

叶面阻隔联合土壤钝化在中轻度镉污染碱性麦田上的降镉效果

刘臻函¹, 刘美英^{1*}, 赵宝平², 解 婷¹, 杨纪元¹, 王永宁³, 杨 波⁴, 兴 安¹

- (1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011;
2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 3. 内蒙古农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 呼和浩特 010000; 4. 巴彦淖尔市农牧局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘 要: 碱性农田土壤镉 (Cd) 污染导致春小麦等农产品 Cd 超标, 危害人类健康, 亟待对受污染耕地进行安全利用和治理修复。以内蒙古某 Cd 污染农田为研究对象, 研究了土施钝化剂生物炭、膨润土和叶面喷施阻隔剂磷酸二氢钠、锰锌微肥及其联用等小麦安全种植技术的降 Cd 效果, 确保农产品质量达标。研究表明, 联合修复技术均使得小麦籽粒 Cd 含量达到了食品安全限量标准, 其中在土壤使用生物炭与叶面喷施锰锌微肥联合修复下籽粒 Cd 含量较对照降低 53.8%, 通过减小小麦籽粒的 Cd 富集系数, 进而有效降低小麦籽粒 Cd 含量。可见, 叶面阻隔联合钝化技术, 尤其是叶面喷施锰锌微肥的同时土施生物炭能更有效地阻隔春小麦对 Cd 的吸收和转运, 降低春小麦籽粒 Cd 的含量, 是值得在 Cd 中轻度污染碱性麦田推广应用的技术。

关键词: 镉污染; 春小麦; 土壤钝化; 叶面阻隔

近年来, 土壤盐碱化已经严重影响了农业用地的生态系统。高盐度和高 pH 盐碱地加剧了重金属污染, 严重影响了植物生长和盐碱地的恢复^[1]。在我国河套地区, 盐碱化耕地有 322667 hm², 占其总耕地面积的 44%; 巴彦淖尔市粮食总产量每年稳定在 25 亿 kg 以上, 其中小麦产量约占五分之一, 是内蒙古重要的商品粮生产基地。由于近年来农田周边矿区的建立, 麦田土壤重金属污染问题受到广泛关注。在重金属污染物中镉 (Cd) 是一种非必需且非过渡的金属元素, 以 Cd²⁺ 的形式存在于有机和无机配合物中。Cd 具有强毒性、高流动性和持久性, 通过在食物链中的积累对人体健康造成严重危害^[2]。因此, 迫切需要一种高效的 Cd 污染土壤修复方法。然而物理修复技术仅适用于治理小面积的土壤污染, 并且具有高能耗和高成本的缺点^[3-4]; 化学淋洗修复技术价格昂贵, 易造成土壤和地下水的二次污染^[5]; 生物修复技术存在修复效率差,

周期长等缺陷^[6]。化学钝化技术具有速度快、效益高和环保等优势, 是一种很有前景的污染土壤修复方法。目前应用于农田重金属污染化学固定修复的修复剂可分为无机类、有机类、新型材料这三大类^[7]。其中膨润土具有良好的粘结性、吸水膨胀性、阳离子交换性和吸附性等性能^[8]。生物炭具有负电荷多、离子交换能力强、吸附性能优异等优势^[9], 可以提高重金属稳定性、减少土壤污染。在农艺措施修复方面, 叶面阻隔技术有着成本低、环境友好、无二次污染以及高效增产的优势, 并且能大面积应用于中轻度重金属污染的农田。王雅乐^[10]明确了超富集植物提取-钝化阻控联合对碱性土壤 Cd 污染修复的适应性。曹阳等^[11]发现了叶面喷施硒肥联合基施钙镁磷肥能更有效地降低 Cd 向小麦和玉米籽粒的吸收转运。赵首萍等^[12]发现石灰、生物炭配施含硅或多元素叶面肥能够在有效降低稻米 Cd 含量的基础上保持土壤质量良性发展。近年来北方碱性土壤重金属超标现象已经凸显, 造成的农产品安全问题逐步受到重视。前人对重金属污染农田土壤的原位钝化与农艺修复技术的研究多数集中在偏酸性土壤上, 而在偏盐碱的重金属污染土壤的研究相对较少。并且经过我们近年的研究, 认为单一的叶面阻隔修复措施已经不能完全将小麦可食用部分 Cd 含量降到安全范

