

彭红宇,刘红恩,王秋红,等. 低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(4):212-219.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.031

低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响

彭红宇,刘红恩,王秋红,李 畅,秦世玉,张玉鹏,刘亥扬,许嘉阳,赵 鹏

(河南农业大学资源与环境学院/河南省土壤污染防控与修复重点实验室,河南郑州 450002)

摘要:以济源某基地土壤为研究对象,选用农业废弃物花生壳为供试生物炭原材料,采用温室小麦苗期盆栽方法,分别在低温(250 ℃)、高温(450 ℃)条件下热解制备生物炭,并作为辅料与化肥配施进行对比试验,设置不施肥对照(CK1)、基础施肥对照(CK2)、1%低温生物炭(T3)、2%低温生物炭(T4)、1%高温生物炭(T5)、2%高温生物炭(T6)6个处理,研究低温生物炭和化肥配施后对原位铅、镉污染土壤有效性及冬小麦生长的影响。结果表明,相较于(CK1)其余处理均可以改善土壤中速效养分状况,提高土壤有机质含量,促进小麦地上部干质量及总干质量的积累,促进小麦养分吸收,但显著降低了小麦根部干物质质量和根冠比;相较于CK2来说,在施肥的基础上添加低温生物炭和高温生物炭,同样可以改善土壤养分状况,促进冬小麦生长,此外还可以抑制小麦地下部对重金属的吸收,降低土壤中有效态Cd、Pb含量。其中就冬小麦生长状况而言,低温T3处理与高温T6处理根冠比、地上部干质量、地下部干质量及总干质量均差异不显著;同样就冬小麦氮素、钾素吸收而言,差异也不显著;就土壤铅、镉有效性而言,T3、T6处理同样固定效果相当。说明在本试验中施肥的基础上添加1%低温生物炭(T3处理)对改善土壤,促进小麦生长,降低土壤有效态铅、镉含量有很大的潜力,可以达到高温几乎同样的施用效果。

关键词:生物炭;重金属污染;土壤修复;重金属;小麦;铅;镉

中图分类号:S512.1⁺10.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0212-08

生物炭是来源于作物秸秆、动物粪便等的生物质或肥料(通常称为原料)在热化学转换或热解

(200~700 ℃)下获得的一种固体产物^[1],已被广泛证明具有固定重金属的能力^[2],在农田土壤重金属修复中备受关注。污染农田中施用生物炭一方面可以固定土壤重金属,另一方面还可以提高土壤有机碳及有机质含量、土壤持水力,以及矿质养分的有效性^[3-6],进而改善土壤质量,促进作物生长。农业生产中单施化肥会引起土壤肥力下降、营养失调、作物减产等^[7],而生物炭作为辅料添加与化肥混施后,因其本身特性可以吸附、负载和缓释肥料养分,减少土壤养分流失,固定土壤重金属,二者配施既可满足作物生长对养分的需求又缓解农田土

收稿日期:2022-04-06

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:202102110213、202102110214);

河南省高等学校重点科研项目计划基础研究专项(编号:19zx007)。

作者简介:彭红宇(1994—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事低温生物炭农业应用研究。E-mail:snailboy616@163.com。

通信作者:刘红恩,博士,教授,博士生导师,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail:liuhongen7178@126.com;王秋红,高级工程师,主要从事农业环境保护,E-mail:294737416@qq.com。

机碳和轻组有机碳的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(1):8-13.

[32]张军科,江长胜,郝庆菊,等. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响[J]. 生态学报,2012,32(14):4379-4387.

[33]田慎重,王 瑜,李 娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报,2013,33(22):7116-7124.

[34]张 璐,张文菊,徐明岗,等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1646-1655.

[35]严 君,韩晓增,陈 旭,等. 施肥对小麦、玉米和大豆连作土壤

微生物群落功能多样性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(6):171-177.

[36]唐海明,肖小平,李微艳,等. 长期施肥对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态环境学报,2016,25(3):402-408.

[37]张向前,杨文飞,徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. 生态环境学报,2019,28(12):2464-2472.

[38]刘定辉,舒 丽,陈 强,等. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(2):158-162.

壤污染。近年来很多研究也证实了生物炭与化肥配施增产效果显著以及具有较强的土壤重金属固定能力,并且已经成为国内外农业领域的研究热点^[8]。张志龙等研究发现,500 °C 小麦秸秆生物炭与化肥配施后可以显著提高连作黄瓜的产量并且提高肥料利用率^[9];徐绮雯等研究发现,550 °C 玉米秸秆生物炭与化肥配施后,不仅可显著提升土壤肥力,还可以提升土壤微生物活性^[10];王期凯等研究发现,单一施用生物炭处理没有炭与化肥配施效果好,并且炭与化肥配施处理还对降低镉污染菜地土壤中 Cd 的有效性有显著影响^[11];聂新星等研究发现,竹炭生物炭与化肥配施后,可以提高土壤有机碳和速效钾含量,提高冬小麦产量^[7]。李格等研究发现,450 °C 烤烟秸秆生物炭和化肥配施,可以提高烤烟产量与品质^[12]。

