

王立娟,周洪印,泽尔拉都,等. 不同施肥处理对 Cd-Pb 污染土壤马铃薯镉铅吸收累积和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(18):151-158. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.18.021

不同施肥处理对 Cd-Pb 污染土壤马铃薯 镉铅吸收累积和品质的影响

王立娟^{1,2},周洪印^{2,3},泽尔拉都^{1,2},木丽远^{1,2},陆正利^{1,2},杨科^{1,2},张乃明^{1,2}

(1. 云南农业大学资源与环境学院,云南昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心,云南昆明 650201;
3. 云南农业大学植物保护学院,云南昆明 650201)

摘要:探究不同施肥处理对重金属 Cd-Pb 污染土壤马铃薯镉(Cd)、铅(Pb)吸收累积的影响,为实现复合污染农田农产品安全生产提供理论依据。采用田间试验,以高镉铅累积马铃薯品种(青薯9号)为供试材料设置7个处理,以不施肥料处理为空白对照(CK),6个施肥处理分别为马铃薯专用肥(T1)、腐殖酸(T2)、马铃薯专用肥+腐殖酸(T3)、生物有机无机混合肥(T4)、生物复合肥(T5)、生物炭+钙镁磷肥(T6)。不同施肥处理对 Cd、Pb 复合污染土壤理化性质的影响不同。所有施肥处理中,T3 处理对土壤 pH 值、有机质含量、速效钾含量的提升效果最显著,较 CK 分别显著提高 22.22%、93.26%、79.10%,T5 处理对碱解氮、速效磷含量的提升效果最显著,较 CK 分别显著提高 111.34%、276.16%;T5 处理对土壤有效态 Cd 含量的降低效果最显著,较 CK 显著降低 7.74%;T6 处理对降低土壤有效态 Pb 含量效果最显著,较 CK 显著降低 6.99%,另外,T6 处理对马铃薯薯肉的 Cd、Pb 含量、富集系数(BCF)以及薯皮向薯肉 Pb 的转运系数($TF_{\text{薯皮-薯肉}}$)的降低效果最佳,与 CK 相比,分别显著降低 Cd、Pb 的含量 65.28% 和 41.18%、BCF 56.25% 和 27.78%,以及 Pb 的 $TF_{\text{薯皮-薯肉}}$ 7.57%。不同施肥处理对马铃薯营养品质的影响差异显著,所有处理均能提升马铃薯的品质。综上所述,生物炭+钙镁磷肥不仅可以通过增加土壤中的养分含量来提升马铃薯品质,而且还能有效地阻控重金属 Cd、Pb 在马铃薯体内的吸收转移富集。

关键词:马铃薯;施肥处理;铅镉;复合污染;累积;品质

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)18-0151-08

伴随着长期的工业化和城市化,矿产资源的开采、污水灌溉以及化肥、农药的不合理使用,富含多种重金属元素的污染物经由不同的方式进入到土壤中,造成了土壤重金属污染^[1-2]。据调查显示,在

多种重金属元素中,Cd、Pb 是所有重金属污染物中点位超标率占比相对高的重金属元素,土壤重金属污染在我国西南、华东、华南地区矿区周边广泛存在^[3-4],导致矿区周边农田土壤重金属污染形势严峻^[5],其主要污染物为 Cd、Pb^[6-7]。Cd 和 Pb 不仅对植物生长有影响,而且还会危害人体健康,Cd 和 Pb 是植物生长的非必需元素,通过破坏植物活性氧代谢酶系统、抗氧化系统^[8-9],影响细胞代谢,从而抑制植物生长^[10],土壤中的 Cd、Pb 具有降解慢、高毒性和移动性强等特性,通过食物链进入人体,并在人体内积累,危害人体健康^[11-12]。因此,降低农

收稿日期:2024-11-15

基金项目:国家自然科学基金委员会-云南联合基金重点项目(编号:U2002210);云南省科技人才平台项目(编号:202405AM340004)。

作者简介:王立娟(1999-),女,云南广南人,硕士研究生,主要从事重金属土壤污染修复研究。Email:2729282107@qq.com。

通信作者:张乃明,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤培肥与污染修复研究。E-mail:zhangnaiming@sina.com。

[33] 马光恕,梁泉,张淳,等. 生物炭对甜瓜幼苗质量与根系生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(5):212-221.

[34] 杨舒怡,陈晓阳,惠文凯,等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(5):481-489.

[35] 夏民旋,王维,袁瑞,等. 超氧化物歧化酶与植物抗逆性[J]. 分子植物育种,2015,13(11):2633-2646.

[36] 吕毅. 连作对平邑甜茶幼苗叶片光系统 II、活性氧及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国果树,2023(3):12-17.

[37] 唐朝辉,郭峰,张佳蕾,等. 甘薯花生轮作对花生生理及产量品质的影响[J]. 中国油料作物学报,2020,42(6):1002-1009.

[38] 邹梦成,李鹏,张欣,等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):320-326.

