

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.06.006

蒋亚, 田茂苑, 周凯, 等. 生物炭与亚硒酸钠对水稻镉吸收的协同阻控效应 [J]. 西南大学学报自然科学版, 2026, 48(6): 68-78.

生物炭与亚硒酸钠对水稻镉吸收的协同阻控效应

蒋亚¹, 田茂苑², 周凯³, 王丽¹, 刘桂华¹,
柴冠群¹, 罗丽娜¹, 王萍², 范成五¹1. 贵州省农业科学院 土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 贵州省农业生态与资源保护站, 贵州 贵阳 550006;
3. 贵州省开阳县农业农村局, 贵州 贵阳 550300

摘要: 为探究生物炭和亚硒酸钠不同施用方式对土壤理化性质及水稻镉(Cd)吸收的影响, 以水稻为研究对象进行盆栽试验, 设置 5 个处理: 不施生物炭和亚硒酸钠(CK)、叶面喷施 8 mg/L 亚硒酸钠(S₈)、基施 2 g/kg 生物炭(B₂)、基施 2 g/kg 生物炭+叶面喷施 8 mg/L 亚硒酸钠(B₂S₈)、基施 5 g/kg 生物炭+叶面喷施 8 mg/L 亚硒酸钠(B₅S₈), 比较镉胁迫下各处理不同时期土壤理化性质、土壤有效态镉含量、籽粒镉含量、水稻干质量及抗氧化酶活性差异。结果表明: 生物炭和亚硒酸钠不同施用方式能显著提高水稻灌浆期和收获期土壤 pH 值、有机质、速效磷和速效钾含量, 降低收获期土壤有效态镉含量和水稻籽粒镉含量。与 CK 相比, B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理土壤有效态镉含量分别降低 19.45%、16.90%和 23.38%; S₈、B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理水稻籽粒镉含量分别降低 23.19%、39.22%、61.96%和 65.67%。不同处理可显著提高灌浆期水稻根、茎、叶、穗的干质量, 促进水稻中后期生长。在灌浆期, B₂S₈、B₅S₈ 处理超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性及脯氨酸(Pro)含量均显著高于 CK, 丙二醛(MDA)含量显著低于 CK; 在收获期, B₅S₈ 处理 SOD 活性、B₂S₈ 处理 POD 活性及 B₂S₈、B₅S₈ 处理 GSH-Px 活性均显著高于 CK, B₅S₈ 处理 MDA 含量显著低于其他处理。综上所述, 生物炭与亚硒酸钠联合施用能够提高土壤 pH 值及有效养分含量, 缓解镉胁迫对水稻叶片的损伤, 有效降低土壤有效态镉含量和水稻籽粒镉含量。

关键词: 生物炭; 亚硒酸钠; 镉; 土壤; 水稻

中图分类号: S511 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)06-0068-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Synergistic Inhibitory Effects of Biochar and Sodium Selenite on Cadmium Uptake in Rice

收稿日期: 2025-09-30

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般 208; 黔科合支撑[2024]一般 106); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602); 贵州省农业科学院青年基金项目(黔农科青年基金[2023]31号); 贵州省农业科学院一般基金项目(黔农科一般基金[2024]08号)。

作者简介: 蒋亚, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。

通信作者: 范成五, 研究员。

JIANG Ya¹, TIAN Maoyuan², ZHOU Kai³,
WANG Li¹, LIU Guihua¹, CHAI Guanqun¹,
LUO Lina¹, WANG Ping², FAN Chengwu¹

1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang Guizhou 550006, China;

2. Guizhou Ecological Agriculture and Resource Protection Station, Guiyang Guizhou 550006, China;

3. Agriculture and Rural Bureau of Kaiyang County in Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550300, China

Abstract: To investigate the effects of different application modes of biochar and sodium selenite on soil physicochemical properties and cadmium (Cd) uptake by rice, a pot experiment was conducted with rice as the research subject, and five treatments were set up: no biochar or sodium selenite application (CK), foliar spraying of 8 mg/L sodium selenite (S_8), basal application of 2 g/kg biochar (B_2), basal application of 2 g/kg biochar plus foliar spraying of 8 mg/L sodium selenite (B_2S_8), and basal application of 5 g/kg biochar plus foliar spraying of 8 mg/L sodium selenite (B_5S_8). Differences in soil physicochemical properties at different growth stages, soil available Cd content, grain Cd content, rice dry weight and antioxidant enzyme activities among treatments under Cd stress were compared. The results showed that different application modes of biochar and sodium selenite significantly increased soil pH, organic matter, available phosphorus and available potassium contents at the rice filling and harvesting stages, and reduced available Cd content in soil and Cd content in rice grains at the harvesting stage. Compared with CK, the available Cd content in soil in B_2 , B_2S_8 and B_5S_8 treatments decreased by 19.45%, 16.90% and 23.38%, respectively; the Cd content in rice grains in S_8 , B_2 , B_2S_8 and B_5S_8 treatments decreased by 23.19%, 39.22%, 61.96% and 65.67%, respectively. Different treatments significantly increased the dry weights of roots, stems, leaves and panicles of rice at the filling stage, and promoted the mid-to-late growth of rice. At the filling stage, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), glutathione peroxidase (GSH-Px) and the content of proline (Pro) in B_2S_8 and B_5S_8 treatments were all significantly higher than those in CK, while the content of malondialdehyde (MDA) was significantly lower than that in CK. At the harvesting stage, SOD activity in B_5S_8 treatment, POD activity in B_2S_8 treatment, and GSH-Px activity in B_2S_8 and B_5S_8 treatments were all significantly higher than those in CK, and MDA content in B_5S_8 treatment was significantly lower than that in all other treatments. In conclusion, the combined application of biochar and sodium selenite can increase soil pH and available nutrient content, alleviate the damage of Cd stress to rice leaves, and effectively reduce available Cd content in soil and Cd content in rice grains.