收稿日期: 2024-03-17; 录用日期: 2024-04-17

基金项目: 财政部和农业农村部 国家现代农业产业技术体系 (CARS-07); 农业农村部耕地重金属污染防治联合攻关项目。

作者简介: 刘臻函 (1998-), 硕士研究生, 主要从事土壤与产地环境污染管控与修复研究。E-mail: 2875760843@qq.com。

通讯作者: 刘美英, E-mail: liumeiyingimau@163.com。

围内,因此我们在碱性麦田上展开了联合修复的创新性研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤位于内蒙古自治区巴彦淖尔市某 Cd 污染农田,农田附近有一金属采矿厂,受到矿区污水排放和降尘的长期影响,导致部分重金属物质被富集在周边农田土壤中。农田土壤基本理化性质为 pH 8.33,全氮 0.29 g/kg,全钾 48.76 g/kg,

全磷 0.27 g/kg,有效磷 14.37 mg/kg,有机质 19.81 g/kg。土壤中 Cd 含量为 1.37 mg/kg,超过了小麦安全生产的土壤 Cd 阈值 (0.36 mg/kg, GB/T 41685—2022) 属于中轻度 Cd 污染,可能存在食用农产品不符合质量安全标准的土壤污染风险,原则上可以采取农艺调控、化学钝化修复等安全利用措施来应对。供试小麦品种为永良 4 号,叶面阻隔剂为磷肥 (P) 和锰锌肥 (MnZn),土壤钝化剂为稻壳生物炭 (B) 和膨润土 (Be),表 1 为材料的基本性质。

表 1 试验用材料信息一览表

供试材料	材料基本性质
生物炭	采用稻壳生物炭,细度 0.075 mm 通过率为 98%,有机碳含量为 65%,碳化温度为 500℃,pH 为 9.1,购自郑州金邦环保有限公司
膨润土	主要成分为 SiO ₂ 66.7%、Al ₂ O ₃ 28.3% 和 K ₂ O 10.49%,细度为 0.044 mm, pH 为 8.8,购自石家庄洋铭产品有限公司
磷肥	主要成分为磷酸二氢钠,天津市大茂化学试剂厂生产的分析纯磷酸二氢钠试剂
锰锌微肥	主要成分为 Mn+Zn (≥ 10.0%),购自湖南美鑫隆环保科技有限公司

1.2 试验设计

试验于 2022 和 2023 年在研究区中轻度 Cd 污染农田进行,通过叶面喷施不同叶面阻隔剂同时联合施用不同土壤钝化剂进行小麦 Cd 累积吸收分布规律的研究。叶面阻隔剂施用情况见表 2。选用 2 种钝化剂膨润土和生物炭联合 2 种叶面阻隔剂锰锌微肥和磷酸二氢钠,共设置 9 个处理:①施用膨润土和叶喷锰锌微肥 (Be+MnZn);②施用膨润土和叶喷磷酸二氢钠 (Be+P);③施用生物炭和叶喷锰锌微肥 (B+MnZn);④施用生物炭和叶喷磷酸二钠 (B+P);⑤单施膨润土 (Be);⑥单施生物炭 (B);⑦单喷磷酸二氢钠 (P);⑧单喷锰锌微肥 (MnZn);⑨ CK 处理。采用随机区组设计,每组处理 3 个重复,共 27 个小区,各小区面积为 24 m²。将固体肥料膨润土 (0.75 kg/m²) 和生物炭

(0.75 kg/m²) 两种钝化剂于 3 月中旬均匀地撒施于供试土壤中,小麦于钝化剂施入 1 周后进行播种,播种量为 450 kg/hm²,播种时一次施入底肥磷酸二铵 375 kg/hm² 和复合肥 (17-23-5) 225 kg/hm²。分别在小麦的分蘖期和孕穗期选择晴天的下午 16:00 后用手持式喷雾器喷施叶面阻隔剂,整个生育期内,土壤水肥条件与当地保持一致。