作物对 Cd、Pb 的吸收、转运,是保障粮食安全的重要途径。

目前,研究者们对受重金属污染的农田进行治理和恢复已进行了大量的研究^[13-15]。其中物理修复、化学修复和生物修复是重金属土壤修复中最常见的方法^[16]。然而,相对于大部分钝化剂、改良剂的高投入、高费用,通过合理的施肥、灌溉等农艺调控手段来改善和修复土壤,不但更经济,同时也能达到较好的修复效果^[14]。研究表明,农田施入化肥会影响土壤中重金属的形态,进而减少农作物对重金属的吸附,根据不同的重金属污染类型和污染程度,选择不同的化肥品种可以发挥不同的效果^[17-19]。Singh 等研究发现,施用有机肥导致土壤理化性质发生变化,从而降低 Cd、Pb 的植物有效性^[20]。Wu 等研究发现,对玉米添加无机磷肥可以降低植物中重金属的含量^[21]。Luo 等研究发现,钙镁磷酸盐肥料的施用使土壤中 Cd 的有效含量降低了 28.57%^[22]。生物炭是一种优良的固定剂,因其孔隙结构发达、比表面积大、阳离子交换量高,并含有丰富的羟基、羰基、羧基等含氧基团,可与土壤中的重金属离子发生络合作用,而广泛应用于重金属污染土壤的修复^[23]。Wang 等研究发现,生物炭可钝化重金属,降低酸溶性和可还原性 Cd、Pb 的含量,增加可氧化和残留 Cd、Pb 的含量^[24]。

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是仅次于玉米 (*Zea mays*)、小麦 (*Triticum aestivum*) 和水稻 (*Oryza sativa*) 的世界第四大栽培作物^[25-27],具有高产、抗逆性强、适应性广等特点,是食品和工业的重要原料。但是,随着土壤重金属污染毒害程度日趋严重,而马铃薯的块茎又是与土壤直接接触,所以马铃薯对重金属的吸收累积也会随土壤重金属污染程度的增加而增加^[28-29],这会对马铃薯的品质造成很大的影响。因此寻求降低马铃薯受 Cd、Pb 毒害的缓解效应是十分必要的。然而,过去关于马铃薯对重金属的吸收富集研究,多是针对局部环境,特别是在我国西南地区。不同地区的气候和土壤情况差异较大,而大部分的研究都是以盆栽试验为主。在云南,马铃薯的种植面积不断扩大,但是关于云南不同施肥方式下马铃薯对重金属的吸收和累积的研究还鲜有报道。综上所述,研究不同施肥处理对马铃薯各部位 Cd、Pb 吸收累积以及马铃薯品质的影响,探究适宜马铃薯安全种植的施肥处理方法,对于保证马铃薯的安全生产有着重大的现实

意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于云南省曲靖市会泽县者海镇会泽污染土壤修复与安全利用野外试验研究站(103°30'E, 26°51'N)。试验地为红壤,土壤基本理化性质:pH 值为 6.90,有机质含量为 19.99 g/kg,碱解氮含量为 153.73 mg/kg,速效磷含量为 15.64 mg/kg,速效钾含量为 393.00 mg/kg,全量镉含量为 4.74 mg/kg,全量铅含量为 201.35 mg/kg。

1.2 试验材料

供试材料为马铃薯高镉铅累积品种青薯 9 号(前期课题组进行低累积品种筛选获得的品种)^[30],为当地主栽品种,由中国科学院南京土壤研究所提供。

1.3 试验设计

田间试验于 2022 年 4—8 月进行,共设 7 个施肥处理(表 1),其中,马铃薯专用肥、生物有机无机肥、生物复合肥和钙镁磷肥氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的含量占比分别为(16%、10%、6%)、(15%、7%、18%)、(12%、18%、15%)和(6%、30%、12%)。每个处理重复 3 次,随机区组设计,共计 21 个小区,每个小区面积 30 m²,株行距分别为 60、35 cm,试验小区外设保护行,各种施肥处理均在种植马铃薯前以底肥的方式施入,种植期间的耕作管理方式与当地保持一致。

1.4 样品采集与测定分析

马铃薯样品采集:分别采集成熟期马铃薯根、茎、叶及马铃薯块茎带回实验室,先用水冲洗表面泥土再用去离子水洗干净,将马铃薯切片装入网袋,放入 105 °C 烘箱中,杀青 0.5 h,然后调至 65 °C 烘干至恒重,测定干重后磨碎,过筛备用。

土壤样品采集:采用五点取样法,分别采集不同处理下的 20 cm 内耕层马铃薯根区土壤,土壤样品自然风干后磨碎,分别过 2.0、0.149 mm 的尼龙筛,密封保存备用。

测定分析:土壤 pH 值采用电位法,水土比为 2.5 : 1.0;EC 值采用 1 : 5 土水比浸提,使用 FE30 梅特勒电导率仪测定;土壤有机质(OM)含量采用 K₂Cr₂O₇ - H₂SO₄ 消煮、FeSO₄ 容量法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法(DB51/T 1875—2014《土壤碱解氮的测定》)测定;速效磷含量采用 NaHCO₃ 法

表 1 田间施肥处理筛选

处理	处理设置	用法及用量
CK	对照	—
T1	马铃薯专用肥	1 500 kg/hm ²
T2	腐殖酸	1 500 kg/hm ²
T3	马铃薯专用肥 + 腐殖酸	1 500 kg/hm ² (专用肥、腐殖酸质量比 1 : 1)
T4	生物有机无机肥	1 500 kg/hm ²
T5	生物复合肥	1 500 kg/hm ²
T6	生物炭 + 钙镁磷肥	1 500 kg/hm ² (生物炭、钙镁磷肥质量比 1 : 1)