Key words: biochar; sodium selenite; cadmium; soil; rice

土壤是农作物生长的基础,也是人类生存和发展不可替代的基础性自然资源。近年来,受矿业过度开采、“三废”大量排放、化肥农药不当施用等人为活动影响,农田土壤重金属污染问题日益严峻,不仅造成耕地质量退化,还严重制约农业安全生产^[1-2]。根据 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》,土壤镉(Cadmium, Cd)污染点位超标率达 7.0%,超标率居各类重金属之首,为农田土壤的首要污染物^[3]。水稻对镉的富集能力普遍高于其他作物^[4],在镉污染稻田中种植的水稻会大量吸收土壤中的镉^[5],加大稻米镉含量超标风险,严重威胁水稻安全生产及人类健康。因此,实现镉污染稻田的安全利用对保障水稻安全生产至关重要。

土壤钝化是治理镉污染土壤的重要措施,生物炭作为常用的土壤重金属钝化剂^[6],其丰富的孔隙结构和较强的吸附性能可提高土壤中重金属镉的稳定性,降低镉的生物有效性,进而减少作物对镉的吸收与积

累^[7]。此外,施用生物炭还能调节土壤 pH 值、提升有机质含量、改善土壤理化性质并优化土壤结构^[8],具有提升土壤肥力与修复镉污染双重作用。硒(Selenium, Se)作为人体必需微量元素,可通过增强植物的抗氧化能力及离子间的拮抗作用缓解镉对作物的毒害^[9-10],从而抑制作物对镉的吸收和转运^[11]。叶面喷硒是叶面阻隔技术的一种,具有成本低廉、施用方便、环境友好等优势,不仅能提高水稻抗逆性、增强硒与镉的拮抗作用^[12-14],还可有效降低稻米镉含量^[15]。然而,单一的土壤钝化技术或叶面阻隔技术在镉污染土壤修复中存在局限性,二者联合施用对降低土壤镉生物有效性、减少作物籽粒镉积累的效果更为突出^[16]。因此,生物炭与硒肥联合施用可作为修复镉污染土壤、保障水稻安全生产的有效措施。

近年来,国内外针对施用生物炭、硒肥等措施对镉污染土壤修复的研究已较为丰富,但多侧重于单一修复措施的应用效果,关于生物炭与硒肥联合施用调控土壤镉有效性、抑制作物镉吸收的协同机制仍不明确。因此,本研究以镉污染稻田土壤-水稻系统为研究对象,采用盆栽试验法,探究生物炭与亚硒酸钠联合施用对土壤理化性质、水稻干质量、抗氧化生理特性、籽粒镉吸收及镉生物有效性的影响,旨在为镉污染稻田修复及水稻安全生产提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年 5—9 月在贵州省土壤肥料研究所大棚内进行。供试土壤采自贵州省贵阳市开阳县,土壤类型为水稻土,其基本理化性质如下:pH 值 6.76,有机质 24.70 g/kg,全氮 1.41 g/kg,全磷 0.45 g/kg,全钾 4.59 g/kg,碱解氮 88.00 mg/kg,速效磷 4.80 mg/kg,速效钾 44.00 mg/kg,总镉 1.06 mg/kg,有效镉 0.35 mg/kg。

1.2 试验材料

供试水稻品种为宜香优 2115,购自贵州省贵阳市花溪区高坡供销合作社金竹农资门市部;供试生物炭为玉米秸秆生物炭,购自河南达康净水材料有限公司,其基本理化性质如下:pH 值 8.50,有机碳含量 46.52%,全氮含量 1.52%,全磷含量 0.97%,全钾含量 2.84%。亚硒酸钠购自泰州聚丰源生物科技有限公司;试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司。

1.3 试验设计

试验设置 5 个处理组,每组设置 3 次重复,生物炭施用量及亚硒酸钠喷施浓度参考已有研究设置^[17-19],详见表 1。供试土壤经自然风干、研磨后过 10 目筛,充分混匀后装入塑料盆(100 cm×40 cm×34 cm),每盆装土 55 kg。所有处理组均基施复合肥,施用量为 0.27 g/kg,拔节期追施尿素 0.05 g/kg。复合肥和生物炭作基肥倒入土壤中充分拌匀,添加去离子水淹水培养 14 d,水稻育苗长至 4 叶 1 心期时移栽至盆中,每盆移栽 8 株。亚硒酸钠叶面喷施于水稻灌浆期进行,喷施量以形成水滴且水滴落为宜。水稻生长期间的田间管理与当地大田生产保持一致。

表 1 不同处理生物炭与亚硒酸钠用量

组别	生物炭/(g·kg ⁻¹)	亚硒酸钠/(mg·L ⁻¹)	施用方式
CK	—	—	—
S ₈	—	8	叶面喷施
B ₂	2	—	基施
B ₂ S ₈	2	8	基施生物炭+叶面喷施亚硒酸钠
B ₅ S ₈	5	8	基施生物炭+叶面喷施亚硒酸钠

1.4 样品采集与测定

分别于水稻灌浆期叶面喷施亚硒酸钠 7 d 后及水稻收获期采集水稻叶片,保存于-20℃冰箱中,用于测定水稻叶片超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase, GSH-Px)活性及脯氨酸(Proline, Pro)与丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量等生理指标,测定过程中严格按照试剂盒说明书进行操作。同步采

集植株与土壤样品, 植株经纯水洗净后分成根、茎、叶、穗 4 个部分, 于 105 °C 杀青 30 min, 65 °C 烘干至恒重, 分别称量各部分干质量并计算生物量; 土壤自然风干后研磨过筛, 用于土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾等指标的测定, 测定方法详见表 2。收获期土壤有效镉含量参照《土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法》(GB/T 23739—2009)进行测定。

水稻收获后进行脱粒处理, 籽粒用纯水洗净, 65 °C 烘干至恒重, 脱谷壳后得到糙米, 研磨后过 60 目尼龙筛备用。糙米中镉含量参照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)进行测定。

