

张枫叶,陈 雷,李 可,等. 钝化剂生物炭添加量对花生土壤-籽仁镉、铅积累及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2026,54(13):234-241.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.13.029

钝化剂生物炭添加量对花生土壤-籽仁镉、铅积累及品质的影响

张枫叶,陈 雷,李 可,贺群岭,张梦圆,吴继华
(商丘市农林科学院,河南商丘 476000)

摘要:探究不同添加量生物炭钝化剂对花生土壤-籽仁镉铅积累及品质、产量的影响,以期为花生安全生产提供参考依据。采用大田试验,设置常规施肥(CK)、常规施肥+有机肥(B1),并在B1基础上施用4个生物炭用量处理(B2~B5),研究不同添加量生物炭对花生土壤速效养分含量、酶活性和土壤-籽仁Cd、Pb积累及花生品质、产量的影响。结果表明,相较于CK,不同添加量生物炭钝化剂能够有效提升土壤肥力,降低土壤-籽仁镉铅含量并且达到提升花生品质、产量的效果。B3处理在提升土壤速效养分、矿质养分方面效果最佳;B4处理在提升土壤酶活性和降低土壤-籽仁Cd、Pb含量方面效果最佳。由花生土壤-籽仁各项指标间的相关关系可知,生物炭能够通过提升土壤肥力,降低土壤Cd、Pb有效性及籽仁Cd、Pb含量,从而达到有效提升花生籽仁品质、产量的效果。其中,相较于CK,B3处理提升籽仁油酸、亚油酸品质最佳,增幅分别为19.98%、23.21%;B4处理提升花生荚果、籽仁产量效果最佳,增幅分别为10.09%、11.20%。综上,B4处理生物炭添加量更加适宜作为该地区提升土壤肥力及花生品质、产量和降低土壤-籽仁Cd、Pb含量的最优施肥方案。

关键词:生物炭;花生;土壤肥力;土壤-籽仁镉铅;产量;品质

中图分类号:X53;S565.204 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)13-0234-08

花生(*Arachis hypogaea* L.)作为我国种植面积第二大油料作物,常年播种面积超460万 hm^2 ,单产和总产均居油料作物之首,并具有适应性强、抗旱耐贫瘠等特点^[1-2]。花生籽仁富含维生素、蛋白质、氨基酸及脂肪酸等多种营养元素,在降低胆固醇、保护心脑血管及提高免疫力等方面作用显著^[3]。花生作为地下结果作物,主根系较为发达,且花生荚果与土壤接触极易吸收重金属,从而随着营养成分的转移将重金属转运至荚果籽仁,因此,花生对土壤重金属的吸收富集能力常常高于一般大田作物^[4-5]。此外,镉(Cd)、铅(Pb)元素作为花生种植中常见的重金属污染物,具有难降解、难迁移及易被作物吸收富集等特点。其中Cd、Pb元素在

花生土壤-籽仁间转运富集,由食物链进入人体后会造成肾脏、肝脏受损及影响消化系统、免疫系统、生殖系统的正常运行等一系列健康问题^[6]。综上,在花生主产区对受重金属污染的高油高产花生品种进行土壤钝化修复,选择适宜的重金属钝化材料,充分利用吸附、沉淀、络合、氧化还原等作用机制,调节土壤重金属有效性,将其转变为难以被作物吸收的组分,对实现土壤有效态Cd、Pb等重金属元素的消减及保证作物产量、品质具有现实意义。

农田土壤是作物生长发育的养分供给基础,更是人类生存发展的物质源泉和根本保障^[7]。现如今,化肥农药的不合理施用对我国农业用地造成了严重的镉(Cd)、铅(Pb)等重金属污染问题,进而影响作物生产及通过食物链危害人体健康,存在一系列安全隐患,最终成为了制约我国农业可持续发展的现实性问题之一^[8]。近年来,有机肥、生物炭等钝化剂修复土壤Cd、Pb等重金属污染,减少作物器官重金属吸收富集是当前研究热点^[9-10]。其中,生物炭是由稻壳、秸秆等农田废弃物在缺氧或无氧条件下,通过高温热解得到的一种富含多种作物营养元素的钝化材料,具有孔隙发达、比表面积大、含氧官能团丰富及吸附性强等特点^[11]。前人研究

收稿日期:2025-07-25

基金项目:河南省重大科技专项(编号:221100110300);河南省农业良种联合攻关项目(编号:20220100001);河南省花生产业技术体系建设专项(编号:HARS-22-05-Z1)。

作者简介:张枫叶(1982—),女,河南商丘人,硕士,副研究员,主要从事花生种质资源与遗传育种研究。E-mail: fengyezhang666@126.com。

通信作者:吴继华,研究员,主要从事花生育种与栽培生理研究。E-mail:13598397765@163.com。

指出,生物炭添加能够显著降低土壤有效态重金属含量,有效降低作物籽粒中富含的 Cd、Pb 等重金属含量^[12-14]。此外,生物炭在降低土壤 Cd、Pb 重金属有效性,抑制作物对 Cd、Pb 重金属积累的同时,还能够达到提升土壤有效性养分含量及土壤酶活性的效果^[15]。生物炭作为重金属污染土壤钝化修复材料,虽然能够通过表面吸附、络合、离子交换等途径有效固定土壤重金属离子,降低其生物有效性,但在实际应用中必须考虑到生物炭种类、施用量及土壤环境等影响对钝化效果带来的差异性^[16-17]。