鉴于以上众多研究中选用的生物炭炭化温度多在 400 ~ 600 °C 之间,然而,在低温 300 °C 以下热解制备的生物炭研究较少。因此,本研究选用来源广泛的花生壳农业废弃物为原料,制备低温 250 °C 生物炭,与高温 450 °C 生物炭进行对比,采用小麦温室盆栽方式,探讨低温生物炭和化肥配施对碱性重金属污染农田中小麦苗期干质量及养分含量、土壤理化性质、土壤重金属有效性等的影响,旨在为低温生物炭培肥增产作用及土壤改良应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤采集自河南省济源市微碱性 Pb、Cd 复合污染农田,于 2020 年 12 月 26 日取回,置于干净整洁的室内,自然风干。风干过程中多次翻动清理土中杂物后,过 20 目筛。供试土壤基本理化性质:有机碳含量 8.52 g/kg,碱解氮含量 86.45 mg/kg,速效磷含量 32.36 mg/kg,速效钾含量 186.19 mg/kg,有效态 Cd 含量 1.26 mg/kg,有效态 Pb 含量 80.71 mg/kg,pH 值为 7.86。

1.2 生物炭制备

供试生物炭于 2020 年 11 月 22 日至 12 月 6 日制备。选取花生壳为待制备的生物炭原材料,首先清洗表面杂物,用去离子水洗净,平铺于干净整洁的室内等待自然风干,经过简单破碎处理,过 20 目筛,标记为 PS 放入自封袋中待用,开始制备时将 PS 放入瓷坩埚中,置于管式马弗炉中,通氮 10 min 后,分别设置 250、450 °C,升温速率为 5 °C/min,氮气流

速为 80 mL/min,保温时间为 2 h。待炉子完全冷却后取出材料过 100 目筛,装于棕色瓶中备用。其中,250 °C 生物炭的 pH 值为 6.95,有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 572.26 g/kg、10.84 g/kg、24.22 mg/kg、9.47 mg/kg;450 °C 生物炭的 pH 值为 9.33,有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 622.53 g/kg、11.06 g/kg、53.38 mg/kg、8.45 mg/kg。

1.3 试验设计

植物培养试验于 2021 年 1 月 3 日在河南农业大学土壤污染控制与修复重点实验室进行。小麦品种为百农 207。试验设置:CK1(不加生物炭、不施肥)、CK2(不加生物炭、基础施肥)、T3(基础施肥、1% 250 °C 花生壳生物炭)、T4(基础施肥、2% 250 °C 花生壳生物炭)、T5(基础施肥、1% 450 °C 花生壳生物炭)、T6(基础施肥、2% 450 °C 花生壳生物炭)。每个处理设置 3 个重复,将原状污染土壤与生物炭均匀混合装盆 500 g。肥源:尿素(纯 N 0.2 g/kg)、磷酸二氢钾(P_2O_5 0.2 g/kg)、氯化钾(K_2O 0.2 g/kg),均购自国药集团化学试剂有限公司。保持土壤湿度为田间持水量的 60% ~ 70%,温室培养条件:25 °C,光照周期 16 h/8 h(白天/黑夜)。每盆播种 16 颗小麦种子,出苗后,进行定株,每盆保持 8 株小麦幼苗培养 30 d。

1.4 样品测定

生物炭养分含量及 pH 值测定参照 NY 525—2012《有机肥料》。

播种后 30 d 分别采集小麦地上部、地下部和土壤样品。小麦样品预处理及指标测定:收获后,依次使用自来水、去离子水清洗干净,平铺于干净吸水纸中吸干水分。在烘箱中经过 105 °C 杀青 30 min,然后再 65 °C 烘干处理,称取地上部、根部干质量及总干质量。地上部、地下部养分含量采用硫酸-过氧化氢消化后分别测定。镉和铅含量测定采用硫酸-高氯酸消化后用原子吸收上机检测。土壤样品预处理及指标测定:风干剔除杂物后,分别过 0.84 mm 和 0.149 mm 筛用于测定土壤常规 5 项,以及以 DTPA 为提取剂测定土壤有效态铅(Pb)和镉(Cd)的含量(使用原子吸收分光光度计上机测样)。以上所有测定方法均参照鲍士旦的《土壤农化分析》教材第 3 版^[13]。

1.5 数据分析

试验数据处理采用 DPS 7.05 进行统计分析,采用 LSD 法进行多重比较,Excel 2018 完成数据整理,

Origin 2018、Sigma-Plot 10 作图。

2 结果与分析

2.1 添加生物炭对小麦生长状况的影响

如图 1 所示,与 CK1 相比,其余处理显著提高小麦地上部干质量,但显著降低小麦根部的干质量和根冠比。其中对地上部干质量促进效果为 T6 > T3 > T5 > T4 > CK2,较 CK1 处理分别提高了 64.75%、58.39%、46.99%、44.79%、35.09%,平均提高了 50.00%;与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理促进效果为 T6 > T3 > T5 > T4,较 CK2 处理分别提高了 21.96%、17.25%、8.81%、7.18%,平均提高了 13.80%,说明随着低温生物炭添加量的增加地上部干质量下降,而高温生物炭添加量的增加显著促进了地上部干质量的积累(图 1-A)。对于根部干质量来说,与 CK1 相比降幅变化趋势为 T5 > T4 > CK2 > T3 > T6,分别为 53.69%、46.49%、44.61%、24.62%、21.15%,添加生物炭的 4 个处理较 CK2 也有不同程度的变化,其中 T3、T6 与 CK2 相