表 2 土壤样品检测方法

检测指标	执行标准	检测指标	执行标准
pH 值	NY/T 1377—2007	全钾	NY/T 87—1988
有机质	NY/T 1121.6—2006	碱解氮	DB64/T 1734—2020
全氮	NY/T 1121.24—2012	速效磷	NY/T 1121.7—2014
全磷	NY/T 88—1988	速效钾	NY/T 889—2004

1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理, 采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和相关性分析, 使用 Duncan 法(方差齐性)和 Dunnett-T3 法(方差不齐)进行事后多重比较, 并进行差异显著性检验。采用 Origin 2024 软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭与亚硒酸钠联合施用对土壤理化性质的影响

由表 3 可知, 在灌浆期, 不同处理对土壤 pH 值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量均有显著影响, 而各处理组间土壤全氮、全磷、全钾含量差异不显著。其中, B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理组土壤 pH 值、有机质及速效磷含量显著高于 CK、S₈ 处理组, 其余处理组间差异不显著; B₂ 处理组土壤碱解氮和速效钾含量最高, 较 CK 分别显著提高 10.61% 和 30.93%。在收获期, 不同处理对土壤 pH 值、有机质、速效磷、速效钾含量同样有显著影响, 土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮含量在各处理组间差异不显著。其中, B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理组土壤 pH 值、速效磷含量显著高于 CK、S₈ 处理组, 其余处理组间差异不显著; B₅S₈ 处理组土壤有机质、速效磷和速效钾含量最高, 较 CK 分别显著提高 10.61%、18.20% 和 38.12%。综上, B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理对提升土壤 pH 值、有机质及速效磷含量效果显著, 可有效改善镉污染稻田土壤化学性质。

表 3 不同处理对土壤理化性质的影响

时期	组别	pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
灌浆期	CK	6.56±0.08b	23.20±0.25b	1.31±0.02a	0.45±0.02a	5.33±0.29a	66.00±2.00bc	5.52±0.17b	14.00±1.41bc
	S ₈	6.70±0.13b	22.77±0.75b	1.31±0.02a	0.47±0.02a	5.11±0.38a	64.33±2.87c	5.45±0.10b	13.00±0.00c
	B ₂	6.93±0.05a	26.17±0.50a	1.24±0.08a	0.48±0.05a	5.40±0.07a	73.00±1.00a	6.03±0.23a	18.33±1.25a
	B ₂ S ₈	6.98±0.09a	26.05±0.04a	1.26±0.13a	0.41±0.04a	4.90±0.20a	71.00±0.00ab	5.98±0.14a	14.67±0.47bc
	B ₅ S ₈	6.96±0.08a	25.17±0.32a	1.31±0.03a	0.46±0.01a	5.47±0.15a	70.33±1.70ab	6.13±0.13a	16.67±1.70ab
收获期	CK	6.71±0.05b	23.75±0.43b	1.33±0.01a	0.46±0.01a	4.69±0.09a	71.00±2.00a	5.33±0.02b	12.67±0.47c
	S ₈	6.77±0.02b	24.70±0.73b	1.31±0.00a	0.49±0.01a	4.69±0.03a	69.33±4.64a	5.64±0.01b	13.50±1.08c
	B ₂	7.02±0.09a	24.60±0.41b	1.32±0.02a	0.46±0.01a	4.79±0.40a	73.50±0.50a	6.17±0.12a	16.33±0.94ab
	B ₂ S ₈	7.03±0.13a	24.73±0.91ab	1.32±0.01a	0.47±0.00a	4.83±0.19a	73.33±3.30a	6.13±0.08a	14.50±0.50bc
	B ₅ S ₈	6.89±0.03a	26.27±0.62a	1.33±0.01a	0.50±0.03a	4.94±0.17a	73.33±3.68a	6.30±0.22a	17.50±0.71a

注: 同列不同小写字母表示差异有统计学意义。下同。

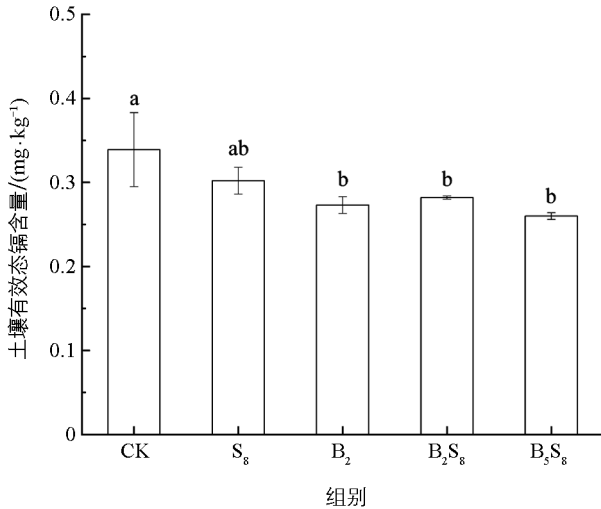
2.2 生物炭与亚硒酸钠联合施用对土壤有效态镉含量的影响

由图 1 可知, 不同处理组土壤有效态镉含量为 0.26~0.34 mg/kg, 相较于 CK, 基施生物炭单一处理

及生物炭与亚硒酸钠联合处理均可显著降低土壤有效态镉含量, 其中, B_2 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理土壤有效态镉含量分别较 CK 降低 19.45%、16.90%、23.38%。表明施用生物炭可有效钝化土壤镉, 降低镉的生物有效性, 且生物炭与亚硒酸钠联合处理(B_5S_8)的钝化修复效果最优。

2.3 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻籽粒镉含量的影响

由图 2 可知, 不同处理组水稻籽粒镉含量为 0.12~0.34 mg/kg, S_8 、 B_2 、 B_2S_8 和 B_5S_8 4 个处理的水稻籽粒镉含量均显著低于 CK, 较 CK 分别降低 23.19%、39.22%、61.96% 和 65.67%。其中, 仅 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的水稻籽粒镉含量低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的糙米镉含量限值(0.2 mg/kg)。上述结果表明, 各处理均能有效降低水稻籽粒镉积累量, 其中 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的降镉效果最为显著, 可使籽粒镉含量达到食品安全标准。