综上所述,本研究通过在豫东地区花生主产区选择高油高产的商花 21 号花生品种为研究对象,在特定土壤类型及品种的情况下,选用不同施用水平的生物炭为钝化材料,探讨连续 2 年生物炭添加对花生主产区土壤速效养分、酶活性的改善状况,并分析生物炭对 Cd、Pb 重金属有效性的钝化作用及特定花生品种对 Cd、Pb 重金属的消减作用,以及最终对花生产量及品种的作用效果。通过综合评价,以期为该地区 Cd、Pb 重金属污染钝化修复及花生产量、品质改善提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于河南省商丘市民权县民权农场十分场(115°23'E, 34°63'N)进行。该地区年平均温度 14.1℃左右,年平均降水量 674 mm,年均无霜期 213 d。土壤类型为沙壤土,表层土壤(0~20 cm)基本理化性质:有机质含量 12.74 g/kg,碱解氮含量 55.47 mg/kg,速效磷含量 19.27 mg/kg,速效钾含量 140.81 mg/kg。

1.2 供试材料

供试花生为高油高产的商花 21 号品种,为商丘市农林科学院自育品种。试验地就近购买腐熟羊粪有机肥,其 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 1.12%、0.79%、2.37%,有机质含量为 41.27%;选购河南立泽环保科技有限公司生产的玉米秸秆生物炭,其有机碳含量 42.08%、全氮含量 1.49%、全磷含量 2.36%、全钾含量 15.82%、氢含量 1.08%、灰分含量 8.43%。

1.3 试验设计

试验于 2024 年 5 月上旬进行花生种植,9 月中旬进行收获,试验地采用随机区组排列,播前进行

发芽率试验。起垄种植,一垄双行,垄距 0.8 m,行长 8.34 m,垄上行距 0.25 m,穴距 0.17 m,1 穴 2 粒,播种深度 3~5 cm。分别设置 CK 空白处理、B1 单一施用 1.5 t/hm² 有机肥处理,并在 B1 基础上设置 2.5 t/hm² (B2)、3 t/hm² (B3)、3.5 t/hm² (B4)、4 t/hm² (B5) 共 4 个生物炭用量处理,共计 6 个处理。每个处理 3 次重复,小区面积设置为 1.6 m × 8.34 m。将羊粪有机肥与生物炭于播前一次性施入土壤。花生生育期其余管理措施均参照大田常规方式进行。

1.4 样品采集与测定

于 2024 年 9 月中旬(花生成熟期)采集花生试验地土壤样品。采用 5 点取样法收集各处理 0~20 cm 表层土壤并混为 1 个土样,随后装袋密封带回实验室。新鲜土样用于硝态氮及铵态氮含量测定,风干过 60 目筛用于有机质、速效养分含量和酶活性测定,风干过 100 目筛用于镉、铅含量测定。运用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量,钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量,火焰光度计法测定土壤速效钾含量,紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量,靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量^[18]。运用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶(CAT)活性;运用苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶(UE)活性;运用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶(SC)活性;运用磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶(ALP)活性^[19]。参照 GB/T 17141—1997《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》测定土壤全量镉、铅含量;参照 GB/T 23739—2009《土壤质量有效态铅和镉的测定原子吸收法》测定土壤有效态镉、铅含量;参照 GB 5009.15—2023《食品安全国家标准 食品中镉的测定》测定籽仁镉含量;参照 GB 5009.12《食品安全国家标准 食品中铅的测定》测定籽仁铅含量。花生成熟期选取各处理小区所有植株,摘取荚果,风干晾晒后称重,之后将荚果剥壳进行籽仁称重。不同处理花生籽仁油酸、亚油酸采用近红外谷物分析仪测定,每个处理 3 次重复。

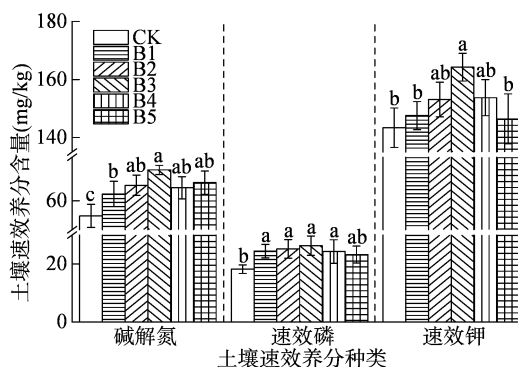
1.5 数据统计与分析

运用 Microsoft Excel 进行统计整理,SPSS 25.0 软件对数据进行差异性分析,运用 Origin 2021 对数据进行相关性分析作图。富集系数(BCF)的计算如下:BCF = 花生籽仁 Cd 或 Pb 含量(mg/kg)/土壤中全量 Cd 或 Pb 含量(mg/kg)。

2 结果与分析

2.1 不同添加量钝化剂对土壤速效养分含量的影响

不同添加量钝化剂处理下土壤速效养分含量变化如图 1 所示。就土壤碱解氮而言,相较于 CK,各处理均显著提升了土壤碱解氮含量,含量提升效果由大到小依次为 B3 > B5 > B2 > B4 > B1 > CK。就土壤速效磷而言,各处理均能够达到提升土壤速效磷含量的效果,其中,B1、B2、B3、B4 处理提升效果达到了显著性水平。就土壤速效钾而言,各处理均达到了提升土壤速效钾含量的效果,其中,仅 B3 处理达到了显著性水平。综上可知,B3 处理在提升土壤速效养分方面效果最佳,且相较于 CK,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量增幅依次为 28.95%、44.34%、14.55%。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 2 至图 9 同