比根部干物质质量分别增加 36.09%、42.35%,T4、T5 与 CK2 相比根部干物质质量分别降低 3.39%、16.39%,其中添加了低温 250 °C 生物炭的 T3、T4 处理随着添加量的增加根部干质量降低,而高温处理的 T5、T6 则相反(图 1-B)。对于根冠比来说,不施肥 CK1 最大,为 0.32,施肥(CK2)和在施肥的基础上添加生物炭的 4 个处理根冠比均降低,依次为 0.13、0.15、0.12、0.10 和 0.15,其中 T5 最小(图 1-C)。对于总干质量来说,与 CK1 处理相比其余处理均对小麦总干质量促进作用显著,促进效果为 T6 > T3 > T4 > T5 > CK2,较 CK1 处理分别提高了 44.05%、38.39%、22.79%、22.73%、15.88%,平均提高了 28.77%;与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理也有不同程度的促进,促进效果为 T6 > T3 > T4 > T5,较 CK2 处理分别提高了 24.31%、19.42%、5.96%、5.90%,平均提高了 13.90%,表明随着低温生物炭添加量的增加总干质量下降,而高温生物炭添加量的增加显著促进了冬小麦总干质量的积累(图 1-D)。

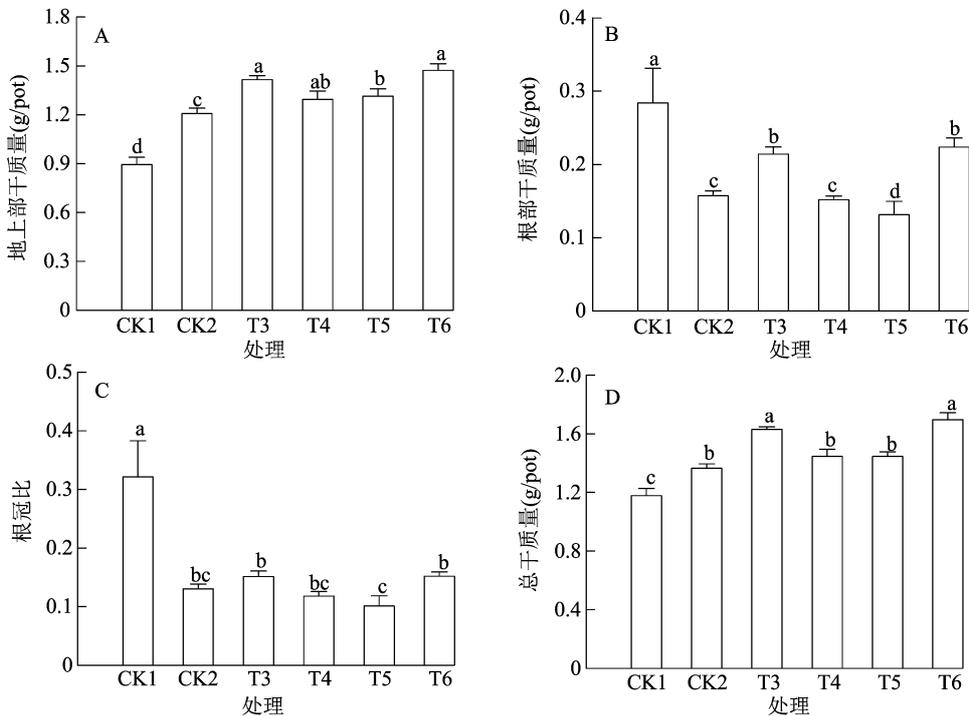


图 1 施用生物炭对小麦各部位干质量及总干质量的影响

2.2 添加生物炭对冬小麦氮、磷、钾养分吸收的影响

由表 1 可知,与 CK1 处理相比其余处理小麦幼苗对氮、磷、钾的吸收量均有不同程度的增加,其中均显著提高了小麦对氮素的吸收,促进效果为 T3 >

T6 > T4 > T5 > CK2, 分别提高了 186.60%、156.48%、155.44%、125.94%、85.50%,平均提高了 141.99%;与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理促进效果为 T3 > T6 > T4 > T5,较 CK2 处理分别提高

了 54.50%、38.26%、37.70%、21.80%，平均提高了 38.07%，说明随着低温生物炭添加量的增加对氮素吸收降低，随着高温生物炭添加量的增加对氮素吸收增加。同样与 CK1 相比其余处理均不同程度地提高了小麦对磷素的吸收，T3、T6 处理均显著高于 CK1，其余处理均不显著，所有处理促进效果为 T3 > T6 > CK2 > T4 > T5，分别提高了 47.89%、25.12%、12.89%、12.35%、7.20%，平均提高了 21.09%；与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理促进效果为 T3 > T6 > T4 > T5，其中 T3、T6 分别提高了 31.00%、10.83%，而 T4、T5 则降低。与 CK1 相比其余处理均不同程度提高了小麦对钾素的吸收，所有处理均显著高于 CK1，其促进效果为 T4 > T6 > T3 > T5 > CK2，分别提高了 83.83%、83.66%、67.29%、46.17%、25.03%，平均提高了 61.20%；与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理促进效果为 T4 > T6 > T3 > T5，分别提高了 47.03%、46.89%、33.80%、16.91%，平均提高了 36.16%，说明随着添加量的增加对钾素吸收增加。