1.3 样品的采集与测定

播种前采用多点混合法采集大田耕作层土壤样品 (n = 135),用于测定土壤基本理化性质和土壤 Cd 的含量。小麦成熟期时,在每个小区随机抽取长 30 cm、宽 10 cm、深 50 cm 的小麦植株垄田 3 处,采集整株小麦样 (n = 81) 和根系土样 (n = 81)。小麦样用清水洗去根上附着土,再用去离子水清洗小麦整株,按植株的根、茎、叶、颖壳、籽粒,进行分

表 2 叶面阻隔剂施用情况表

喷施时期	处理	代码	浓度 (g/L)	肥料用量
分蘖期	等量清水	CK	0	每小区 4 L 液体量进行喷施
	磷肥	P	0.25	
	锰锌肥	MnZn	4	
孕穗期	等量清水	CK	0	每小区 8 L 液体量进行喷施
	磷肥	P	0.5	
	锰锌肥	MnZn	8	

解, 测鲜重。带回实验室于 105 °C 杀青 30 min 后在 70 °C 烘干至恒重, 测干重。样品粉碎后过 0.149 mm 筛待测。土壤有机质、全氮、全磷、全钾和速效钾采用《土壤农化分析》^[13] 常规方法测定。土壤样品 Cd 含量的测定采用王水提取-电感耦合等离子质谱法^[14]; 植物样品 Cd 含量采用 HNO₃-HClO₄ (3:1, 体积比) 混酸法电热板加热消解^[15], 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS 7500c, Agilent, USA) 进行测定。

1.4 数据统计分析

运用 Excel 2016 进行数据的整理及表的制作, 用 SPSS 27.0 对数据进行相关分析和方差分析, 并采用 Origin 2021 进行作图。

转运系数 (TF) 和富集系数 (BCF) 计算公式:

$$TF = C_i / C_j \quad (1)$$

$$BCF = C_i / C_{soil} \quad (2)$$

表 3 不同处理对春小麦生长的影响

处理	株高 (cm)	穗粒数 (个)	产量 (kg/hm ²)
CK	57.4 ± 2.0c	24 ± 3a	4840.70 ± 238.10b
P	58.7 ± 1.7bc	24 ± 2a	4953.17 ± 172.95ab
MnZn	60.4 ± 3.3abc	24 ± 2a	5066.07 ± 72.73ab
Be	61.7 ± 2.7abc	26 ± 2a	5234.47 ± 557.27ab
Be+P	63.6 ± 1.5abc	26 ± 2a	5358.17 ± 240.51ab
Be+MnZn	65.3 ± 0.3abc	27 ± 0a	5490.23 ± 331.38ab
B	66.0 ± 3.0abc	27 ± 2a	5651.90 ± 406.46ab
B+P	67.1 ± 5.0ab	28 ± 1a	5961.87 ± 104.29a
B+MnZn	69.2 ± 1.4a	30 ± 2a	5735.93 ± 270.75ab

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 不同处理对土壤镉含量的影响

与 CK 相比, 土壤施用钝化剂 Be 和 B 分别使土壤 Cd 显著降低 8.8% 和 13.2% (图 1)。单独喷施叶面阻隔剂下, 土壤 Cd 含量较 CK 均没有显著变化。Be+P 和 Be+MnZn 联合处理较 CK 和单独的叶面处理显著降低, 但 Be+P 与对应的 Be 处理差异不大。B+P 和 B+MnZn 处理 Cd 含量较 CK 均降低 14.0%, 效果最佳。

2.3 不同处理对春小麦镉吸收的影响

由表 4 可知, 根系 Cd 含量在 B+MnZn 和 B+P 的联合施用下显著降低且较 CK 差异最为显著, 均降低了 44.1%, 单独施用钝化剂 B 和 Be 分别显著降低了 27.1% 和 18.8%, Be+P 和 Be+MnZn 联合处理较 CK 和单独的叶面处理显著降低。茎 Cd 含量在 B+MnZn 和 B+P 的施用下显著降低且较 CK 差异最

式中, C_i 、 C_j 分别代表小麦的不同组织器官 Cd 浓度, mg/kg, 其中 i 为位于 j 上部的器官 (如 i 为茎, j 为根); C_{soil} 为土壤 Cd 含量, mg/kg。