不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理对土壤有效态镉含量的影响

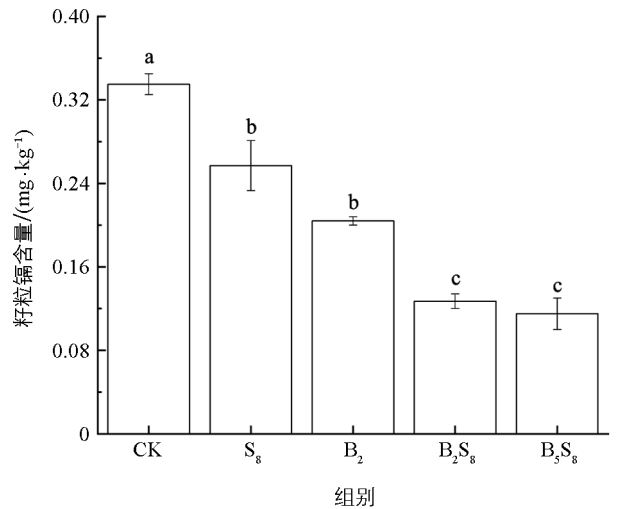


图 2 不同处理对水稻籽粒镉含量的影响

2.4 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻干质量的影响

如图 3 所示, 在灌浆期, 不同处理对水稻根、茎、叶、穗的干质量均有显著影响。与 CK 相比, S_8 、 B_2 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的根干质量和茎干质量均显著提高。其中, B_2S_8 处理的根干质量和 B_2 处理的茎干质量最高, 分别达 8.95 g/株和 40.04 g/株, 较 CK 分别增加 88.03% 和 123.42%。叶干质量方面, B_2 处理表现最优, 较 CK 和 B_2S_8 处理分别显著提高 59.81% 和 48.31%; 穗干质量方面, B_2S_8 、 B_5S_8 处理显著高于其他处理, 其余处理间无显著差异。在收获期, 各处理间根干质量无显著差异; B_2 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理茎干质量显著高于 CK, 但与 S_8 处理无显著差异; B_2 和 B_5S_8 处理叶干质量较 CK 分别显著降低 14.55% 和 20.28%; 穗干质量以 B_2 处理最高, 较 CK、 S_8 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理分别显著提高 18.05%、17.31%、33.69%、21.58%。

2.5 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻生理特征的影响

2.5.1 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

由表 4 可知, 在灌浆期, 不同处理对水稻叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性均有显著影响。其中, S_8 、 B_2 、 B_2S_8 和 B_5S_8 4 个处理的 SOD 活性均显著高于 CK, 较 CK 分别提高 49.64%、103.67%、83.22% 和 62.89%; B_2S_8 处理的 CAT 活性显著高于 CK 和 S_8 处理, 与 B_2 、 B_5S_8 处理无显著差异; B_2 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的 POD 活性显著高于 CK 和 S_8 处理; S_8 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的 GSH-Px 活性显著高于 CK 和 B_2 处理。在收获期, S_8 、 B_2 、 B_5S_8 处理的 SOD 活性均显著高于 CK, 较 CK 分别提高 71.99%、124.08%、119.16%; 各处理间 CAT 活性无显著差异; B_2 、 B_2S_8 处理的 POD 活性较 CK 分别显著提高 39.94%、28.38%, 较 S_8 处理分别显著提高 53.10%、40.45%; S_8 、 B_2S_8 、 B_5S_8 处理的 GSH-Px 活性显著高于 CK, 较 CK 分别提高 8.38%、8.48% 和 5.83%。上述结果表明, 各处理对水稻叶片抗氧化酶活性有不同程度的提升作用, 其中, B_2S_8 、 B_5S_8 处理提升效果最为显著, 可有效提升水稻在镉胁迫下的抗氧化能力。

