of biochar raw materials and the contents of heavy metals Zn and Cd in biochar, the above differences were mainly caused by the differences of heavy metals in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich and *Sedum plumbizincicola*. These studies indicated that the heavy metal content of *Sedum plumbizincicola* and *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich was the key factor to determine whether it could be carbonized and applied to farmland.

Key words: hyperaccumulator; biochar; reuse; maize