2 结果与分析

2.1 不同处理对春小麦生长的影响

B+P 和 B+MnZn 处理株高较 CK 显著增加 16.9% 和 20.6% ($P < 0.05$, 表 3), 在所有处理中 B+MnZn 处理与 CK 差异最大。Be、Be+P、Be+MnZn、B、B+P 和 B+MnZn 处理穗粒数较 CK 有所增加但均无显著差异。叶面阻隔联合土壤钝化处理较 CK 产量均有所增加, 但是只有 B+P 处理增加显著 ($P < 0.05$), 较 CK 增加了 23.2%, B+MnZn 处理较 CK 增加了 20.6%, 单一处理产量相较于联合处理增加相对较低。

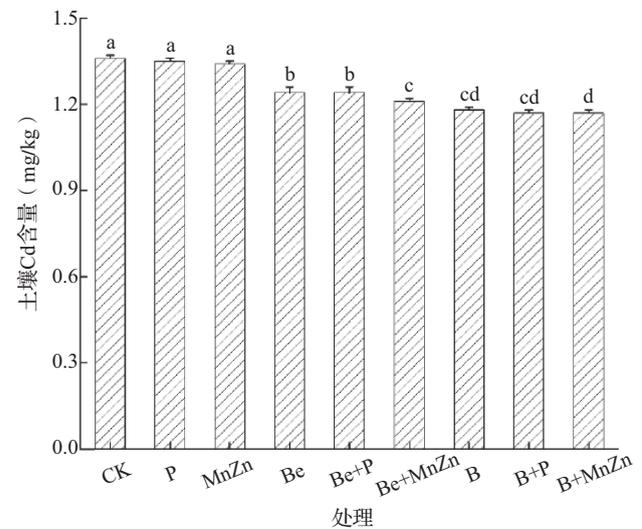


图 1 不同处理下土壤镉含量

注: 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

为显著,均降低了50.5%,B和Be处理较CK分别降低了46.2%和29.2%。单独的叶面阻隔剂较CK亦能显著降低茎Cd含量,P和MnZn处理较CK均降低了16.3%。Be+P和Be+MnZn联合处理较CK和单独的叶面处理显著降低。叶片Cd含量在B+MnZn的联合施用下显著降低且较CK差异最为显著,降低了51.8%,单独的B和Be处理较CK分别降低了42.9%和32.9%,单独的叶面阻隔剂较CK能显著降低叶片Cd含量,P和MnZn处理较CK分别降低了20.1%和25.0%。Be+P与Be+MnZn处理较CK和单独的叶面处理显著降低。颖壳Cd含量在B+MnZn的联合施用下较CK差异最为显著,降低了48.1%,单

独的叶面阻隔剂较CK能显著降低叶片Cd含量,P和MnZn处理较CK分别降低了14.8%和18.5%。籽粒Cd含量在B+MnZn的联合施用下较CK差异最为显著,降低了53.9%,P和MnZn处理以及Be处理均有降低籽粒Cd含量的趋势,但是Cd含量超过食品污染物标准规定值(≤ 0.1 mg/kg)。钝化剂与叶面阻隔联合处理表现出显著的协同效应,其中Be+P和Be+MnZn处理较Be处理分别降低了16.5%和24.3%,B+P和B+MnZn处理较B处理分别降低22.5%和39.2%。由以上分析可知,Cd含量在B+MnZn和B+P处理下均能显著降低春小麦不同器官中Cd含量。

表4 不同处理对春小麦各部位镉含量 (mg/kg)

处理	籽粒	颖壳	叶	茎	根
CK	0.13 ± 0.00a	0.27 ± 0.02a	0.58 ± 0.02a	0.78 ± 0.01a	1.70 ± 0.06a
P	0.13 ± 0.01a	0.23 ± 0.01b	0.46 ± 0.01b	0.65 ± 0.01b	1.59 ± 0.06a
MnZn	0.12 ± 0.01ab	0.22 ± 0.01bc	0.43 ± 0.02bc	0.65 ± 0.01b	1.58 ± 0.08a
Be	0.12 ± 0.01abc	0.19 ± 0.00cd	0.39 ± 0.02cd	0.55 ± 0.02c	1.38 ± 0.04b
Be+P	0.10 ± 0.00cd	0.18 ± 0.01cd	0.39 ± 0.02cd	0.55 ± 0.02c	1.22 ± 0.02c
Be+MnZn	0.09 ± 0.00cde	0.15 ± 0.01de	0.36 ± 0.02de	0.46 ± 0.02d	1.21 ± 0.02c
B	0.10 ± 0.00bcd	0.15 ± 0.01de	0.33 ± 0.02e	0.42 ± 0.01de	1.24 ± 0.06c
B+P	0.08 ± 0.01ef	0.15 ± 0.01de	0.33 ± 0.01e	0.39 ± 0.02e	0.95 ± 0.02d
B+MnZn	0.06 ± 0.01f	0.14 ± 0.01e	0.29 ± 0.01f	0.39 ± 0.01e	0.95 ± 0.02d