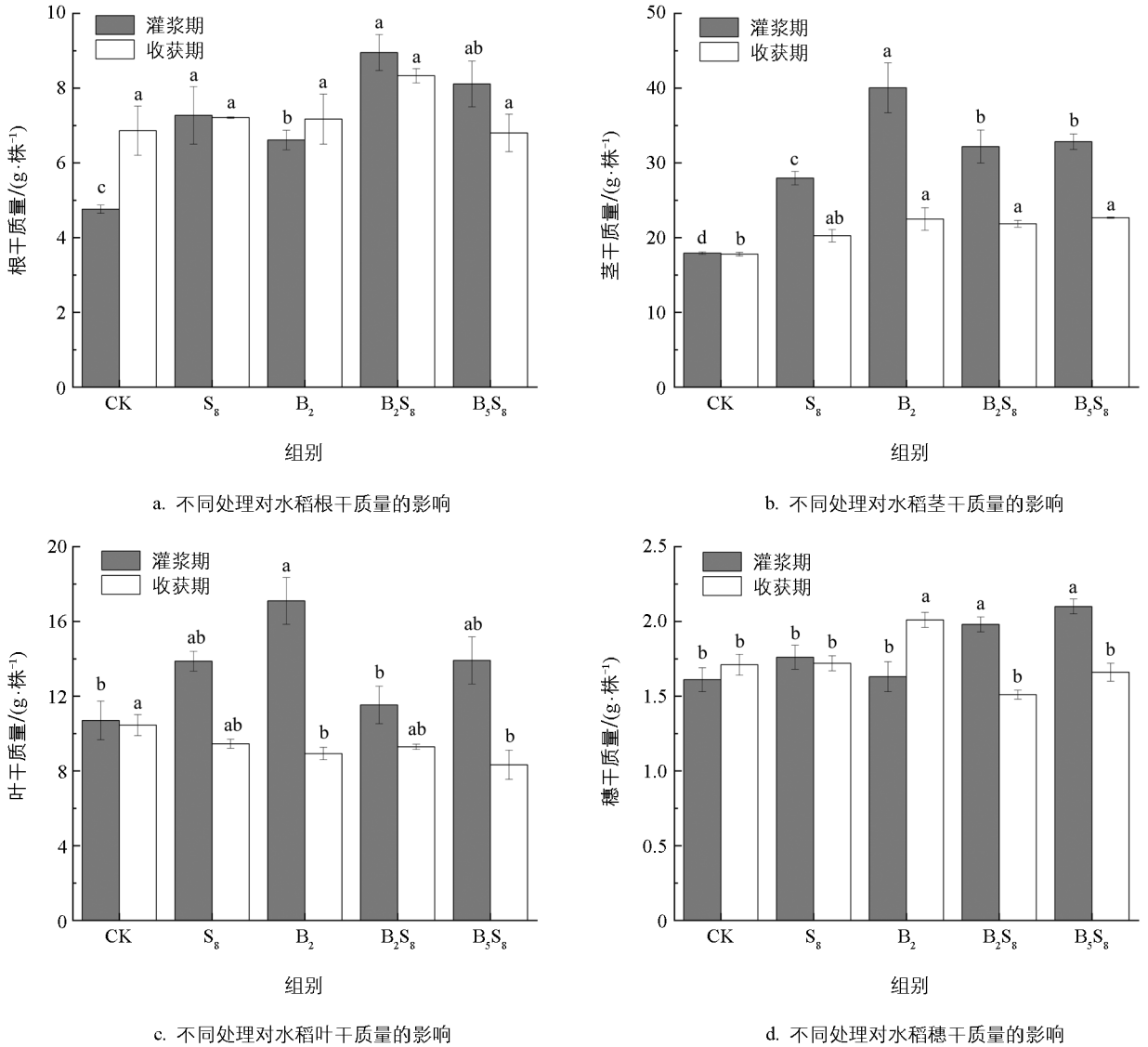


图 3 不同处理对水稻各部位生物量的影响

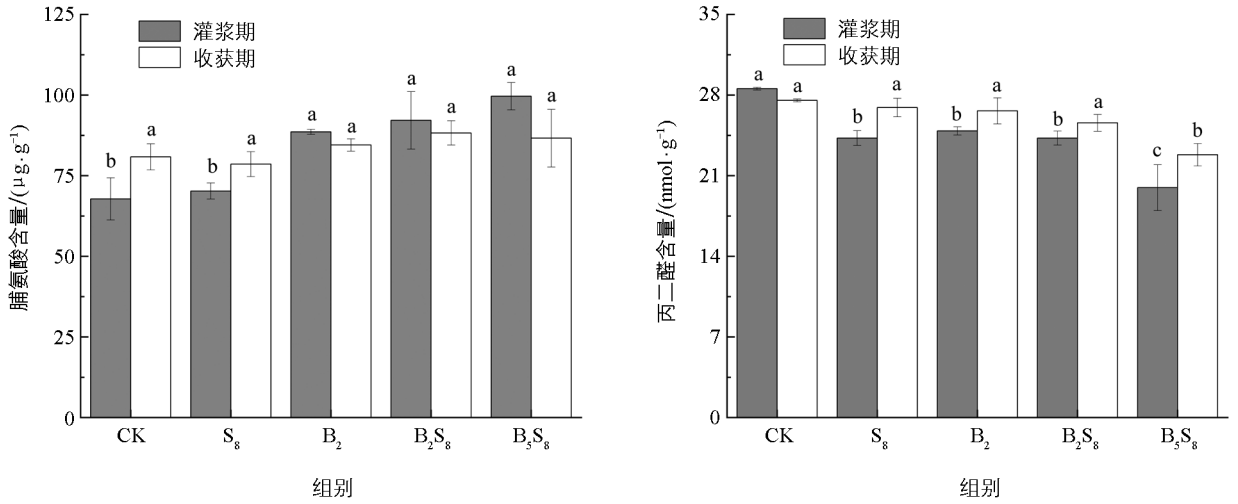
表 4 不同处理对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

时期	组别	SOD 活性/ (U · g ⁻¹)	CAT 活性/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	POD 活性/ (U · g ⁻¹)	GSH-Px 活性/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)
灌浆期	CK	174.33 ± 8.99c	133.49 ± 2.13b	16 379.37 ± 787.29b	146.27 ± 1.67b
	S ₈	260.87 ± 6.78b	136.02 ± 0.78b	14 329.56 ± 1 801.78b	160.20 ± 3.92a
	B ₂	355.05 ± 50.55a	137.23 ± 0.93ab	20 382.12 ± 819.54a	145.70 ± 0.86b
	B ₂ S ₈	319.41 ± 28.82ab	141.21 ± 3.17a	20 239.03 ± 2 015.09a	159.22 ± 1.37a
	B ₅ S ₈	283.97 ± 40.28ab	136.77 ± 0.52ab	19 949.78 ± 741.74a	159.81 ± 1.45a
收获期	CK	264.30 ± 13.87c	133.78 ± 1.90a	12 665.85 ± 1 321.09bc	143.87 ± 0.60b
	S ₈	454.56 ± 50.75ab	135.25 ± 5.66a	11 577.27 ± 442.67c	155.93 ± 1.06a
	B ₂	592.25 ± 36.05a	139.82 ± 1.66a	17 724.35 ± 1 194.47a	150.24 ± 3.51ab
	B ₂ S ₈	318.53 ± 46.70bc	141.23 ± 2.64a	16 259.94 ± 1 974.23a	156.07 ± 1.89a
	B ₅ S ₈	579.24 ± 81.06a	140.82 ± 3.04a	15 124.87 ± 415.59ab	152.26 ± 2.70a

2.5.2 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻叶片脯氨酸、丙二醛含量的影响

由图 4 可知,在灌浆期,不同处理对水稻叶片脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量有显著影响。其中,

B₂、B₂S₈、B₅S₈ 处理 Pro 含量较 CK 分别显著提高 30.66%、35.93%、46.97%；MDA 含量较 CK 显著降低 12.86%、15.01%、30.07%。在收获期，各处理 Pro 含量无显著差异，B₅S₈ 处理 MDA 含量显著低于其他处理。由此说明，B₅S₈ 能有效降低水稻叶片 MDA 含量，缓解镉胁迫下脂膜过氧化伤害。