(NY/T 1121.7—2014《土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定》)测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提、火焰分光光度法测定;土壤 Cd、Pb 含量采用火焰原子吸收分光光度法测定;土壤中有效态 Cd、Pb 含量采用原子吸收法测定;植株 Cd、Pb 含量采用电感耦合等离子体质谱仪测定;马铃薯可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;马铃薯淀粉含量采用酸水解法测定;马铃薯维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定。

本试验中马铃薯 Cd 和 Pb 富集系数的计算公式如下:

$$BCF = C_r / C_s \quad (1)$$

式中: C_r 表示马铃薯各部位中的 Cd 或 Pb 含量, mg/kg; C_s 表示全土壤全 Cd 或全 Pb 的含量, mg/kg。

本试验中马铃薯各部位 Cd 和 Pb 转运系数的计算公式如下:

$$TF_{根-茎} = C_{茎部} / C_{根部}; \quad (2)$$

$$TF_{茎-叶} = C_{叶部} / C_{茎部}; \quad (3)$$

$$TF_{根-薯皮} = C_{薯皮} / C_{根部}; \quad (4)$$

$$TF_{薯皮-薯肉} = C_{薯肉} / C_{薯皮} \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $TF_{根-茎}$ 、 $TF_{茎-叶}$ 、 $TF_{根-薯皮}$ 和 $TF_{薯皮-薯肉}$ 分别为供试马铃薯 Cd 或 Pb 由根部向茎部、茎部向叶部、根部向薯皮及薯皮向薯肉的转运

系数; $C_{根部}$ 、 $C_{茎部}$ 、 $C_{叶部}$ 、 $C_{薯皮}$ 、 $C_{薯肉}$ 分别为马铃薯根部、茎部、叶部、薯皮和薯肉中 Cd 或 Pb 含量, mg/kg。

1.5 数据分析

使用 Excel 2019 进行数据统计,使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析,采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤的理化特性

施肥可以改善土壤的理化性质,并降低重金属的有效性。其中,土壤对金属离子的吸收主要受到 pH 值的影响^[31]。提高土壤的 pH 值有助于增加负电荷,从而增强土壤颗粒对溶液中重金属的吸附、络合能力,甚至导致沉淀,从而有效减少重金属的有效性^[32]。不同施肥处理后马铃薯种植区土壤理化性质如表 2 所示,T3 处理提高土壤 pH 效果最显著,较 CK 升高 1.36;而 T5 处理显著降低了土壤 pH 值,较 CK 显著降低 0.80;另外,与 CK 相比,所有处理都提升了土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量,其中 T3 处理对有机质、速效钾含量提升效果最显著,较 CK 分别提高 93.26% 和 79.10%;T5 处理对碱解氮、速效磷含量提升效果最显著,较 CK 分别提高 111.34% 和 276.16%。

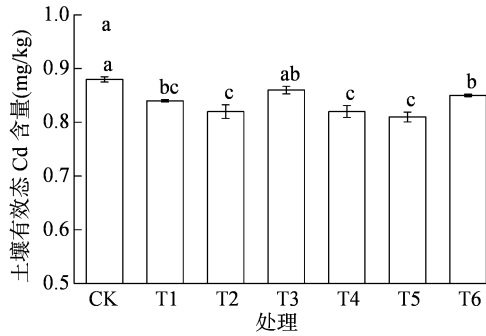
表 2 不同施肥处理后马铃薯种植区土壤理化特性

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)
CK	6.12 ± 0.04e	18.39 ± 0.80e	101.34 ± 13.07d	14.26 ± 1.02f	191.33 ± 6.11e
T1	6.34 ± 0.05d	33.44 ± 0.90b	139.92 ± 16.16c	22.82 ± 2.12e	241.00 ± 5.29c
T2	7.20 ± 0.07b	31.67 ± 0.51bc	161.89 ± 16.63c	30.59 ± 1.71d	214.00 ± 7.00d
T3	7.48 ± 0.06a	35.54 ± 1.21a	184.54 ± 9.33b	43.30 ± 0.93b	342.67 ± 9.71a
T4	6.75 ± 0.04c	30.73 ± 2.36c	147.31 ± 11.40c	33.20 ± 0.95c	245.67 ± 12.01c
T5	5.32 ± 0.09f	20.20 ± 1.04e	214.17 ± 9.06a	53.64 ± 1.13a	281.33 ± 3.21b
T6	6.20 ± 0.06e	24.12 ± 1.01d	105.38 ± 8.95d	43.65 ± 1.58b	202.33 ± 6.66de

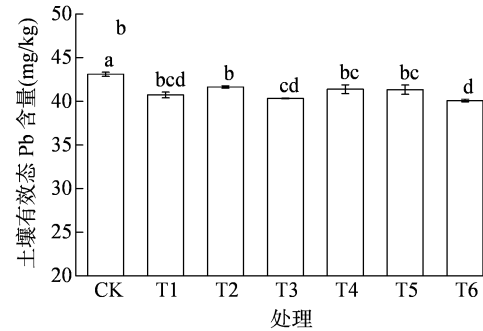
注:表中数值为平均值 ± 标准差。同栏同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