2.4 不同处理对春小麦Cd转运和富集的影响
春小麦各部位转运系数(表5)表明,根-茎、茎-叶、叶-颖壳、颖壳-籽粒转运系数范围分别为0.34~0.46、0.66~0.85、0.43~0.50、0.45~0.68,Be+MnZn和B+P处理显著降低了Cd在春小麦中

由茎-叶向颖壳-籽粒的转运系数。在B+P处理中,茎-叶向颖壳-籽粒的转运系数由0.85降低至0.53,下降率达38.0%。这说明Be+MnZn和B+P联合处理后,抑制了Cd由植物茎-叶向颖壳-籽粒中转移,从而减少了Cd在春小麦籽粒中的富集。

表5 不同处理对春小麦镉转运系数的影响

处理	转运系数 _{颖壳-籽粒}	转运系数 _{叶-颖壳}	转运系数 _{茎-叶}	转运系数 _{根-茎}
CK	0.49 ± 0.04bc	0.47 ± 0.05a	0.74 ± 0.03ab	0.46 ± 0.01a
P	0.55 ± 0.02abc	0.50 ± 0.03a	0.71 ± 0.02ab	0.41 ± 0.02abc
MnZn	0.56 ± 0.06abc	0.50 ± 0.02a	0.66 ± 0.04b	0.41 ± 0.02abc
Be	0.62 ± 0.04ab	0.48 ± 0.01a	0.70 ± 0.01b	0.40 ± 0.01c
Be+P	0.54 ± 0.02abc	0.47 ± 0.03a	0.70 ± 0.05ab	0.45 ± 0.03ab
Be+MnZn	0.57 ± 0.04abc	0.43 ± 0.02a	0.79 ± 0.08ab	0.38 ± 0.01cd
B	0.68 ± 0.06a	0.46 ± 0.04a	0.78 ± 0.02ab	0.34 ± 0.02d
B+P	0.53 ± 0.08bc	0.46 ± 0.04a	0.85 ± 0.06a	0.41 ± 0.01bc
B+MnZn	0.45 ± 0.02c	0.50 ± 0.05a	0.72 ± 0.04ab	0.41 ± 0.01bc

春小麦各部位富集系数(表6)表明,根、茎、叶、颖壳、籽粒富集系数范围分别为0.81~1.25、0.33~0.57、0.24~0.42、0.12~0.20、0.05~0.10,各处理均能降低根、茎、叶、颖壳和籽粒Cd富集

系数,B+MnZn处理达到最低值;根部富集系数除Be+P、B+P和B+MnZn处理外,其他处理均大于1,表明根部具有较强的富集能力,B+MnZn、Be+MnZn和B+P处理下籽粒富集系数降幅最大。