图1 不同添加量钝化剂对土壤速效养分含量的影响

2.2 不同添加量钝化剂对土壤矿质氮养分含量的影响

不同添加量钝化剂处理下土壤矿质养分含量变化如图 2 所示。就土壤硝态氮而言,相较于 CK,除 B1 处理外,B2、B3、B4、B5 处理均能够显著提升土壤硝态氮含量,且增幅分别为 19.35%、35.81%、34.45%、29.62%。就土壤铵态氮而言,相较于 CK,B2、B3、B4 处理达到了提升土壤铵态氮含量的效果,且以 B3 处理提升效果最佳,增幅为 11.66%。综上可知,B3 处理在提升土壤矿质氮含量效果方面综合效果最佳。

2.3 不同添加量钝化剂对土壤镉、铅含量的影响

2.3.1 不同添加量钝化剂对土壤全量镉、铅含量的影响 不同添加量钝化剂处理下土壤全量 Cd、Pb 含量如图 3 所示。由土壤全量 Cd 含量变化可知,与 CK 相比,不同添加量钝化剂均能显著降低土壤

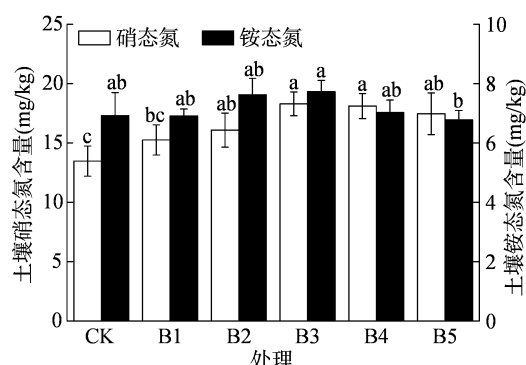


图2 不同添加量钝化剂对土壤矿质氮养分含量的影响

全量 Cd 含量,且不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$),降幅范围为 16.32% ~ 41.13%,其中,以 B4 处理降低土壤全量 Cd 含量最为明显,降幅为 41.13%;其次为 B3 处理,降幅为 36.87%。由土壤全量 Pb 含量变化可知,与 CK 相比,不同添加量钝化剂降低土壤全量 Pb 含量均达到了显著性水平($P < 0.05$),降幅为 5.33% ~ 27.38%,其中,以 B4 处理降低土壤全量 Pb 含量效果最佳,降幅为 27.38%;其次为 B3 处理,降幅为 24.52%。综上可知,B3、B4 处理钝化剂添加量在降低土壤全量 Cd、Pb 含量效果更为明显,而并非钝化剂添加量越高降低土壤全量 Cd、Pb 含量越好。

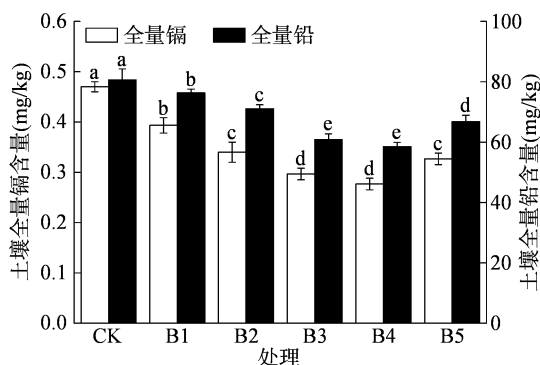


图3 不同添加量钝化剂对土壤全量镉铅含量的影响

2.3.2 不同添加量钝化剂对土壤有效态镉铅含量的影响 不同添加量钝化剂对土壤有效态 Cd、Pb 含量的变化如图 4 所示。由土壤有效态 Cd 含量变化可知,与 CK 相比,各钝化剂处理均能够显著降低土壤有效态 Cd 含量,降幅范围为 15.64% ~ 40.10%,其中,以 B4 处理降低土壤有效态 Cd 含量效果最佳,降幅为 40.10%;其次为 B3 处理,降幅为 36.71%。由土壤有效态 Pb 含量变化可知,除 B1 处理外,B2、B3、B4、B5 处理均显著降低了土壤有效态 Pb 含量,降幅范围为 8.17% ~ 25.64%,其中,以 B4 处理降低土壤有效 Pb 含量效果最佳,降幅为