2.2 不同处理下土壤有效态 Cd 和 Pb 含量

由图 1 可见,在不同施肥条件下,土壤中有有效态 Cd 和 Pb 的含量差异明显。其中,T5 处理对降低土壤有效态 Cd 的效果最为显著,相较于 CK,其含量降低了 7.74%。这表明施用生物复合肥能够有效降低土壤中有有效态 Cd 的含量。一方面生物复合肥可能降低有机质的周转速度,导致土壤有机质腐化程度提高,从而增加其官能团数量,加强对重金属



吸附能力^[33]。另一方面土壤中 Cd 的有效性和移动性与土壤 pH 值呈负相关^[34]。T6 处理在降低土壤有效态 Pb 含量方面差异最为显著,与对照组 CK 相比,减少了 6.99%。这表明生物炭与钙镁磷肥的联合施用对降低土壤有效态 Pb 含量的效果最佳。除 T3 处理外,所有处理均显著降低了土壤中有有效态的 Cd 和 Pb 含量。



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。图 2 同
图 1 不同处理对马铃薯根际土壤有效态 Cd、Pb 含量的影响

2.3 不同处理下马铃薯各部位 Cd 和 Pb 含量

由表 3 可知,不同处理对马铃薯各部位 Cd 含量均有一定的影响,在所有处理中,与 CK 相比,T4 处理降低马铃薯根部 Cd 含量最显著,较 CK 显著降低 48.28%;T6 处理降低马铃薯茎部、叶部、薯皮和薯肉 Cd 含量最显著,较 CK 分别显著降低 60.94%、64.68%、73.45%、65.28%,说明除根部外,施用生物炭 + 钙镁磷肥对降低马铃薯各部位 Cd 含量效果最好。在施用 6 种肥料处理下,除叶部外,所有处理均

显著降低马铃薯其他各部位 Pb 含量,T6 处理降低马铃薯根部、茎部、薯皮和薯肉 Pb 含量最显著,较 CK 分别显著降低 16.65%、25.12%、22.64%、41.18%,T6 处理对叶部 Pb 含量的降低效果仅次于 T5 处理,说明施用生物炭 + 钙镁磷肥对降低马铃薯各部位 Pb 含量效果较好。所有处理马铃薯薯肉 Cd 含量及茎部、叶部、薯皮和薯肉 Pb 含量均符合 GB 13078—2017《饲料卫生标准》中国饲料中污染物限量标准规定(Cd ≤ 1mg/kg、Pb ≤ 30mg/kg)的最大限量值。

表 3 不同处理下马铃薯各部位 Cd、Pb 含量

项目	处理	根	茎	叶	薯皮	薯肉
Cd 含量(mg/kg)	CK	15.37 ± 1.23a	11.52 ± 0.04a	9.23 ± 0.08b	1.13 ± 0.14a	0.72 ± 0.18a
	T1	9.17 ± 0.12c	12.04 ± 0.66a	9.86 ± 0.29a	0.97 ± 0.02ab	0.54 ± 0.04b
	T2	9.34 ± 0.31c	12.49 ± 0.85a	8.62 ± 0.11c	1.06 ± 0.02ab	0.57 ± 0.15b
	T3	13.65 ± 1.33b	11.12 ± 0.89a	7.20 ± 0.30d	0.88 ± 0.19b	0.47 ± 0.11b
	T4	7.95 ± 0.30c	8.20 ± 0.94b	5.27 ± 0.33e	0.94 ± 0.03ab	0.50 ± 0.02b
	T5	9.81 ± 0.48c	5.68 ± 0.37c	3.81 ± 0.54f	0.66 ± 0.07c	0.35 ± 0.04c
	T6	8.37 ± 0.43c	4.50 ± 0.14d	3.26 ± 0.06g	0.30 ± 0.02d	0.25 ± 0.09d
Pb 含量(mg/kg)	CK	39.99 ± 0.25a	10.79 ± 0.46a	9.23 ± 0.16a	0.53 ± 0.07a	0.34 ± 0.06a
	T1	37.49 ± 0.41b	9.52 ± 0.07b	8.90 ± 0.29abc	0.49 ± 0.15c	0.28 ± 0.03bc
	T2	35.57 ± 0.38c	9.27 ± 0.07b	8.47 ± 0.15cd	0.50 ± 0.07b	0.29 ± 0.01b
	T3	35.44 ± 0.76c	8.88 ± 0.09c	8.57 ± 0.11bcd	0.47 ± 0.06d	0.26 ± 0.02cd
	T4	36.22 ± 0.87c	9.51 ± 0.13b	8.97 ± 0.13ab	0.47 ± 0.04d	0.29 ± 0.04bc
	T5	33.61 ± 0.56d	8.65 ± 0.15c	8.12 ± 0.04d	0.44 ± 0.06e	0.25 ± 0.06d
	T6	33.33 ± 0.84d	8.08 ± 0.18d	8.50 ± 0.41cd	0.41 ± 0.01f	0.20 ± 0.01e

2.4 不同处理下马铃薯各部位 Cd、Pb 富集系数和转运系数

富集系数(BCF)是指植物不同组织中某元素的平均含量与土壤中该元素平均含量的比值。生物富集系数反映了马铃薯对土壤中镉(Cd)和铅(Pb)的吸收和富集能力,富集系数越高,说明其对 Cd 和 Pb 的吸收能力越强^[35]。不同处理对马铃薯各部位 Cd、Pb 富集能力均有一定的影响,由表 4 可知,所有处理中,与 CK 相比,T4 处理降低马铃薯根部 Cd 富集系数最显著,较 CK 显著降低 44.57%,T6 处理降低马铃薯茎部、叶部、薯皮和薯肉的 Cd 富集系数最