2.3 施用生物炭对小麦中铅、镉含量的影响

2.3.1 施用生物炭对小麦中镉含量的影响 由图 2 可知，与 CK1 处理相比其余处理小麦地上部、根部镉含量有所上升，推测是由于施肥后小麦长势较好，对土壤中各元素吸收量增大所致。与 CK2 相比

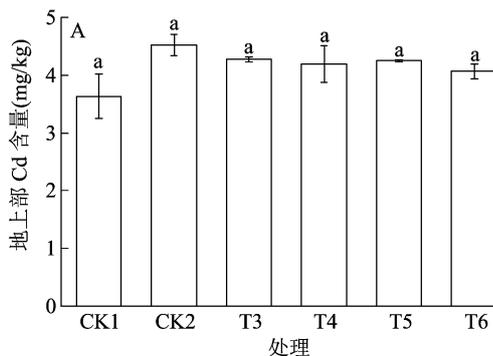


图2 施肥基础上添加不同用量低温、高温生物炭对小麦镉含量的影响

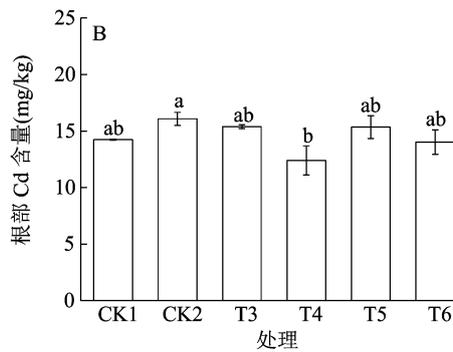
2.3.2 施用生物炭对小麦中铅含量的影响 由图 3 可知，相较于不施肥的空白组 (CK1)，同样基础施肥和添加一定量生物炭处理后小麦长势较好，对土壤中各元素吸收量增大，也会影响小麦对铅的吸收，其中对于地上部除 T4 处理外其余处理均达显著，而对于根部而言发现 T6 处理较 CK1 显著降低。与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理小麦铅含量有所下降，说明添加生物炭能够在一定程度上降低小麦地上部、根部中有效态铅含量。一方面对于地上

表 1 不同处理小麦植株的养分吸收量

处理	N 的吸收量 (mg/盆)	P 的吸收量 (mg/盆)	K 的吸收量 (mg/盆)
CK1	29.11 ± 2.21d	23.89 ± 2.00c	63.16 ± 1.22d
CK2	54.00 ± 0.50c	26.97 ± 0.75bc	78.97 ± 2.95c
T3	83.43 ± 7.79a	35.33 ± 2.84a	105.66 ± 2.21ab
T4	74.36 ± 4.42a	26.84 ± 2.03bc	116.11 ± 6.07a
T5	65.77 ± 0.02b	25.61 ± 1.27bc	92.32 ± 0.13bc
T6	74.66 ± 0.35a	29.89a ± 0.16b	116.00 ± 3.93a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

添加生物炭的 4 个处理小麦镉含量有所下降，说明添加生物炭能够在一定程度上降低小麦地上部、地下部中有效态镉含量。一方面对于地上部而言，添加生物炭的 4 个处理较 CK2 小麦地上部镉含量降低，但处理间并不显著，其降低效果为 T6 > T4 > T5 > T3，较 CK2 处理分别降低了 0.45、0.32、0.27、0.24 mg/kg，说明随着添加量的增加降低小麦地上部 Cd 含量 (图 2 - A)；另一方面对于根部而言，添加生物炭的 4 个处理较 CK2 小麦根部镉含量降低，其中 CK2 与 T4、T5、T6 处理之间达到显著水平，其降低效果为 T4 > T6 > T5 > T3，较 CK2 处理分别降低了 3.67、2.06、0.73、0.68 mg/kg，说明小麦根部 Cd 含量随着添加量的增加而降低 (图 2 - B)。



部而言，添加生物炭的 4 个处理较 CK2 小麦地上部铅含量降低，其中 CK2 与 T4、T5、T6 处理之间达到显著水平，其降低效果为 T4 > T6 > T5 > T3，较 CK2 处理分别降低了 6.21、3.82、3.47、1.55 mg/kg，说明小麦地上部 Cd 含量随着添加量的增加而降低 (图 3 - A)；另一方面对于根部而言，与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理小麦地上部铅含量降低且均达到显著水平，其降低效果为 T6 > T4 > T3 > T5，较 CK2 处理分别降低了 15.26、3.14、2.51、2.47 mg/kg，说