25.64%;其次为 B3 处理,降幅为 23.00%。由此说明,钝化剂在降低土壤有效态 Cd、Pb 含量方面效果显著,且均以 B4 处理钝化剂添加量效果最佳。

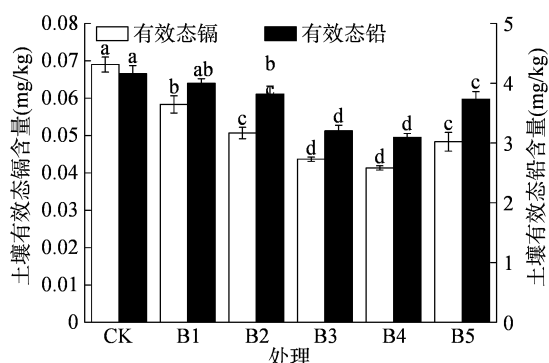


图4 不同添加量钝化剂对土壤有效态镉铅含量的影响

2.4 不同添加量钝化剂对花生籽仁镉、铅含量的影响

不同添加量钝化剂下花生籽仁 Cd、Pb 含量的变化如图 5 所示。就花生籽仁 Cd 含量变化而言,与 CK 相比,各钝化剂处理均能够达到显著降低籽仁 Cd 含量的效果,降幅范围为 14.94% ~ 42.43%,各处理降幅由高到低依次为 B4 > B3 > B5 > B2 > B1 > CK,其中,B4 处理降低籽仁 Cd 含量效果最佳,降幅为 42.43%;其次为 B3 处理,降幅为 37.45%。就花生籽仁 Pb 含量变化而言,与 CK 相比,各钝化剂处理在降低籽仁铅含量方面均能够达到显著性效果,降幅范围为 20.34% ~ 52.57%,各处理降幅效果由高到低依次为 B4 > B3 > B5 > B2 > B1 > CK,其中,B4 处理在降低籽仁铅含量方面效果最佳,降幅为 52.57%;其次为 B3 处理,降幅为 50.84%。由此说明,钝化剂处理在降低土壤有效性 Cd、Pb 含量的同时,能够同步降低花生籽仁对 Cd、Pb 的吸收能力。

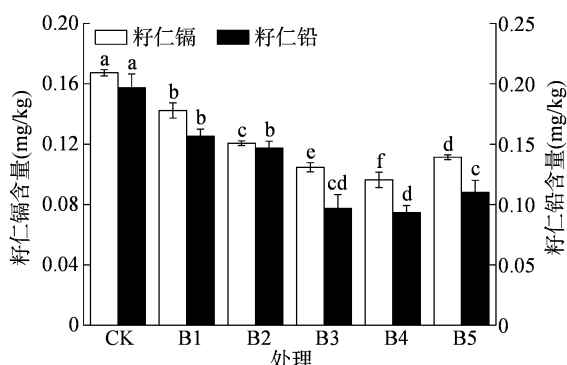


图5 不同添加量钝化剂对花生籽仁镉铅含量的影响

2.5 不同添加量钝化剂对花生籽仁镉、铅富集系数的影响

不同添加量钝化剂下花生籽仁 Cd、Pb 的生物

富集系数如图 6 所示。就花生籽仁 Cd 的生物富集系数而言,与 CK 相比,各钝化剂处理籽仁镉富集系数均不存在显著性差异,镉富集系数范围在 0.34 ~ 0.36。就花生籽仁 Pb 的生物富集系数而言,与 CK 相比,各钝化剂处理籽仁铅富集系数存在显著性差异,铅富集系数范围在 0.001 6 ~ 0.002 5,各处理富集系数由高到低依次为 CK > B2 > B1 > B5 > B4 = B3, B3、B4 处理籽仁中铅富集系数下降程度最大,降幅均为 35.14%。由此说明,生物炭钝化剂并未有效降低花生籽仁镉富集系数,但能够有效降低花生籽仁对 Pb 含量的吸收能力。

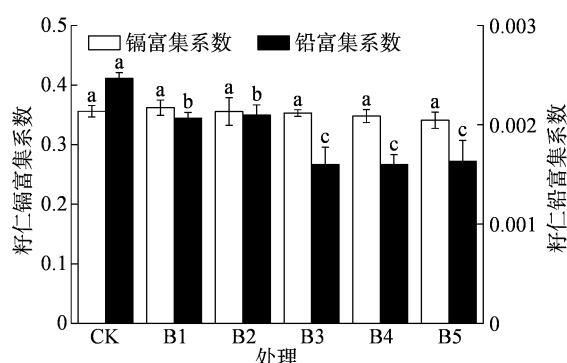


图6 不同添加量钝化剂对花生籽仁镉铅富集系数的影响

2.6 不同添加量钝化剂对土壤酶活性的影响

由图 7 可知,不同添加量钝化剂对土壤酶活性具有显著性影响 ($P < 0.05$)。就土壤 CAT 活性而言,相较于 CK,各处理均具有显著提升效果,且以 B3、B4 处理效果最佳,增幅分别为 44.54%、44.74%;就土壤 SC 活性而言,除 B1 处理外, B2、B3、B4、B5 处理均显著提升了土壤 SC 活性,增幅分别为 28.00%、27.71%、34.45%、29.75%;就土壤 ALP 活性而言,除 B1 处理外,各处理均能够显著提升土壤 ALP 活性,且以 B4、B5 处理效果最佳,增幅分别为 69.15%、71.61%;就土壤 UE 活性而言,各处理均能够显著提升土壤 UE 活性,其中 B2、B3 处理效果最佳,增幅分别为 62.79%、55.48%。综上可知, B4 处理提升土壤 CAT、SC、ALP 活性综合效果最为显著。

2.7 不同添加量钝化剂对花生品质及产量的影响

不同添加量钝化剂对花生品质的影响如图 8 所示。就花生籽仁油酸含量而言,相较于 CK, B2、B3、B4 处理均能达到显著提升籽仁油酸含量的效果,增幅范围为 8.90% ~ 19.98%,增幅效果由高到低依次为 B3 > B2 > B4 > CK。其中, B3 处理提升籽仁油酸效果最佳,增幅为 19.98%;其次为 B2 处理,增幅为 16.25%。就花生籽仁亚油酸含量而言,相较于