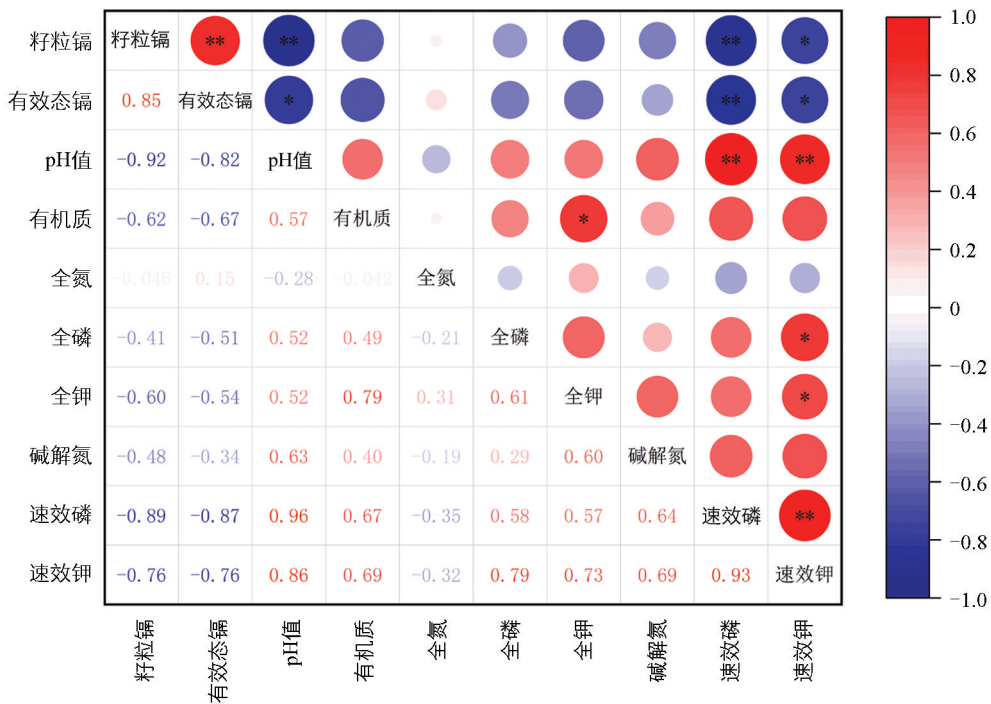
a. 不同处理对水稻叶片脯氨酸含量的影响

b. 不同处理对水稻叶片丙二醛含量的影响

图 4 不同处理对水稻叶片脯氨酸、丙二醛含量的影响

2.6 相关性分析

由图 5 可知，水稻籽粒镉含量与土壤有效态镉含量呈极显著正相关($p < 0.01$)，与土壤 pH 值、速效磷含量呈极显著负相关($p < 0.01$)，与速效钾含量呈显著负相关($p < 0.05$)。有效态镉含量与土壤 pH 值、速效钾含量呈显著负相关($p < 0.05$)，与速效磷含量呈极显著负相关($p < 0.01$)。土壤 pH 值与速效磷、速效钾含量呈极显著正相关($p < 0.01$)。表明土壤理化性状的改善可有效降低土壤镉生物有效性，进而阻控水稻籽粒镉积累，各指标间存在协同调控关系。



*、** 分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 水平上显著。

图 5 水稻籽粒镉含量、土壤理化性质及有效态镉含量相关性分析

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 生物炭与亚硒酸钠联合施用对土壤理化性质及有效态镉的影响

土壤理化性质是表征土壤质量的关键指标,对植物的生长发育具有重要影响^[20]。生物炭凭借独特的多孔结构与理化特性,可有效提升土壤养分含量^[21]。一方面,生物炭本身呈碱性,富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,施用后可降低土壤中的 H^{+} 和交换性 Al^{3+} ,从而提高土壤 pH 值^[22-24];另一方面,生物炭孔隙结构发达、吸附固定能力较强,可促进土壤团聚体的形成,调控土壤微生物群落结构,促进有机分子聚合,增加土壤有机质积累。同时,其自身富含有机碳,可直接补充土壤碳库,进一步提升土壤有机质含量^[25-27]。本研究发现,水稻灌浆期和收获期,基施生物炭的处理均可显著提升土壤 pH 值、有机质含量,与前人研究结论一致^[28]。

土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量是评估土壤质量与生产力的重要养分指标^[29]。本研究中,各处理对土壤全氮、全磷、全钾含量均无显著影响,但基施生物炭的处理可显著提升土壤碱解氮、速效磷、速效钾等有效养分含量,与朱凤君等^[30]研究结果较为一致。就土壤氮素而言,生物炭可通过吸附铵离子、抑制土壤中氮素的淋溶损失^[31],提升土壤碱解氮含量,但土壤氮循环过程较为复杂,硝化作用和氨挥发等途径会造成氮素损耗,且随着水稻生育期的推进,土壤氮素的积累与损耗逐渐趋于平衡^[32],因此收获期各处理碱解氮含量无显著差异。速效磷含量提升的主要原因可能是生物炭本身呈碱性,施入后土壤 pH 值升高,促进了固定态磷的溶解^[33],加之生物炭对土壤金属离子的吸附作用,在一定程度上减少了其与磷结合形成沉淀^[34],从而提高了土壤中速效磷含量;土壤速效钾含量升高则归因于土壤中钾素多以离子形态存在,可被生物炭孔隙吸附固定,有效减少钾离子淋溶流失,实现土壤速效钾的积累^[35]。此外,王丽等^[36]研究表明,生物炭可显著降低土壤有效态镉含量,且土壤有效态镉含量与土壤 pH 值呈显著负相关,本研究也得到相同结果。这是由于施用生物炭后,生物炭与重金属形成表面络合物,且土壤 pH 值提高强化了其对 Cd^{2+} 的吸附,从而有效降低了土壤镉生物有效性^[37]。