显著,较 CK 分别显著降低 58.78%、62.86%、73.08%、56.25%。由表 5 可知,与 CK 相比,T5 处理在降低马铃薯根部和叶部的 Pb 富集系数方面效果最为显著,分别显著降低 12.36%、8.10%,说明施用生物复合肥处理对降低马铃薯根部、叶部 Pb 生物富集系数效果最好;T6 处理降低马铃薯茎部、薯皮和薯肉的 Pb 富集系数最显著,较 CK 分别显著降低 19.68%、23.81%和 27.78%,说明施用生物炭+钙镁磷肥处理对降低马铃薯茎部、薯皮和薯肉的 Pb 生物富集系数效果最佳。

表 4 不同处理对马铃薯各部分 Cd 富集系数的影响

处理	Cd 富集系数				
	根	茎	叶	薯皮	薯肉
CK	3.50 ± 0.16a	2.62 ± 0.07b	2.10 ± 0.02b	0.26 ± 0.08a	0.16 ± 0.02a
T1	2.15 ± 0.10bc	2.82 ± 0.12b	2.32 ± 0.12a	0.23 ± 0.06ab	0.14 ± 0.06ab
T2	2.27 ± 0.03bc	3.04 ± 0.14a	2.09 ± 0.05b	0.26 ± 0.07a	0.16 ± 0.07a
T3	3.18 ± 0.22a	2.59 ± 0.09b	1.68 ± 0.04c	0.21 ± 0.03b	0.13 ± 0.07b
T4	1.94 ± 0.07c	1.99 ± 0.19c	1.28 ± 0.04d	0.23 ± 0.06ab	0.14 ± 0.06ab
T5	2.42 ± 0.09b	1.40 ± 0.04d	0.94 ± 0.08e	0.16 ± 0.01c	0.10 ± 0.01c
T6	2.00 ± 0.08c	1.08 ± 0.04e	0.78 ± 0.02e	0.07 ± 0.04d	0.07 ± 0.04d

表 5 不同处理对马铃薯各部位 Pb 富集系数的影响

处理	Pb 富集系数				
	根	茎	叶	薯皮	薯肉
CK	0.139 2a	0.037 6a	0.032 1a	0.002 1a	0.001 8a
T1	0.138 1a	0.035 1b	0.032 8a	0.001 8bc	0.001 6c
T2	0.128 1bc	0.033 4cd	0.030 5bc	0.001 9b	0.001 7b
T3	0.131 8b	0.033 0d	0.031 9ab	0.001 8cd	0.001 5cd
T4	0.131 3b	0.034 5bc	0.032 5a	0.001 7bc	0.001 6d
T5	0.122 0d	0.031 4e	0.029 5c	0.001 6d	0.001 4e
T6	0.124 7cd	0.030 2e	0.031 8ab	0.001 6e	0.001 3f

转运系数(TF)指植物地上部某元素平均含量与植物地下部该元素平均含量之比,转运系数越大表明重金属向下一个器官的迁移能力越强^[36]。不同处理对马铃薯各部位 Cd 和 Pb 转运系数的影响不同,如图 2 所示,在所有处理中,与 CK 相比,T6 处理在降低马铃薯中 Cd 的 $TF_{根-茎}$ 和 $TF_{根-薯皮}$ 方面效果最为显著,相比 CK 分别显著降低 28.42% 和 51.16%,说明施用生物炭+钙镁磷肥处理有效抑制了马铃薯由根向茎、薯皮转移,但 T6 处理却显著增加了马铃薯中 Cd 的 $TF_{薯皮-薯肉}$,较 CK 显著增加 47.12%,其余处理马铃薯中 Cd $TF_{薯皮-薯肉}$ 无显著差

异,T4 处理降低马铃薯的 $TF_{茎-叶}$ 最显著,较 CK 显著降低 19.04%,说明施用生物有机无机肥处理有效抑制了马铃薯中 Cd 由茎向叶转移。与 CK 相比,所有处理均降低马铃薯中 Pb 的 $TF_{根-茎}$,其中 T6 处理降低马铃薯中 Pb 的 $TF_{根-茎}$ 、 $TF_{根-薯皮}$ 、 $TF_{薯皮-薯肉}$ 最显著,较 CK 分别显著降低 10.12%、15.54%、7.57%,说明施用生物炭+钙镁磷肥处理有效抑制了马铃薯由根向茎、根向薯皮和薯皮向薯肉的转移,其余处理间马铃薯中 Pb 的 $TF_{薯皮-薯肉}$ 无显著差异,但 T6 处理却显著增加了马铃薯中 Pb 的 $TF_{茎-叶}$,较 CK 显著增加 22.77%。