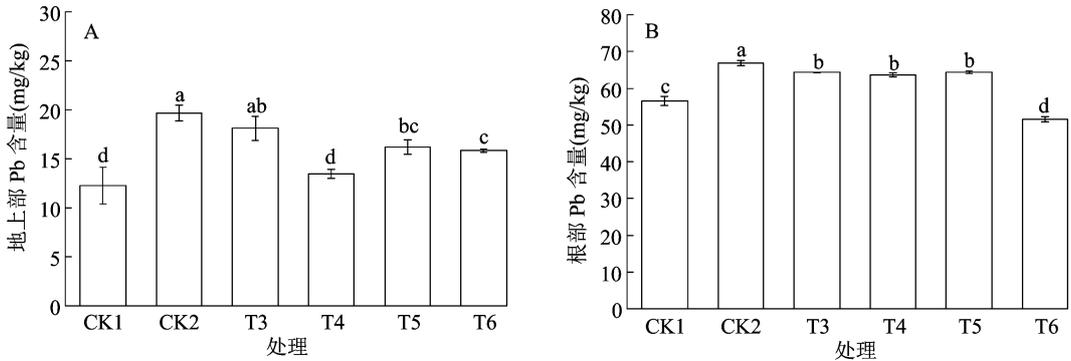


图3 施肥基础上添加不同用量低温、高温生物炭对小麦铅含量的影响

明小麦地上部 Pb 含量随着添加量的增加而降低 (图 3 - B)。

2.4 施用生物炭对土壤理化性质的影响

由表 2 可知,与 CK1 处理相比其余处理对土壤 pH 值有不同程度的降低,pH 值下降变化趋势为 T4 > T3 > CK2 > T5 > T6,土壤 pH 值分别下降 0.49、0.37、0.32、0.30、0.20。与 CK2 相比,低温生物炭的 2 个处理(T3、T4)土壤 pH 值都有所下降但处理之间差异不显著,分别下降 0.05、0.17,随着添加量增加 pH 值降低有增强趋势;高温 450 °C 生物炭(T5、T6)的 2 个处理土壤 pH 值有所上升,同样处理之间差异不显著,分别上升 0.02、0.12,有随着添加量增加 pH 值上升的趋势。

由表 2 可知,与 CK1 处理相比其余处理均使土壤有机质含量显著增加,促进效果为 T4 > T6 > T3 > T5 > CK2,分别提高了 206.49%、199.58%、124.66%、109.79%、48.05%,平均提高了 137.71%;与 CK2 相比添加生物炭的 4 个处理促进效果为 T4 > T6 > T3 > T5,分别提高了 107.02%、102.35%、51.75%、41.70%,平均提高了 75.71%,说明随着添加量的增加土壤有机质含量增加。这说明生物炭能够通过土壤有机质含量水平的提升,提高土壤肥力,进而促进植物的生长发育。

由表 2 可知,与 CK1 处理相比其余处理均能显著增高土壤中的碱解氮含量,各处理增高变化趋势为 T5 > T3 > T4 > T6 > CK2,增幅分别为 108.45%、105.53%、93.29%、63.55%、48.68%;与 CK2 相比,添加生物炭的 4 个处理增高变化趋势为 T5 > T3 > T4 > T6,增幅分别为 40.20%、38.24%、30.01%、10.01%。其中低温 T3、T4 处理中土壤的碱解氮含量随着生物炭用量的增加而下降,分别为 123.38、116.03 mg/kg;高温 T5、T6 处理中土壤碱解

氮含量也随着生物炭用量的增加而下降,分别为 125.13、98.18 mg/kg。

由表 2 可知,与 CK1 处理相比,其余处理均能显著增高土壤中的速效磷含量,各处理增高变化趋势为 T6 > T3 > T5 > T4 > CK2,增幅分别为 110.64%、99.86%、93.72%、72.03%、66.11%;与 CK2 相比,添加生物炭的 4 个处理增高变化趋势为 T6 > T3 > T5 > T4,增幅分别为 26.80%、20.32%、16.62%、3.56%,其中 T3、T4 处理随着生物炭用量的增加而下降,分别为 141.84、122.09 mg/kg, T5、T6 中土壤速效磷含量随着生物炭用量的增加而增加,分别为 137.48、149.49 mg/kg。可以明显看出,添加相同用量生物炭的前提下,其中 T3、T6 处理之间没有显著差异,T4、T5 处理之间没有显著差异,说明 1% 的 250 °C 生物炭添加量可以达到 2% 450 °C 生物炭添加效果,而 2% 的 250 °C 生物炭添加量可以达到 1% 450 °C 生物炭添加效果。

由表 2 可知,与 CK1 处理相比,除 CK2 外其余处理均能显著增高土壤中的速效钾含量,各处理增高变化趋势为 T6 > T3 > T5 > T4 > CK2,增幅分别为 124.51%、93.79%、81.37%、72.55%、23.53%;与 CK2 相比,添加生物炭的 4 个处理增高变化趋势为 T6 > T3 > T5 > T4,增幅分别为 81.75%、56.88%、46.82%、39.68%,其中 T3、T4 处理中土壤的速效钾含量随着生物炭用量的增加而下降,分别为 527.11、469.33 mg/kg, T5、T6 处理中土壤速效钾含量随着生物炭用量的增加而增加,分别为 493.33、610.67 mg/kg。T6 处理与 T3、T4、T5 处理之间差异显著,而 T3、T4、T5 之间差异不显著。