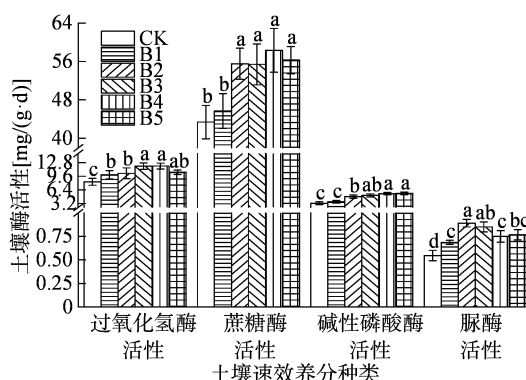


图7 不同添加量钝化剂对土壤酶活性的影响

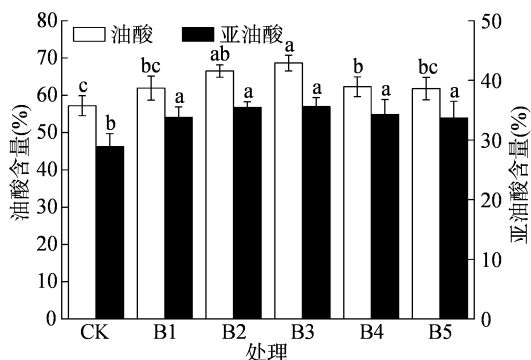


图8 不同添加量钝化剂对花生籽仁油酸及亚油酸含量的影响

CK,各钝化剂处理均能显著提升籽仁亚油酸含量,增幅范围为 16.64%~23.21%,增幅由高到低依次为 B3>B2>B4>B1>B5>CK。其中,B3 处理提升籽仁亚油酸含量效果最佳,增幅为 23.21%;其次为 B2 处理,增幅为 22.75%。综上说明,低添加量钝化剂(B2、B3)处理对籽仁油酸和亚油酸含量提升效果最佳。

不同添加量钝化剂对花生产量的影响如图 9 所示。就花生荚果产量而言,相较于 CK,各钝化剂处理均能达到提升荚果产量的效果,其中,B3、B4 处理提升荚果产量达到了显著性水平,增幅分别为 9.04%、10.09%。就花生籽仁产量而言,相较于 CK,B2、B3、B4 处理能够提升籽仁产量,增幅范围为 7.09%~11.20%,增幅效果由高到低依次为 B4>B3>B2>CK。其中,B4 处理提升籽仁产量效果最佳,增幅为 11.20%;其次为 B3 处理,增幅为 10.15%。综上可知,B4 处理在提升花生荚果和籽仁产量方面效果最佳,说明该处理下花生荚果和籽仁产量存在正向反馈关系。

2.8 花生土壤-籽仁各项指标间的相关关系

由图 10 可知,花生土壤与籽仁各指标间存在显著相关关系。就土壤-籽仁镉、铅含量而言,土壤有效态镉、铅含量与籽仁镉、铅含量之间呈现极显著

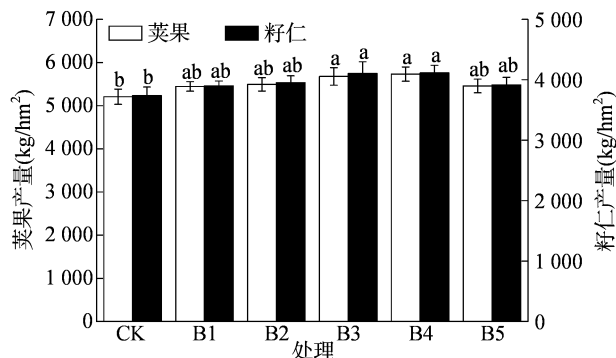


图9 不同添加量钝化剂对花生荚果及籽仁产量的影响

著正相关,说明土壤有效镉、铅含量对花生籽仁镉、铅含量的积累具有较大影响。土壤全量及有效态镉铅含量、籽仁镉铅含量与土壤速效养分含量、硝态氮含量、土壤酶活性及花生品质、产量间存在显著负相关,说明花生土壤或者籽仁镉、铅含量大致与土壤肥力及品质、产量呈负向反馈关系,生物炭在降低土壤-籽仁镉、铅含量的同时能够有效提升土壤肥力,改善花生籽仁品质及产量。就籽仁品质及产量而言,花生品质及产量均与土壤速效磷含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性呈显著正相关,说明土壤速效磷含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性对花生品质、产量的形成具有促进作用。

3 讨论

3.1 不同添加量钝化剂对花生土壤肥力的影响

生物炭作为土壤钝化剂具有吸附性强及化学反应活性强等特点,可以用作化肥、有机肥的缓释剂,达到减缓养分流失,提升土壤对化肥及有机肥的利用率,从而显著提升土壤有效磷及速效钾等养分含量的效果^[20]。俞若涵等研究指出,施用生物炭能够有效吸附土壤速效养分并缓慢释放,从而减少降雨、灌溉等造成的土壤养分流失,达到有效增加土壤中速效养分含量的效果^[21]。王宣茗等研究发现,农田土壤施加生物炭能够显著提高土壤硝态氮、铵态氮及速效养分含量,从而达到提升土壤综合肥力的效果^[22]。前人研究发现,不同生物炭施用量会显著影响土壤酶活性,其中,玉米秸秆生物炭能够显著提升脲酶及蔗糖酶活性,并且生物炭自身所含的有效性养分与土壤酶相对活性存在密切关系^[23-24]。本研究发现,各钝化剂处理均能达到提升土壤速效养分、矿质养分含量及土壤酶活性的效果,与上述学者的研究大致相同。其中,就土壤速效养分、矿质养分而言,生物炭添加对土壤速效养分