表6 不同处理对春小麦镉富集系数的影响

处理	富集系数 _{籽粒}	富集系数 _{颖壳}	富集系数 _叶	富集系数 _茎	富集系数 _根
CK	0.10 ± 0.01a	0.20 ± 0.02a	0.42 ± 0.01a	0.57 ± 0.01a	1.25 ± 0.04a
P	0.09 ± 0.01ab	0.17 ± 0.01b	0.34 ± 0.01b	0.48 ± 0.01b	1.18 ± 0.05ab
MnZn	0.09 ± 0.01abc	0.16 ± 0.01b	0.32 ± 0.02bc	0.49 ± 0.01b	1.18 ± 0.06ab
Be	0.09 ± 0.01ab	0.15 ± 0.01bc	0.31 ± 0.02bc	0.44 ± 0.02c	1.11 ± 0.04bc
Be+P	0.08 ± 0.01bcd	0.14 ± 0.01bcd	0.31 ± 0.02bc	0.45 ± 0.01c	0.98 ± 0.02d
Be+MnZn	0.07 ± 0.01cd	0.13 ± 0.01cd	0.30 ± 0.02bc	0.38 ± 0.02d	1.00 ± 0.01cd
B	0.09 ± 0.01abc	0.13 ± 0.01cd	0.28 ± 0.01cd	0.36 ± 0.01d	1.05 ± 0.04cd
B+P	0.07 ± 0.01de	0.13 ± 0.01cd	0.28 ± 0.01cd	0.33 ± 0.02e	0.81 ± 0.01e
B+MnZn	0.05 ± 0.01e	0.12 ± 0.01d	0.24 ± 0.01d	0.33 ± 0.01e	0.81 ± 0.02e

3 讨论

3.1 叶面阻隔技术对镉污染麦田的修复效果

Cd是小麦生长的非必需元素,过量Cd在农作物累积不利于植物生长并危害粮食安全^[16],叶面阻隔技术通过喷施不同叶面肥降低农作物中Cd含量。在本研究中,叶面喷施锰锌微肥后,春小麦籽粒中Cd含量较CK降低了10.1%,同时春小麦产量增加了20.6%。郝孟婕等^[17]在春小麦叶面施用锰锌微肥后,其籽粒中Cd的吸收量显著降低,与本研究结果一致。这是因为Mn、Zn与Cd通过相同的吸收通道从土壤进入植物根部并向地上部转运,具有拮抗作用,能抑制小麦对Cd的吸收^[18]。

在本研究中,喷施磷酸二氢钠后Cd在春小麦籽粒中含量较CK降低了6.1%,追其原因,Cd胁迫会损伤光合系统,P作为呼吸作用和光合作用中的糖-磷中间体及组成植物膜的磷脂的必需组分^[19],叶面喷施P在一定程度上可以缓解光合系统结构和功能受到的损伤^[20],在水稻叶面喷施不同浓度的P均会使水稻中籽粒Cd含量有不同幅度的下降^[21]。

3.2 土壤钝化技术对Cd污染麦田的修复效果

土壤钝化技术是修复重金属污染土壤的最主要措施^[22],常用的土壤钝化剂有生物炭、粘土矿物等。生物炭具有较大的孔隙度、比表面积、多表面官能团等特性,可改变土壤中重金属形态并降低

其生物有效性^[23]。在本研究中,土壤施用生物炭使春小麦籽粒中Cd含量显著降低23.3%。这与苗秀荣等^[24]的结果相似,施用生物炭抑制了小白菜对Cd的吸收,降低小白菜中Cd含量。并且根据前人研究表明,生物炭在盐碱土壤修复中可以吸附重金属,影响根际微生物群落结构和相关酶活性,从而降低土壤盐分和重金属迁移^[25-28]。同时,生物炭的多孔结构为土壤内微生物提供了良好的生存空间,保护它们免受重金属、盐和碱的胁迫^[29],因此,生物炭在碱性土壤上有着良好的钝Cd效果。粘土矿物膨润土中含有大量羟基和可交换性阳离子,能够有效吸附固定土壤中的Cd^[30],施用膨润土,使春小麦籽粒中Cd含量显著降低13.5%。于金鹏^[31]研究表明膨润土在酸性土壤中钝化效果与弱碱性土壤差异不大,因此膨润土在酸性和碱性土壤中均能对Cd含量有所降低。

3.3 土壤钝化联合叶面阻隔技术对Cd污染麦田的修复效果

由于单一钝化技术和叶面阻隔技术无法满足当地土壤Cd的有效钝化及春小麦安全生产,因此将这几种土壤钝化剂和叶面阻隔剂联合施用,且成效显著。转运系数是植物地上部某元素质量分数与植物地下部某元素质量分数之比,常用来评价植物将重金属从下部向上部的运输能力^[32]。在本研究中,B+MnZn和B+P联合处理显著抑制了Cd由植物茎-叶向颖壳-籽粒中转移,从而减少了Cd在