2.5 施用生物炭对土壤中有效态铅、镉含量的影响

2.5.1 施用生物炭对土壤中有效态镉含量的影响

由图 4 可以看出,施用生物炭的 4 个处理与 CK1

表 2 施用生物炭对土壤理化性质的影响

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
CK1	7.88 ± 0.05a	21.25 ± 1.33d	60.03 ± 0.49d	70.97 ± 3.28d	272.00 ± 3.27c
CK2	7.56 ± 0.04bc	31.46 ± 1.51c	89.25 ± 0.74c	117.89 ± 5.79c	336.00 ± 8.64c
T3	7.51 ± 0.08cd	47.74 ± 3.56b	123.38 ± 7.42a	141.84 ± 3.62a	527.11 ± 22.03b
T4	7.39 ± 0.06bc	65.13 ± 2.24a	116.03 ± 12.87ab	122.09 ± 8.95bc	469.33 ± 18.86b
T5	7.58 ± 0.10bc	44.58 ± 0.94b	125.13 ± 7.42a	137.48 ± 11.62ab	493.33 ± 46.34b
T6	7.68 ± 0.07b	63.66 ± 2.51a	98.18 ± 1.48bc	149.49 ± 6.11a	610.67 ± 64.11a

和 CK2 相比均显著降低土壤中有效态镉含量,其中相较于 CK1 其余处理降低效果为 T6 > T3 > T4 > T5 > CK2, 分别比 CK1 降低了 0.24、0.21、0.16、0.11、0.03 mg/kg, 降幅分别为 21.19%、17.65%、15.93%、10.25%、2.19%, 其中 T3 与 T6 处理之间差异不显著, T4 与 T5 处理之间差异不显著; 相较于 CK2, 添加生物炭的 4 个处理土壤有效镉含量均显著降低, 降低效果为 T6 > T3 > T4 > T5, 分别降低了 0.22、0.19、0.14、0.08 mg/kg, 降幅分别为 17.49%、15.41%、11.23%、6.86%。综上所述可以看出, 添加低温生物炭的 T3、T4 处理的土壤有效态镉含量随着添加量的增加有增加趋势, 而添加高温生物炭的 T5、T6 处理的土壤有效态镉含量则随着添加量的增加显著降低。

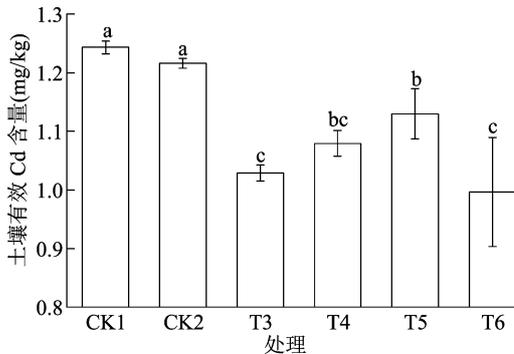


图 4 添加不同用量不同热解温度生物炭对土壤有效态镉含量的影响

2.5.2 施用生物炭对土壤中有效态铅含量的影响

由图 5 可以看出, 相较于 CK1, 其余处理降低效果为 T4 > T6 > T3 > T5 > CK2, 分别较 CK1 降低了 11.47、8.86、8.70、3.48、1.11 mg/kg, 降幅分别为 14.02%、10.83%、10.63%、4.26%、1.36%, 其中 T3、T4 和 T6 处理之间差异不显著; 相较于 CK2, 添加生物炭的 4 个处理土壤有效铅含量均降低, 降低效果为 T4 > T6 > T3 > T5, 分别降低了 10.36、7.75、7.59、2.37 mg/kg, 降幅分别为 12.84%、9.61%、

9.40%、2.94%。综上所述可以看出, 添加低温生物炭的 T3、T4 处理土壤有效态铅含量随着添加量的增加有降低趋势, 而添加高温生物炭的 T5、T6 处理土壤有效态铅含量随着添加量的增加显著降低。

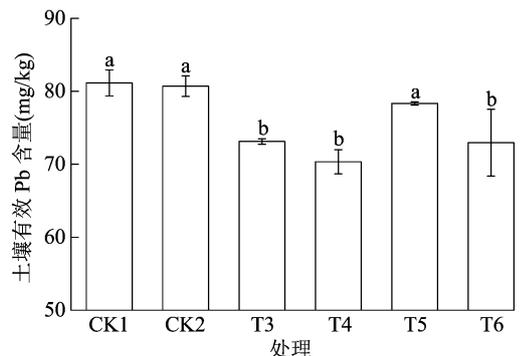


图 5 添加不同用量不同热解温度生物炭对土壤有效态铅含量的影响

3 讨论与结论

3.1 施用生物炭对小麦植株生长发育的影响

本试验发现, 在施肥的基础上施加低温、高温生物炭都可促进小麦苗期生长, 其中对于地上部干质量、地下部干质量、总干质量的积累均有提高, 这与方明等的研究结果^[14]一致: 施用生物炭可以改善土壤性状, 提高土壤肥力, 促进白菜生长; 刘玉学等研究也发现, 施用生物炭的处理可以改善土壤理化性质, 促进小青菜生长^[15]。本研究发现, 生物炭对小麦生长发育干质量的积累与添加量有密切关系。方明等研究发现, 在红壤土上白菜地上、地下生物量的积累随着生物炭施用量的增加而增加^[14]; 张继旭等研究发现, 在烤烟生长中, 其根系生物量与根冠比随生物炭添加量的增加而增加^[16]; 宋婷婷等研究发现, 不同生物炭和添加量对小麦和黄瓜根茎生长影响显著^[17]; 刘阿梅等以萝卜和青菜为研究对象, 添加不同比例生物炭发现, 均对其鲜质量有着不同程度的促进作用, 且随着添加生物炭的比例增大, 其鲜质量增加得更明显^[18]; 高海英在试验中添