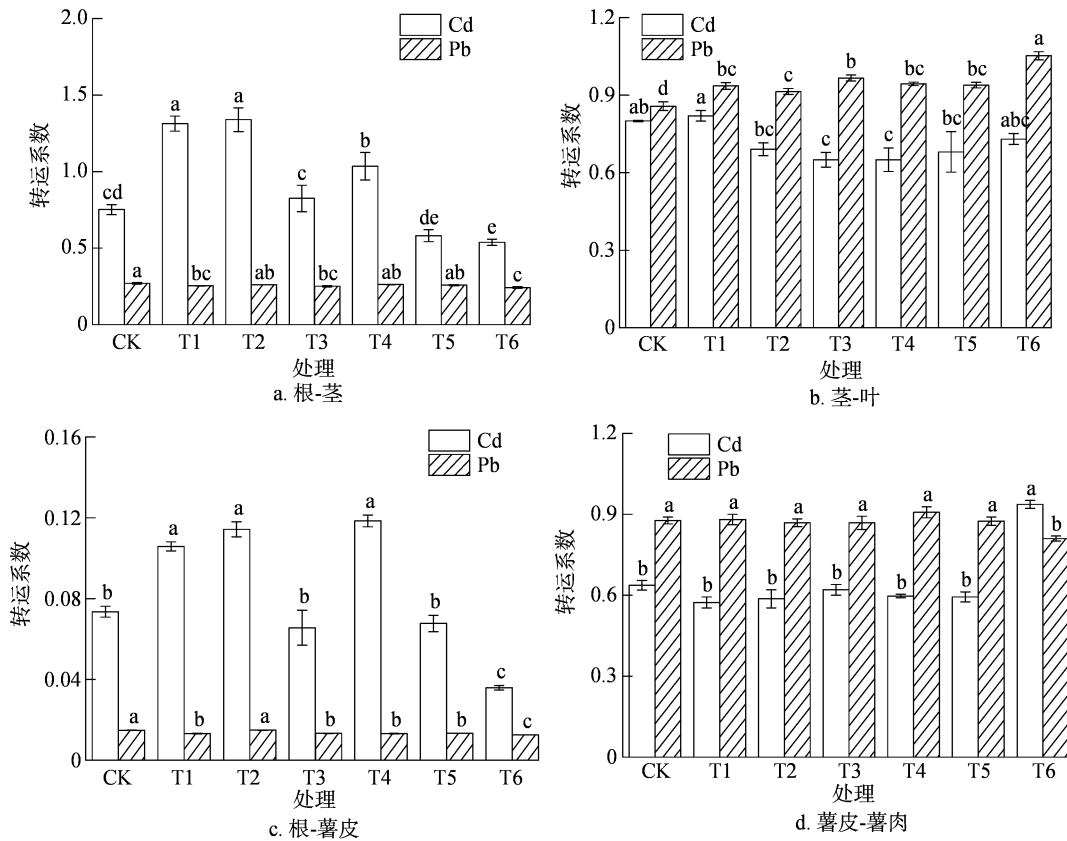


图2 不同施肥处理对马铃薯各部位 Cd、Pb 转运系数的影响

2.5 不同处理对马铃薯品质的影响

如表 6 所示,不同处理对马铃薯的品质影响不同,所有处理都能显著提升马铃薯维生素 C 含量,其中 T1 处理维生素 C 含量最高,较 CK 显著增加 33.93%,说明施用马铃薯专用肥对马铃薯维生素含量提升效果最佳。与 CK 相比,T5 处理显著提高马铃薯淀粉含量,较 CK 显著增加 12.69%,说明生物复合肥处理对马铃薯的淀粉含量提升效果最佳。T3 处理可溶性糖含量最高,较 CK 增加 8.00%,说明马铃薯专用肥配施腐殖酸对马铃薯可溶性糖含量提升效果最好。

表 6 不同处理对马铃薯品质的影响

处理	维生素 C 含量 (mg/100 g)	淀粉含量 (%)	可溶性糖含量 (%)
CK	10.08 ± 0.06c	15.53 ± 0.42d	2.50 ± 0.04a
T1	13.50 ± 0.34a	14.90 ± 0.32e	1.60 ± 0.01c
T2	10.26 ± 0.23c	15.79 ± 0.60c	2.26 ± 0.09b
T3	10.43 ± 0.03c	17.12 ± 1.14b	2.70 ± 0.14a
T4	12.00 ± 0.04b	15.61 ± 0.55cd	2.48 ± 0.07a
T5	11.55 ± 0.05b	17.50 ± 0.70a	2.52 ± 0.05a
T6	10.41 ± 0.34c	14.75 ± 0.23e	2.53 ± 0.18a

3 讨论

本研究中不同施肥处理对供试马铃薯根际土壤 pH 值的影响不同,T1、T2、T3 和 T4 处理均能有效提高马铃薯根际土壤 pH 值,其中 T3 处理提高土壤 pH 值最显著,而 T5 处理显著降低根际土壤 pH 值,这可能是因为复合肥里的氮肥更能引起土壤酸化,杨昌富等研究了不同氮肥及用量对土壤 pH 的影响,研究表明,施用氯化铵肥料的土壤 pH 值显著降低^[37],其主要机制是化学氮肥加剧反硝化,从而增加 N₂O 排放,硝化释放氢离子(H⁺)是化学氮肥加速农田土壤酸化的主要过程之一^[38-39]。

所有施肥处理都能提升土壤养分含量,降低土壤有效态 Cd 和 Pb 含量,其中施用生物复合肥处理对降低土壤有效态 Cd 含量效果最好,施用生物炭+钙镁磷肥对土壤有效态 Pb 含量的降低效果最好。这可能是因为生物复合肥和生物炭配施钙镁磷肥处理均能显著提升土壤速效磷含量,另外生物复合肥中的氮元素能促进土壤中 Cd 向植物转移,大量研究表明,土壤钝化剂能有效地降低土壤重金属有效态的含量,施用钝化剂可使土壤 pH 值升高,