3.1.2 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻干质量及生理特征的影响

干物质含量是衡量作物光合产物累积及生长状况的重要农艺指标^[38]。本研究表明,在水稻灌浆期,基施生物炭、叶面喷施亚硒酸钠及二者联合施用均对水稻根、茎、叶、穗的干质量有显著影响;在收获期,各处理除根干质量无显著差异外,配施生物炭的处理对叶、茎、穗干质量存在不同程度的影响。这主要是由于水稻生长后期根系已停止生长,生物量基本稳定,而生物炭可改善土壤养分环境,提升水稻叶片养分吸收、光合作用及光合产物运输能力等^[39-40],促使叶片光合产物向穗部快速转运积累,进而造成收获期叶干质量降低、穗干质量提升的变化,该现象也与施肥方式、施用量、田间管理措施及土壤环境等多因素协同调控密切相关^[41]。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)是植物抗氧化防御系统的重要酶类^[42],可有效清除镉胁迫产生的活性氧,减轻膜脂过氧化损伤,维持植株正常生理代谢。施用生物炭与硒肥可增强作物抗氧化酶系统防御能力,减轻镉胁迫对作物的毒害,抑制作物对镉的吸收,从而促进植株生长^[43-44]。本研究中,各处理均可显著降低水稻叶片 MDA 含量,配施生物炭的处理可不同程度提升水稻叶片 SOD、CAT、POD 活性及 Pro 含量,叶面喷施亚硒酸钠的处理可显著激活叶片 GSH-Px 活性,与前人研究结果一致^[45-47]。整体来看,各处理对水稻叶片生理特性的调控效果表现为灌浆期优于收获期,这是由于灌浆期叶片生理活性较高,可持续为穗部提供底物,保障籽粒生长发育^[48],至收获期植株生理代谢趋于稳定,抗氧化系统差异逐渐缩小。本研究中,生物炭与亚硒酸钠联合施用效果的调控效果最优,说明二者协同作用可有效调节水稻叶片抗氧化酶活性与渗透平衡,显著缓解镉胁迫对水稻的生理伤害。

3.1.3 生物炭与亚硒酸钠联合施用对水稻镉吸收的影响

籽粒镉含量是衡量稻田安全生产与稻米品质安全的核心指标, 主要取决于土壤镉生物有效性及水稻对镉的吸收特性等^[49]。本研究中, 基施生物炭、叶面喷施亚硒酸钠及二者联合施用均能显著降低水稻籽粒镉含量。其中, 生物炭的降镉机制以土壤钝化为主, 通过提升土壤 pH 值、吸附固定土壤 Cd^{2+} , 降低土壤镉生物有效性, 有效抑制土壤中的镉向水稻体内转运; 而叶面喷施亚硒酸钠主要通过硒、镉离子与镉离子拮抗作用发挥阻控效果^[50], 外源施硒可以阻碍镉向水稻籽粒中转移, 从而降低稻米中的镉含量^[51-52]。此外, 本研究结果表明, 生物炭与亚硒酸钠联合施用处理的水稻籽粒镉含量低于单一施用处理, 这与韩熙等^[53]提出的复合修复措施效果优于单一措施的结论一致, 说明生物炭联合亚硒酸钠可有效缓解水稻籽粒对镉的吸收, 降低糙米镉超标风险。

3.2 结论

基施生物炭以及生物炭与亚硒酸钠联合施用可有效改善镉污染稻田土壤理化性状, 显著提升土壤 pH 值、有机质及氮、磷、钾有效养分含量, 同时降低土壤有效态镉含量, 实现土壤肥力提升与重金属钝化的双重效果。同时, 上述处理还可有效促进水稻中后期干物质积累, 提升水稻茎、穗干物质含量, 显著增强水稻叶片 SOD、POD、CAT 活性, 降低 MDA 含量, 有效缓解镉胁迫对水稻植株的氧化损伤。相较于单一处理, 生物炭与亚硒酸钠联合施用的协同阻控效果最优, 可最大限度降低水稻籽粒镉积累量, 使糙米镉含量符合国家食品安全标准。综上, 生物炭与亚硒酸钠联合施用的修复模式, 能够有效改良镉污染稻田土壤、缓解水稻重金属胁迫、保障稻米安全生产, 该措施稳定可靠、环境友好, 可为区域重金属污染稻田的安全利用与农业绿色可持续生产提供科学理论依据与实践技术支持。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, WANG X, JI X H, et al. Effect of a Novel Ca-Si Composite Mineral on Cd Bioavailability, Transport and Accumulation in Paddy Soil-Rice System [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 802-811.
- [2] 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.
- [3] WU Y F, LI X, YU L, et al. Review of Soil Heavy Metal Pollution in China: Spatial Distribution, Primary Sources, and Remediation Alternatives [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 181: 106261.
- [4] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 153-159.
- [5] 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2021, 16(6): 133-149.
- [6] 余高, 陈芬, 赵成刚, 等. 高分子聚合物与钝化剂复配对汞污染土壤钝化修复研究 [J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 174-179, 186.
- [7] 林彦萍, 任源, 王晓娥, 等. 农业生物质废弃物转化功能材料的研究进展 [J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4332-4351.
- [8] 兰宇, 孟军, 韩晓日, 等. 生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1396-1412.
- [9] 吴拓铮, 詹娟, 周嘉文, 等. 不同调理剂对农田镉污染稳定效果及水稻吸收的影响 [J]. *土壤*, 2022, 54(3): 572-578.
- [10] ISMAEL M A, ELYAMINE A M, MOUSSA M G, et al. Cadmium in Plants: Uptake, Toxicity, and Its Interactions with Selenium Fertilizers [J]. *Metallomics*, 2019, 11(2): 255-277.
- [11] 刘奇, 王晟, 赵炫越, 等. 不同叶面阻控剂对玉米 Cd、Pb 积累与转运差异研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(6): 1247-1256.
- [12] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 [J]. *环境科学*, 2015, 36(11): 4283-4290.
- [13] 周其耀, 倪元君, 徐顺安, 等. 叶面调理剂对浙江东部镉污染农田水稻主栽品种安全生产的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(6): 768-776.