加炭基肥料使小麦的干物质质量显著增大^[19],可见本研究中对于高温生物炭的添加与前人结果保持一致,而对于在基础施肥上添加低温生物炭而言,本试验发现,随着生物炭添加量的增加小麦地上部、根部生物量积累有所下降,表明短时间内施用可能会抑制小麦生长。此外对于小麦根冠比来说,施肥后可减少生物量向根系的分配,但是,施用生物炭对作物地上、地下部的调节作用,仍有待进一步研究。

本研究表明,添加生物炭后冬小麦对氮、磷、钾的吸收均有提升,其中 T3 处理中小麦对氮、磷的吸收最高,T4、T6 处理下小麦对钾素吸收最高。康日峰等的研究表明,施用生物炭基肥料均促进了小麦对氮、磷养分的吸收,其中氮平均提高了 19.07%,磷平均提高了 15.00%^[20]。生物炭对植株生长发育的促进作用,推测原因是生物炭因其本身特性,在吸附和保持土壤养分、激活土壤微生物等方面起到良好的作用^[21-22]。

3.2 施用生物炭对土壤肥力与重金属有效性的影响

本试验发现,氮磷钾复合肥的施用使土壤 pH 值下降,这与赵晶等的研究结论^[23]一致,但生物炭添加后造成土壤 pH 值变化可能是短期复合肥单独施用的原因,也可能与生物炭联合施用的原因,其中施用低温生物炭的处理虽然土壤 pH 值降低不显著,但比高温生物炭的添加效果略好。施用生物炭后,可以提高土壤肥力,促进小麦生长发育,这与唐志文等发现生物炭与土壤肥料关系紧密,其中包括促进生长、改善土壤等研究结果^[24]相似;同样和郭帅等发现生物炭和复合肥配施后促进白菜和玉米生长、改善土壤理化性质研究结果^[25-26]相似;还和王智慧等发现田间试验中生物炭与化肥配施后可以在不同程度上提高土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量研究结果^[27]相似。另外发现,高温和低温生物炭处理土壤碱解氮含量均随着生物炭添加量增加有降低趋势,这可能是由于生物炭的碳氮比较高的原因直接影响碱解氮的生物固定降低了土壤中的有效氮含量,从而对农作物对土壤中氮的吸收造成影响^[28-29]。

研究发现,生物炭能够降低污染土中铅、镉的迁移率^[30],进而减少植物铅、镉的吸收。黄敏等研究发现,生物炭用量大于 5% 时,土壤中有效态铅、镉含量分别降低了 54.41% 和 77.47%,达到了最大

降幅^[31]。本试验中在施肥后添加生物炭同样也显著降低了土壤中有效态铅、镉的含量,并且发现低温生物炭的施用几乎与高温生物炭发挥同样的效果。对于添加量来说施用低温生物炭土壤中有效镉变化随着添加量的增加略有上升但不显著,其余处理均随着生物炭用量的增加对土壤中有效铅、镉固定效果增强。一般来说土壤 pH 值升高会增强土壤有机/无机胶体及土壤黏粒对重金属离子的吸附能力,使土壤中重金属离子有效性降低,减少可交换态重金属离子浓度。对于本试验来说,添加高温生物炭的处理较施肥、添加低温生物炭的处理短期土壤 pH 值有略微提升,可能因为土壤 pH 值与 Cd、Pb 生物有效性以及生物炭的吸附作用有紧密联系^[31]。对于低温生物炭来说本试验应用在碱性土壤中,短期内不仅土壤 pH 值有所减低表现出修正土壤碱化问题,并且对土壤中铅、镉有效性固定效果和高温生物炭效果几乎相当。原因可能本试验制备的低温生物炭呈酸性,添加到土壤中使土壤 pH 值短期有降低趋势,也可能因为氮磷钾复合肥中也含有一定的磷和磷酸盐,磷酸盐可通过诱导吸附和沉淀作用影响镉的有效性,大量研究已经证明磷肥能够显著降低植株中 Cd 的含量,还有研究认为施用肥料后,土壤表面净负电荷增加导致其对 Cd 离子的吸附增强,使重金属离子不断以静电吸附方式吸附在土壤颗粒周围,从而降低土壤有效态 Cd 含量^[32-34],本研究也进一步看出施肥后土壤中有效态 Cd、Pb 含量有降低的趋势。

总之,在碱性土壤中化肥和低温生物炭共施不仅能有效地固定污染土壤中的重金属,也可以降低碱性土壤 pH 值,但低温生物炭与化肥之间的进一步协作机制需要进一步研究。由于本研究试验期较短,低温生物炭与化肥最佳配比以及对小麦产量的形成也需投入田间试验进行后期验证,同时低温生物炭与化肥配施对土壤肥力和小麦生长的作用机制尚需进行深入、系统的研究。本研究也为下一步生物炭低温炭基肥开发和低温生物炭与化肥配施减肥增产修复农田重金属进一步研究提供支撑。