并与重金属离子形成络合作用,使其在土壤中的有效性下降,进而降低作物对重金属的富集^[40-43]。另外,有研究表明,各处理土壤、施肥等外界环境因素相同的情况下,不同处理间马铃薯各部位 Cd、Pb 积累和转运能力不同主要受不同施肥处理的影响^[44-45]。马铃薯成熟期各部位 Cd、Pb 富集能力由大到小表现为根 > 茎 > 叶 > 薯皮 > 薯肉,表明马铃薯的根 Cd、Pb 含量最高,最易富集 Cd 和 Pb,这可能是因为重金属离子通过液泡膜的转运以及在液泡中的固定,构成了植物应对重金属的重要机制。这些离子能够在液泡和植物的不同组织内积累。肥料的施用为土壤微生物提供了养分,提升了它们的活性,促进了根部铁膜的形,并增强了纤维素酶和过氧化氢酶的活性,从而增强了对镉等重金属的吸附能力^[46-48]。

本研究还表明不同施肥处理对马铃薯的品质有不同的影响,施用马铃薯专用肥 + 腐殖酸对马铃薯可溶性糖含量提升效果最佳,张爱华等研究显示,不同类型的腐殖酸复合肥对马铃薯的生长和品质有显著影响^[49]。使用腐殖酸复合肥能有效促进马铃薯的养分积累,并改善其部分品质指标。本研究初步探讨不同施肥处理对重金属 Cd - Pb 污染土壤马铃薯镉(Cd)、铅(Pb)吸收累积的影响,但关于长期施肥对马铃薯土壤 Cd、Pb 有效态及作用机制仍需进一步研究。

4 结论

综上所述,所有施肥处理均能改变土壤的理化性质,提升马铃薯的品质。所有施肥处理中,施用生物炭 + 钙镁磷肥对土壤有效态 Pb 含量的降低效果最佳,对降低马铃薯薯肉 Cd、Pb 含量、BCF 以及 Pb 的 TF_{薯皮-薯肉} 效果最显著。生物炭 + 钙镁磷肥不仅可以增加土壤中的养分含量来提升马铃薯的品质,而且还能有效地阻控重金属 Cd、Pb 在马铃薯体内的吸收转移富集。钙镁磷肥 + 生物炭作为阻控效果最好的肥料,可在 Cd、Pb 复合污染农田中推广使用。研究结果为重金属复合污染土壤马铃薯的安全种植提供技术支持。

参考文献:

- [1] 吴燕明,吕高明,周航,等. 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报,2014,34(8):2146-2154.
- [2] Han F, An S Y, Liu L, et al. Simultaneous enhancement of soil properties along with water - holding and restriction of Pb - Cd mobility in a soil - plant system by the addition of a phosphorus - modified biochar to the soil[J]. Journal of Environmental Management, 2023,345:118827.
- [3] 汪学彬,孙呈鹏,杨沛,等. 中国矿山绿色转型与区域发展不平衡性问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):135-140.
- [4] 何芳,徐友宁,乔冈,等. 中国矿山环境地质问题区域分布特征[J]. 中国地质,2010,37(5):1520-1529.
- [5] 王海洋,韩玲,谢丹妮,等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学,2022,43(4):2104-2114.
- [6] 国土资源部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 资源与人居环境,2014(4):26-27.
- [7] Wang Y, Yan J J, Li F, et al. Preliminary pollution assessment and source analysis of heavy metals in agricultural soil from Xinjie Village, China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020,514(3):032059.
- [8] Khare S, Singh N B, Niharika, et al. Phytochemicals mitigation of *Brassica napus* by IAA grown under Cd and Pb toxicity and its impact on growth responses of *Anagallis arvensis* [J]. Journal of Biotechnology, 2022,343:83-95.
- [9] Aborisade M A, Geng H Z, Oba B T, et al. Remediation of soil polluted with Pb and Cd and alleviation of oxidative stress in *Brassica rapa* plant using nanoscale zerovalent iron supported with coconut - husk biochar[J]. Journal of Plant Physiology, 2023,287:154023.
- [10] Edelstein M, Ben - Hur M. Heavy metals and metalloids: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 2018,234:431-444.
- [11] Xie S C, Lan T, Xing A, et al. Spatial distribution and ecological risk of heavy metals and their source apportionment in soils from a typical mining area, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Land, 2023,15(10):1196-1215.
- [12] Roy M, McDonald L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal - contaminated smelter soils [J]. Land Degradation & Development, 2015,26(8):785-792.
- [13] 聂浩,李平,郎漫,等. 不同氮磷肥配施生物炭对污染土壤镉有效性和青菜吸收镉的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(29):31-38.
- [14] 冯英,马璐瑶,王琼,等. 我国土壤 - 蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报,2018,37(11):2359-2370.
- [15] 唐明灯,艾绍英,罗英健,等. 有机无机配施对生菜生长及其 Cd、Pb 含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(6):1104-1110.
- [16] 何斌,温旺,贾立军,等. 重金属污染土修复技术研究综述[J]. 科学技术与工程,2023,23(6):2260-2267.
- [17] 曾德武,李帆,赵建武,等. 烟草重金属污染及其防控措施研究进展[J]. 中国烟草科学,2014,35(1):127-132.
- [18] 史晓珑,杨强胜,白瑞琴,等. 镉胁迫下 4 种肥料对马铃薯生长发育的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015,36(1):34-39.
- [19] 王沛裴,郑顺林,何彩莲,等. 液体有机肥对铅、镉污染下马铃薯