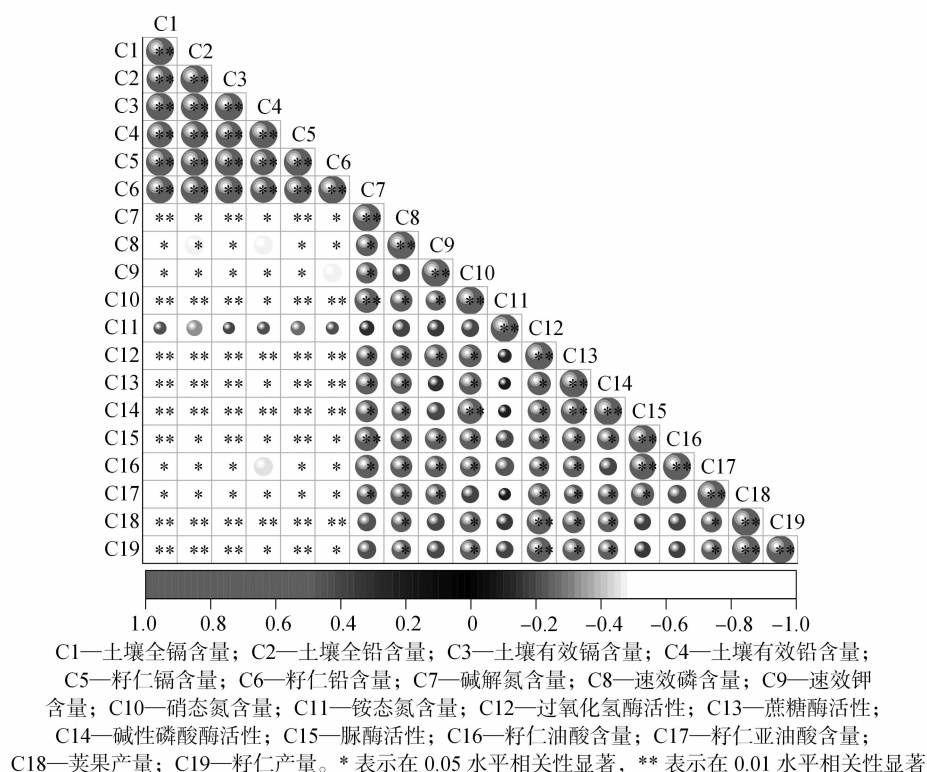


图10 花生土壤-籽仁各项指标的相关性热图

及矿质养分含量提升起到了积极作用,原因可能在于生物炭通过静电吸附、沉淀、阴离子交换等方式增强对磷酸盐的吸附^[25];并且生物炭在“提钾降钠”方面作用显著,能够有效提高土壤中钾离子含量,增强土壤钾的有效性^[26];此外,生物炭自身富含 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及含氮有机官能团,能够有效提升土壤氮含量,并且生物炭较大的比表面积能够有效吸附土壤氮,从而提升土壤氮转化能力及有效性,抑制 NH_3 及 NO_3 挥发,减少 N 流失^[27-28]。就土壤酶活性而言,随着生物炭施用量的持续增加,各土壤酶活性均呈现出先升高后降低的趋势,原因可能在于生物炭的吸附能力使其表面拥有较多的活性位点,为微生物繁殖创造条件,并刺激土壤微生物分泌酶,从而增强其活性,然而生物炭施用量较高时则会产生吸附保护酶促反应结合位点抑制酶促反应,从而降低酶活性^[29-30]。

3.2 不同添加量钝化剂对花生土壤-籽仁镉、铅含量的影响

生物炭作为新型土壤修复钝化剂,具有多孔隙结构及较大比表面积等特点,能够通过自身有效成分(羟基、羧基等)与土壤所含重金属离子发生离子交换、络合、沉淀等作用,从而有效降低土壤及作物 Cd、Pb 等重金属含量^[31-32]。刘丽媛等研究指出,生

物炭在促进土壤养分循环及提升土壤有效养分、酶活性的同时,显著降低了土壤重金属有效性及作物 Cd、Pb 的积累^[15]。孙进博等研究发现,生物炭能够改善土壤理化性质,降低土壤镉铅有效性及作物 Cd、Pb 含量^[33]。本研究发现,各钝化剂处理均能够起到降低土壤全量镉铅、有效态镉铅及花生籽仁镉铅含量的效果,该结果与上述学者的研究类似。其中,生物炭钝化剂不同用量会显著影响土壤全量镉铅、有效态镉铅及花生籽仁镉铅含量,且随着施用量增加呈现出先降低后升高的趋势,各处理均以 B4 处理降低镉、铅含量效果最佳,产生该结果的原因可能在于连续生物炭施用能够增强镉、铅修复效果的持续性,但不同生物炭添加量在降低土壤镉、铅重金属污染的同时会出现阈值,导致重金属钝化效率趋于饱和,从而对土壤-籽仁镉、铅重金属之间的转移产生影响,引发负面效应^[34]。此外,本研究发现,不同生物炭钝化剂施用量显著降低了花生籽仁铅富集系数,其中, B3、B4、B5 处理降低籽仁铅富集系数效果较为显著且三者之间差异不显著,原因可能在于生物炭能够有效吸附土壤重金属,但吸附能力有限,生物炭施用量持续提升对导致其表面的吸附点位趋于饱和,使得生物炭效果降低^[35]。