综上所述,在小麦苗期,施肥和施肥的基础上添加低温、高温生物炭后均可以显著提高小麦苗期地上部的干质量、总干质量,但显著降低了小麦根部的干质量和根冠比。施肥的基础上添加低温、高温生物炭后可以提高小麦对氮元素的吸收,一定程度降低小麦幼苗对镉和铅的吸收,其中 T4、T5、T6

处理对抑制根部吸收效果显著;另外,还增加土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮含量,降低土壤有效态镉和铅含量。

参考文献:

- [1]王璐瑶,谢 潇. 生物炭的制备及应用研究进展[J]. 农业与技术,2020,40(22):34-36.
- [2]徐美丽,陈永光,肖荣波,等. 生物炭对土壤有效态重金属的作用机制进展[J]. 环境工程,2021,39(8):165-172,226.
- [3]Sparrevik M, Lindhjem H, Andria V, et al. Environmental and socioeconomic impacts of utilizing waste for biochar in rural areas in Indonesia: a systems perspective[J]. Environmental Science & Technology,2014,48(9):4664-4671.
- [4]Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. Die Naturwissenschaften,2001,88(1):37-41.
- [5]Kloss S, Zehetner F, Wimmer B, et al. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2014,177(1):3-15.
- [6]Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. Biology and Fertility of Soils,2002,35(4):219-230.
- [7]聂新星,李志国,张润花,等. 生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报,2016,32(9):27-32.
- [8]金 梁,魏 丹,郭文义,等. 化肥单施及生物炭与化肥配施对土壤物理性质、大豆形态学指标及产量影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(2):29-32.
- [9]张志龙,陈效民,李小萌,等. 生物质炭与化肥配施对连作黄瓜产量及肥料利用率的影响[J]. 土壤,2021,53(1):47-54.
- [10]徐绮雯,马淑敏,朱 波,等. 生物炭与化肥配施对紫色土肥力与微生物特征及油菜产量品质的影响[J]. 草业学报,2020,29(5):121-131.
- [11]王期凯,郭文娟,孙国红,等. 生物炭与肥料复配对土壤重金属镉污染钝化修复效应[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(6):583-589.
- [12]李 格,代 快,李江舟,等. 烟秆生物炭与化肥配施对烟草生长及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(3):91-100.
- [13]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 中国农业出版社,2000.
- [14]方 明,任天志,赖 欣,等. 施用生物炭对红壤和潮土种植小白菜氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(6):123-133.
- [15]刘玉学,王耀锋,吕豪豪,等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青莱产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1438-1444.
- [16]张继旭,张继光,张忠锋,等. 秸秆生物炭对烤烟生长发育、土壤有机碳及酶活性的影响[J]. 中国烟草科学,2016,37(5):16-21.
- [17]宋婷婷,陈义轩,李 洁,等. 不同材料生物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.
- [18]刘阿梅,向言词,田代科,等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):193-198,204.
- [19]高海英. 一种生物炭基氮肥的特征及其对土壤作物的效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [20]康日峰,张乃明,史 静,等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(6):33-38.
- [21]张文玲,李桂花,高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(17):153-157
- [22]刘晓宇,刘 杨,冯彦房,等. 水稻秸秆生物炭对渍害胁迫下稻麦轮作土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):211-215.
- [23]赵 晶,冯文强,秦鱼生,等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报,2010,47(5):953-961.
- [24]唐志文,罗从军,李桂华. 生物炭对土壤肥料的作用及未来发展[J]. 农业开发与装备,2021(4):74-75.
- [25]郭 帅,杨梢娜,黄芳晨,等. 不同生物炭配比对小青菜生长及土壤改良效果的影响[J]. 浙江农业科学,2020,61(7):1295-1297.
- [26]吕贝贝,张丽萍,张贵云,等. 生物炭配施化肥对土壤肥力及玉米生长的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(1):81-86.
- [27]王智慧,唐春双,赵长江,等. 生物炭与肥料配施对土壤养分及玉米产量的影响[J]. 玉米科学,2018,26(6):146-151,159.
- [28]张晗芝,黄 云,刘 钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [29]曾 爱,廖允成,张俊丽,等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2013,32(5):1009-1015.
- [30]杨璋梅,方战强. 生物炭修复 Cd、Pb 污染土壤的研究进展[J]. 化工环保,2014,34(6):525-531.
- [31]黄 敏,刘 茜,朱楚梵,等. 施用生物质炭对土壤 Cd、Pb 有效性影响的整合分析[J]. 环境科学学报,2019,39(2):560-569.
- [32]王 丽,邹 茸,王秀斌,等. 适量施磷有效提高苋菜对镉污染土壤的修复能力[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):354-361.
- [33]Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium - contaminated soils [J]. Journal of Environmental Management,2016,166:204-210.
- [34]张水勤,王峰源,姜慧敏,等. 设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子[J]. 农业环境科学学报,2014,33(9):1721-1727.