- 重金属吸收及干物质积累的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016,35(3):425-431.
- [20] Singh A, Agrawal M, Marshall F M. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater - irrigated area [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(12):1733-1740.
- [21] Wu W C, Wu J H, Liu X W, et al. Inorganic phosphorus fertilizer ameliorates maize growth by reducing metal uptake, improving soil enzyme activity and microbial community structure [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 143:322-329.
- [22] Luo W X, Yang S N, Khan M A, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice with water management and calcium - magnesium phosphate fertilizer in field environment [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(11):3877-3886.
- [23] Mandal S, Sarkar B, Bolan N, et al. Enhancement of chromate reduction in soils by surface modified biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 186:277-284.
- [24] Wang Y, Ai Y, Zhou J, et al. Effects of biochar on heavy metal speciation and microbial activity in red soil at a mining area [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(12):13491-13502.
- [25] 李文华, 吕典秋, 闵凡祥. 中国、荷兰和比利时马铃薯生产概况对比分析[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(1):54-60.
- [26] Benkeblia N. Potato glycoalkaloids: occurrence, biological activities and extraction for biovalorisation; a review [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6):2305-2313.
- [27] Shaw M, Topno S. Pesticides use in potato cultivation; a sample survey study from the Hooghly district, West Bengal, India [J]. International Journal of Health Sciences, 2022, 6(S2):5668-5675.
- [28] 鄢铮, 彭琼. 马铃薯对土壤中4种重金属富集能力的差异[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2):10-17.
- [29] Pozza L E, Bishop T F A. A meta - analysis of published semivariograms to determine sample size requirements for assessment of heavy metal concentrations at contaminated sites [J]. Soil Research, 2019, 57(4):311-320.
- [30] 陆正利, 周洪印, 木丽远, 等. 云南马铃薯低镉铅累积品种的筛选与验证[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(6):1467-1476.
- [31] Zhang Q, Chen H F, Xu C, et al. Heavy metal uptake in rice is regulated by pH - dependent iron plaque formation and the expression of the metal transporter genes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 162:392-398.
- [32] 陈德, 赵首萍, 叶雪珠, 等. 不同钝化剂对小米椒吸收和积累镉的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(10):1921-1930.
- [33] 李任飞. 污水灌溉和氮肥施用对农田土壤重金属生物有效性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019:1-47.
- [34] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review [J]. Environment International, 2020, 134:105046.
- [35] 周洪印, 李嘉琦, 包立, 等. 不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9):5196-5203.
- [36] 任艳军, 任学军, 马建军, 等. Cd/Cr复合胁迫下不同品种蔬菜对Cd和Cr积累与转运的差异研究[J]. 核农学报, 2018, 32(5):993-1002.
- [37] 杨昌富, 王好圆, 覃双结, 等. 氮肥形态及用量对坡耕地红壤pH的影响机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6):1168-1180.
- [38] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1):23-28.
- [39] Chen M M, Pan H, Sun M J, et al. *Nitrosospira* cluster 3 lineage of AOB and *nirK* of Rhizobiales respectively dominated N₂O emissions from nitrification and denitrification in organic and chemical N fertilizer treated soils [J]. Ecological Indicators, 2021, 127:107722.
- [40] 郝金才, 李柱, 吴龙华, 等. 铅镉高污染土壤的钝化材料筛选及其修复效果初探[J]. 土壤, 2019, 51(4):752-759.
- [41] 袁兴超, 李博, 朱仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):807-817.
- [42] Tang G M, Tang J M, Huang J X, et al. Passivating agents relieved Cu and Cd pollution on maize growth [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(2):2030-2038.
- [43] Jiang Y X, Hu T, Peng O, et al. Responses of microbial community and soil enzyme to heavy metal passivators in cadmium contaminated paddy soils: an *in situ* field experiment [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2021, 164:105292.
- [44] Rengel Z, Bose J, Chen Q, et al. Magnesium alleviates plant toxicity of aluminium and heavy metals [J]. Crop and Pasture Science, 2015, 66(12):1298-1307.
- [45] Vera - Estrella R, Gómez - Méndez M F, Amezcua - Romero J C, et al. Cadmium and zinc activate adaptive mechanisms in *Nicotiana tabacum* similar to those observed in metal tolerant plants [J]. Planta, 2017, 246(3):433-451.
- [46] 甘露, 蒋子喏, 黄柏豪, 等. 中度含镉鸡粪源有机肥对土壤镉积累及小白菜吸镉量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4):208-214.
- [47] Liu J, He T G, Yang Z X, et al. Insight into the mechanism of nano - TiO₂ - doped biochar in mitigating cadmium mobility in soil - pak choy system [J]. Science of the Total Environment, 2024, 916:169996.
- [48] 赵振杰, 任超, 杜倩倩, 等. 不同马铃薯品种Cd、Pb富集特性及多元素互作机制[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(19):239-252.
- [49] 张爱华, 况胜剑, 张钦, 等. 腐殖酸型复合肥对马铃薯生长及产质量的影响[J]. 耕作与栽培, 2021, 41(5):32-35.