- [14] LI M Q, HASAN M K, LI C X, et al. Melatonin Mediates Selenium-Induced Tolerance to Cadmium Stress in Tomato Plants [J]. *Journal of Pineal Research*, 2016, 61(3): 291-302.
- [15] 贺前锋, 李鹏祥, 易凤姣, 等. 叶面喷施硒肥对水稻植株中镉、硒含量分布的影响 [J]. *湖南农业科学*, 2016(1): 37-39, 42.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 陈琼, 张竞颐, 董红颖, 等. 谷壳生物炭与石灰石组配对土壤中 Cd 有效性的影响 [J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1493-1498.
- [19] 郭大维, 胡艳美, 蔡世鑫, 等. 土壤改良剂与叶面喷硒联合阻控对小白菜吸收镉的影响 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1203-1209.
- [20] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰南坡不同植被类型土壤特性及其与海拔的关系 [J]. *草业科学*, 2017, 34(6): 1149-1158.
- [21] 马群, 刘铭, 周玉玲, 等. 生物炭与有机无机肥配施对土壤质量的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(7): 115-126.
- [22] ZHONG X, CHEN Z W, LI Y Y, et al. Factors Influencing Heavy Metal Availability and Risk Assessment of Soils at Typical Metal Mines in Eastern China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123289.
- [23] 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.
- [24] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 243-247, 252.
- [25] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1110-1118.
- [26] JIANG X Y, TAN X P, CHENG J, et al. Interactions between Aged Biochar, Fresh Low Molecular Weight Carbon and Soil Organic Carbon after 3.5 Years Soil-Biochar Incubations [J]. *Geoderma*, 2019, 333: 99-107.
- [27] CHAI J L, YANG H, CHEN Z, et al. Biochar and Nitrogen Fertilizer Promote Alfalfa Yield by Regulating Root Development, Osmoregulatory Substances and Improve Soil Physicochemical Properties [J]. *Agriculture*, 2025, 15(3): 239.
- [28] 冯熙睿, 孙晨宇, 柯心怡, 等. 酸化改良对紫色水稻土羟基自由基生成的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(10): 110-119.
- [29] 姜珊, 刘骞, 田宇鑫, 等. 物料还田对无梗五加土壤碳氮磷钾生态化学计量特征的影响 [J]. *北方园艺*, 2025(4): 104-112.
- [30] 朱凤君, 张春燕, 乔印虎, 等. 3 种秸秆生物炭对土壤理化性质和樱桃萝卜生长的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(21): 190-196.
- [31] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用 [J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 278-284.
- [32] 屈田华, 李永夫, 张少博, 等. 生物质炭输入影响土壤氮素转化与氧化亚氮排放的研究进展 [J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 926-936.
- [33] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1690-1695.
- [34] YAO Y, GAO B, ZHANG M, et al. Effect of Biochar Amendment on Sorption and Leaching of Nitrate, Ammonium, and Phosphate in a Sandy Soil [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [35] 李彩斌, 张久权, 何轶, 等. 生物炭用量对土壤速效钾含量和烟叶钾吸收的长期效应 [J]. *中国土壤与肥料*, 2024(5): 89-95.
- [36] 王丽, 蔡景行, 罗沐欣键, 等. 镉胁迫下钝化剂对菠菜生理特征及镉累积的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2023,

- 42(5): 1004-1010.
- [37] 吴岩, 杜立宇, 梁成华, 等. 生物炭与沸石混施对不同污染土壤镉形态转化的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 286-290.
- [38] 周全卢. 秋甘薯不同类型品种干物质积累特性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [39] 苏扬, 商小兰, 钱忠明, 等. 腐熟剂与生物炭协同强化秸秆还田对土壤质量和水稻生长的影响 [J]. 浙江农业学报, 2025, 37(5): 1139-1148.
- [40] 荣飞龙, 蔡正午, 覃莎莎, 等. 酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响——基于5年大田试验 [J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4413-4424.
- [41] 黄太庆, 江泽普, 邢颖, 等. 亚硒酸钠不同施用方法对水稻硒富集及转化的影响 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 311-319.
- [42] 吴鑫, 谢晓燕, 李元, 等. 丛枝菌根真菌缓解微塑料对玉米生物量和抗氧化酶的毒性 [J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(4): 1032-1042.
- [43] NAEEM M A, SHABBIR A, AMJAD M, et al. Acid Treated Biochar Enhances Cadmium Tolerance by Restricting Its Uptake and Improving Physio-Chemical Attributes in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 191: 110218.
- [44] 陈平, 余土元, 陈惠阳, 等. 硒对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 广西植物, 2002, 22(3): 277-282.
- [45] 李继伟, 悦飞雪, 王艳芳, 等. 施用生物炭和AM真菌对镉胁迫下玉米生长和生理生化指标的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27(5): 120-129.
- [46] 张美德, 艾伦强, 卢超, 等. 硒对镉胁迫下白术幼苗生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 306-308.
- [47] 章明奎, 倪中应, 沈倩. 农作物重金属污染的生理阻控研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2017, 39(1): 96-101.
- [48] 魏晓东, 宋雪梅, 王宁, 等. 南粳系列超级稻品种灌浆期光合产物的分配特性 [J]. 中国农业科学, 2024, 57(12): 2309-2321.
- [49] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻镉吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展 [J]. 土壤, 2012, 44(3): 360-365.
- [50] 于淑慧, 周鑫斌, 王文华, 等. 硒对水稻幼苗吸收镉的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 17-22.
- [51] 李霞, 周娅, 罗丽卉, 等. 油菜秸秆生物炭对成都平原土壤理化性质和水稻镉吸收的影响 [J]. 西南农业学报, 2025, 38(3): 605-611.
- [52] 徐境懋, 顾明华, 韦燕燕, 等. 纳米硒和亚硒酸盐对镉污染土壤中水稻镉积累的影响 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2727-2734.
- [53] 韩熙, 张锡洲, 余海英. 钝化材料复配对土壤Cd生物有效性的影响 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2884-2891.

责任编辑 孙文静

崔玉洁