3.3 不同添加量钝化剂对花生品质、产量的影响

生物炭能够通过自身的多孔结构吸附固定土壤养分,提升土壤速效养分含量,改善土壤理化性质的同时有效促进作物生长发育^[36-37]。前人研究指出,施用生物炭能够显著提升土壤速效养分含量及土壤酶活性,并且有效降低土壤和作物镉铅重金属含量,最终达到提升作物产量和品质的效果^[15,33]。杜彩艳等研究指出,生物炭作为土壤钝化剂,能够在有效降低土壤有效态 Cd、Pb 含量及作物可食用部位 Cd、Pb 含量的同时,最终达到显著提升作物产量的效果^[38]。张红娟等研究发现,有机肥与生物炭配施能够产生协作效应,达到提升土壤速效养分、降低土壤重金属积累及有效提升作物产量、品质的效果^[39]。本研究发现,各钝化剂处理均能有效提升花生籽仁油酸、亚油酸含量及荚果、籽仁产量的效果,该结果与上述学者研究类似。其中,B3 处理提升籽仁油酸及亚油酸品质方面最为显著,B4 处理提升荚果、籽仁产量效果最佳,说明不同生物炭施用量对花生品质和产量的提升效果存在差异,原因可能在于生物炭能够吸附和固定土壤中硝态氮和铵态氮,不同生物炭用量在促进土壤有机态氮矿化,提升土壤表层速效氮及速效磷、速效钾等速效养分含量方面存在差异,此外,不同生物炭施用量在固定重金属、缓释养分方面效果不同,从而导致作物对养分的吸收产生差异,最终影响产量和品质的形成^[39-42]。

3.4 花生土壤-籽仁各项指标间的相关关系

生物炭作为土壤调理剂,能够改善土壤理化性质,修复土壤 Cd、Pb 等重金属污染并且提升作物品质和产量,从而显著影响土壤肥力、土壤-作物重金属及作物品质、产量间的相关关系。前人研究指出,土壤速效养分含量及酶活性等土壤肥力指标与土壤有效态重金属含量呈显著负相关,土壤有效态重金属含量与作物体内重金属含量呈显著正相关,而作物品质与作物体内重金属含量呈显著负相关,此外,适宜有机肥配施生物炭处理能够显著降低土壤重金属含量,从而有效提升作物产量,促使土壤重金属与作物产量呈负相关^[15,39]。本研究发现,生物炭在提升土壤速效养分含量、酶活性的同时能够有效降低土壤全量、有效态 Cd、Pb 重金属含量及花生籽仁 Cd、Pb 重金属含量,并且达到提升花生籽仁品质及产量的效果,从而使土壤全量、有效态 Cd、Pb 重金属含量,花生籽仁 Cd、Pb 重金属含量与土壤速效养分含量、酶活性及籽仁品质、产量呈显著负相

关,该研究结果与上述学者研究类似。由此表明,生物炭添加降低了土壤全量及有效态 Cd、Pb 重金属含量,改善了花生根际环境,提高了土壤肥力状况,从而有利于花生籽仁对养分的吸收利用,减少花生籽仁对 Cd、Pb 重金属的吸收,最终促进了花生生长发育及品质、产量的形成。

4 结论

相较于常规施肥(CK),不同添加量生物炭能够有效改善土壤肥力状况。B3 处理提升土壤速效养分及矿质养分含量综合效果最佳,其中,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量增幅分别为 28.95%、44.34%、14.55%;土壤硝态氮、铵态氮含量增幅分别为 35.81%、11.66%。B4 处理提升土壤酶活性综合效果最佳,土壤 CAT、SC、ALP、UE 活性增幅分别为 44.74%、34.45%、69.15%、37.19%。

相较于常规施肥(CK),不同添加量生物炭能够有效降低花生土壤-籽仁 Cd、Pb 含量。B4 处理降低土壤全量 Cd、Pb 及有效态 Cd、Pb 含量效果最佳,降幅分别为 41.13%、27.38%、40.10%、25.64%;且 B4 处理降低籽仁 Cd、Pb 含量最为显著,降幅分别为 42.43%、52.57%。此外,B4 处理降低铅富集系数效果最佳,降幅为 35.14%。

相较于常规施肥(CK),不同添加量生物炭能够有效改善花生品质、产量。B3 处理提升籽仁油酸、亚油酸含量效果最佳,增幅分别为 19.98%、23.21%;B4 处理提升荚果、籽仁产量效果最佳,增幅分别为 10.09%、11.20%。

综上所述,B4 处理在提升土壤肥力,降低土壤-籽仁 Cd、Pb 含量及提升花生产量方面综合效果更为突出,因此,B4 处理钝化剂施用量更加适宜作为该地区 Cd、Pb 重金属污染钝化修复、改善土壤肥力状况及花生产量的施肥方案施用。

参考文献:

- [1] 索炎炎,张翔,李亮,等. 中国花生主产区土壤养分丰缺状况及影响因素[J]. 土壤学报,2025,62(5):1420-1434.
- [2] 姜晓,许静,潘丽娟,等. 花生产量相关性状与气象因子多环境相关性分析[J]. 作物学报,2023,49(11):3110-3121.
- [3] 陈雷,贺群岭,张梦圆,等. 河南省麦套花生主要农艺、产量和品质性状的聚类分析与综合评价[J]. 四川农业大学学报,2024,42(5):979-985,991.
- [4] 刘泽静,张晓瑜,王颖,等. 山东省花生中 22 种元素含量监测分析[J]. 现代预防医学,2021,48(8):1387-1390.
- [5] 蒋宏伟,程艳,王章伟,等. 含铁调理剂对花生抗砷镉污染胁迫