春小麦籽粒中的富集。这与前人研究喷施阻控剂后小麦中 Cd 由茎叶 - 籽粒的转运系数较对照显著降低一致^[33]。富集系数则反映了植物从土壤中 Cd 的吸收及积累在体内的能力^[34]。在本研究中, 与 CK 相比, 各处理明显降低了春小麦地上部各组织的 Cd 富集系数, 其中联合处理比单一处理 (除生物炭处理) 更加降低了春小麦各组织 Cd 的富集系数。由此可知, 叶面阻隔联合钝化技术能更有效地阻隔春小麦对 Cd 的吸收。酸性 Cd 污染土壤中施用生物炭和叶面喷施 Zn、Se 元素组合可以降低麸皮和胚乳的 Cd 富集系数^[35]。

在本研究中春小麦籽粒 Cd 含量在 B+MnZn 的联合施用下较 CK 差异最为显著, 降低了 53.9%。其余 Be+P 和 Be+MnZn 处理较 Be 处理分别降低了 16.5% 和 24.3%, B+P 和 B+MnZn 处理较 B 处理分别降低 22.5% 和 39.2%。结果说明, 土壤钝化剂与叶面阻隔剂联合, 更有利于降低春小麦 Cd 含量, 使其得到安全生产。

4 结论

(1) 联合处理中 B+P 和 B+MnZn 处理对春小麦株高和产量的影响最为显著。

(2) 在不同处理下, 单独的土壤钝化和联合处理都能降低土壤镉含量。

(3) 土壤钝化剂联合叶面阻隔剂调控能显著降低春小麦籽粒 Cd 含量, 其中降幅最大的为 B+P 和 B+MnZn 处理, Cd 含量只有 0.079 和 0.062 mg/kg, 较 CK 分别降低了 41.0% 和 53.9%。

(4) 春小麦土壤钝化剂联合叶面阻隔剂调控有效降低了转运系数和富集系数, 确保了春小麦质量安全, 最适合的组合为 B+MnZn, 适合在中轻度 Cd 污染碱性麦田推广使用。

参考文献:

- [1] Zhao Z, Liu L, Sun Y, et al. Combined microbe-plant remediation of cadmium in saline-alkali soil assisted by fungal mycelium-derived biochar [J]. *Environmental Research*, 2024, 240: 117424.
- [2] Hamid Y, Tang L, Hussain B, et al. Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136121.
- [3] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2022, 45

(1): 49-56.

- [4] Tang X, Li Q, Wu M, et al. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181: 646-662.
- [5] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152 (1): 1-31.
- [6] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望 [J]. *农业现代化研究*, 2018, 39 (6): 1030-1043.
- [7] 孙翠平, 李彦, 张英鹏, 等. 农田重金属钝化剂研究进展 [J]. *山东农业科学*, 2016, 48 (8): 147-153.
- [8] 赵丹. 膨润土对镉污染土壤钝化修复效应研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [9] 张振宇. 生物炭对稻田土壤镉生物有效性的影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [10] 王雅乐. 钝化阻控与超富集植物提取对碱性镉污染土壤修复效应及机理研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [11] 曹阳, 李撑娟, 王辉, 等. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42 (2): 319-326.
- [12] 赵首萍, 陈德, 叶雪珠, 等. 石灰、生物炭配施硅 / 多元素叶面肥对水稻 Cd 积累的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35 (6): 361-368.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-114.
- [14] 环境保护部. HJ 803-2016 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [15] 郭大维. 改良剂与叶面硒肥联合阻控对土壤镉钝化及小白菜吸收镉的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [16] Hu Y, He K, Sun Z, et al. Quantitative source apportionment of heavy metal (loid) s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391: 122244.
- [17] 郝孟婕, 刘美英, 赵宝平, 等. 叶面肥抑制春小麦 Cd 吸收效应研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37 (10): 135-140.
- [18] 张星雨, 叶志彪, 张余洋. 植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2021, 57 (7): 1437-1450.
- [19] 刘家豪. 叶面阻隔剂对水稻镉吸收及转运的影响机制 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [20] Zembala M, Filek M, Wala S, et al. Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress [J]. *Plant Soil*, 2010, 329: 457-468.
- [21] 刘利杉, 黄运湘, 黄楚瑜, 等. 水溶性有机肥料对水稻产量和镉吸收的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (5): 826-831.