- 能力的影响研究[J]. 核农学报, 2023, 37(8): 1651–1659.
- [6] 王磊, 唐娟, 于春娣, 等. 花生中重金属含量的影响因素及其来源[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 349–356.
- [7] 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 等. 重金属污染土壤修复研究进展: 原理与技术[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2277–2288.
- [8] Wan F, Teng Y B, Zhang X W, et al. Pollution assessment, source identification, and health risks of heavy metals: a case study in a typical wheat – maize rotation area of eastern China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022, 44(8): 2669–2684.
- [9] 王贤波, 阮松林, 朱霄岚, 等. 钝化剂对土壤有效态镉、铅及其在三叶青块根中累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(4): 565–571.
- [10] 杨珍, 王晓敏, 唐玲, 等. 钝化剂对土壤 Cd 形态和冬苕子实体 Cd 含量的影响[J]. 金属矿山, 2025(1): 274–279.
- [11] Pandey B, Suthar S, Chand N. Effect of biochar amendment on metal mobility, phytotoxicity, soil enzymes, and metal – uptakes by wheat (*Triticum aestivum*) in contaminated soils[J]. Chemosphere, 2022, 307: 135889.
- [12] Wang S, Li B, Zhu H H, et al. Long – term effects of biochar on trace metals accumulation in rice grain: a 7 – year field experiment [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 315: 107446.
- [13] Yan C Y, Wen J, Wang Q, et al. Mobilization or immobilization? The effect of HDTMA – modified biochar on as mobility and bioavailability in soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: 111565.
- [14] 孙彤, 李可, 付宇童, 等. 改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤钝化修复效应和土壤环境质量的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2571–2580.
- [15] 刘丽媛, 李柯衡, 贾永霞, 等. 生物炭对小白菜镉铅积累及品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(1): 111–117.
- [16] Li D Q, Lai C H, Li Y T, et al. Biochar improves cd – contaminated soil and lowers Cd accumulation in Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105085.
- [17] 于金鹏, 晁赢, 阎祥慧, 等. 土壤重金属污染钝化修复研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(4): 226–233.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 309–313.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 172–189.
- [20] 李茂森, 王丽渊, 杨波, 等. 生物炭对烤烟成熟期根际真菌群落结构的影响及功能预测分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1041–1048.
- [21] 俞若涵, 姚奇, 杨明晓, 等. 生物炭对夏玉米农田土壤有效养分垂直分布及作物利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 137–142.
- [22] 王宣茗, 王丽学, 苏旭, 等. 生物炭陈化对玉米产量及土壤水肥的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1570–1579.
- [23] 黄治宏, 赵浩宾, 王龙飞, 等. 生物炭对土壤酶活性、生态功能研究进展及作用机制分析[J]. 中国土壤与肥料, 2025(1): 250–259.
- [24] Jiang Y L, Wang X J, Zhao Y M, et al. Effects of biochar application on enzyme activities in tea garden soil [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 728530.
- [25] 赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 551–561.
- [26] He K, He G, Wang C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline – alkali soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: 103674.
- [27] Karimi A, Moezzi A, Chorom M, et al. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(2): 450–459.
- [28] Xiao L, Meng F D. Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(4): 740–750.
- [29] 李玥, 韩萌, 杨劲峰, 等. 炭基肥配施有机肥对风沙土养分含量及酶活性的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(2): 1–7, 15.
- [30] 廖雅汶, 廖萍, 刘建秀, 等. 秸秆生物炭对红壤菜地土壤团聚体组成及其碳氮分布的短期效应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(5): 41–48.
- [31] Gholizadeh M, Hu X. Removal of heavy metals from soil with biochar composite: a critical review of the mechanism[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 105830.
- [32] Cheng S, Chen T, Xu W B, et al. Application research of biochar for the remediation of soil heavy metals contamination: a review[J]. Molecules, 2020, 25(14): 3167.
- [33] 孙进博, 胡玲燕, 李博, 等. 石灰与生物炭对污染土壤理化性质、万寿菊生长与镉铅含量的影响[J]. 环境化学, 2024, 43(9): 3092–3102.
- [34] 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(6): 1643–1658.
- [35] 木丽远, 周洪印, 黄祖志, 等. 改性生物炭对小白菜中镉吸收累积的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(8): 1086–1094.
- [36] 姚奇, 俞若涵, 张洪宇, 等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 68–74.
- [37] Sun T, Xu Y M, Sun Y B, et al. Cd immobilization and soil quality under Fe – modified biochar in weakly alkaline soil [J]. Chemosphere, 2021, 280: 130606.
- [38] 杜彩艳, 孙秀梅, 鲁海燕, 等. 不同钝化剂对大白菜产量和吸收 Cu、As、Cd、Pb 的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(2): 257–263.
- [39] 张红娟, 陈梦华, 何珊珊, 等. 有机肥配施生物炭对设施番茄产量、品质及土壤养分和重金属累积的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(12): 1978–1986.
- [40] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6534–6542.
- [41] 杨铭, 王红军, 贾利元. 轮耕方式与生物炭还田对土壤碳氮组分及小麦产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(17): 246–252.
- [42] Xu Z C, Zhou R, Xu G R. Global analysis on potential effects of biochar on crop yields and soil quality[J]. Soil Ecology Letters, 2025, 7(1): 240267.