- [22] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (3): 514-519.
- [23] 刘青松, 白国敏. 生物炭及其改性技术修复土壤重金属污染研究进展 [J]. 应用化工, 2022, 51 (11): 3285-3291, 3299.
- [24] 苗秀荣, 来雪慧, 李梦茜, 等. 不同钝化剂对土壤有效态重金属含量及其在小白菜中累积的影响 [J]. 河南农业科学, 2020, 49 (8): 63-71.
- [25] Duan Y, Awasthi M K, Wu H, et al. Biochar regulates bacterial-fungal diversity and associated enzymatic activity during sheep manure composting [J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126647.
- [26] Baloch M Y J, Zhang W, Sultana T, et al. Utilization of sewage sludge to manage saline-alkali soil and increase crop production: is it safe or not? [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32: 103266.
- [27] Li Y, Yang Y, Shen F, et al. Partitioning biochar properties to elucidate their contributions to bacterial and fungal community composition of purple soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1333-1341.
- [28] Qi X, Xiao S, Chen X, et al. Biochar-based microbial agent reduces U and Cd accumulation in vegetables and improves rhizosphere microecology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 436: 129147.
- [29] Chen H, Jiang H, Nazhafati M, et al. Biochar: an effective measure to strengthen phosphorus solubilizing microorganisms for remediation of heavy metal pollution in soil [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11: 1127166.
- [30] 林海, 靳晓娜, 董颖博, 等. 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40 (2): 945-952.
- [31] 于金鹏. 磷矿粉和膨润土钝化修复弱碱性镉污染土壤稳定性研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [32] 王小蒙, 丁永祯, 郑向群, 等. 根施钙镁磷肥与叶喷硅/硒联合调控水稻镉吸收 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (11): 6383-6391.
- [33] 李杉杉. 镉污染土壤高效钝化-植物阻控效果与机理研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [34] Sutapa B, Kumar B A. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge [J]. Chemosphere, 2008, 70 (7): 1264-1272.
- [35] 杨金山. 酸性镉污染土壤的小麦安全种植研究及植物修复资源田间筛查 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.

Effects of foliar spraying and passivator on reducing cadmium content of wheat under alkaline farmland soil with mildly cadmium pollution

LIU Zhen-han¹, LIU Mei-ying^{1*}, ZHAO Bao-ping², XIE Ting¹, YANG Ji-yuan¹, WANG Yong-ning³, YANG Bo⁴, XING An¹
 (1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous, Hohhot Inner Mongolia 010011; 2. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 3. Inner Mongolia Agricultural and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Hohhot Inner Mongolia 010000; 4. Bayannur Bureau of Agriculture and Animal Husbandry, Bayannur Inner Mongolia 015000)

Abstract: Cadmium (Cd) pollution in alkaline farmland soil has caused excessive Cd levels in agricultural products such as spring wheat, posing a threat to human health. It is urgent to ensure the safe utilization and remediation of contaminated farmland. Taking a Cd-polluted farmland in Inner Mongolia as the research object, the effectiveness of wheat safe planting techniques in reducing Cd levels and ensuring the quality of agricultural products were investigated, including soil application of biochar, bentonite, and foliar spraying of sodium dihydrogen phosphate, manganese-zinc micro-fertilizers, and their combination. The results showed that the content of Cd in wheat was decreased below the standard value of food contaminant when combined using foliar spraying and passivator. Among them, the combined remediation of soil application of biochar and foliar spraying of manganese-zinc micro-fertilizers reduced the grain cadmium content by 53.8%, compared to the control group. It reduced the Cd enrichment coefficient of wheat grains and effectively decreased the Cd content in the grains. The foliar spraying combined with the soil passivation, especially the simultaneous soil application of biochar and foliar spraying of manganese-zinc micro-fertilizers, could more effectively block the absorption and transportation of Cd by spring wheat. As a result, the content of Cd in the grains was reduced. Therefore, it is a technology worth promoting and applying in mildly Cd-polluted alkaline wheat fields.

Key words: Cd pollution; spring wheat; soil passivation; foliar barrier agent