

修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响

陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 王垚, 鲁洪娟, 叶文玲, 陈勇, 马友华

引用本文:

陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 王垚, 鲁洪娟, 叶文玲, 陈勇, 马友华. 修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 76–86.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0662>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对水稻Cu吸收转运的影响

喻成龙, 汤建, 喻惟, 倪国荣, 谢志坚, 康丽春, 荣勤雷, 周春火

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2095–2102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0549>

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻Cd迁移累积的影响

喻成龙, 汤建, 郑琴, 倪国荣, 谢志坚, 荣勤雷, 郭乃嘉, 王惠明, 周春火

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2554–2560 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0759>

种植制度对水稻籽粒铅、镉含量的影响

罗芬, 张玉盛, 周亮, 田伟, 肖峰, 张小毅, 敖和军

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1470–1478 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0052>

绿肥配施减量化肥对土壤固氮菌群落的影响

方宇, 王飞, 贾宪波, 林陈强, 张慧, 陈龙军, 陈济琛

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1933–1941 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0509>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 等. 修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 76-86.

TAO R H, YUAN X F, WU X D, et al. Effects of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on cadmium uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 76-86.



开放科学 OSID

修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响

陶荣浩¹, 袁旭峰², 吴新德³, 王垚¹, 鲁洪娟¹, 叶文玲¹, 陈勇⁴, 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 青阳县农业技术推广中心, 安徽 青阳 242800; 3. 池州市农业技术推广中心, 安徽 池州 247100; 4. 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 合肥 231602)

摘要:为探讨修复肥料和紫云英对镉污染稻田的修复效果,在大田试验条件下,设置修复肥料和紫云英处理,并与应用较为广泛的石灰进行安全利用效果对比,研究对镉污染稻田水稻不同部位镉吸收转运、有效态镉含量、镉化学形态和酶活性等的影响。结果表明:修复肥料和紫云英联合施用可以使水稻产量较不添加土壤调理剂增产9.01%,施用修复肥料或紫云英也有一定增产效果;修复肥料和紫云英单施及二者联合施用均有效降低糙米镉含量,联合施用的降镉效果最好,达到了28.64%,石灰处理后糙米镉含量也均低于GB 2762—2017限量值;修复肥料和紫云英联合施用水稻根际和非根际土壤pH值分别提高0.20和0.32个单位,效果好于石灰处理(分别提高0.08个和0.23个单位),修复肥料单施和与紫云英联合施用根际和非根际土壤有效态镉含量分别降低32.25%和40.54%,降镉效果接近石灰处理(27.87%和42.85%);修复肥料和紫云英联合施用降低了土壤弱酸提取态和可还原态镉含量,提高了残渣态镉含量。此外,修复肥料和紫云英的联合及单独施用在一定程度上提高了土壤蔗糖酶、脲酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性;紫云英和修复肥料单施和二者配施的投入产出比较高,分别为1.76、1.73和1.72。综合来看,在镉污染稻田紫云英还田时,配合修复肥料施用可降低稻米镉含量、提高稻谷产量、改善土壤酶活性,其投入产出比较高,且具有较高的经济效益和可操作性。

关键词:紫云英;修复肥料;镉;稻田;土壤酶;经济效益

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0076-11 doi:10.11654/jaes.2022-0662

Effects of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on cadmium uptake and accumulation in rice

TAO Ronghao¹, YUAN Xufeng², WU Xinde³, WANG Yao¹, LU Hongjuan¹, YE Wenling¹, CHEN Yong⁴, MA Youhua^{1*}

(1. Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Qingyang Agricultural Technology Extension Center, Qingyang 242800, China; 3. Chizhou Agricultural Technology Extension Center, Chizhou 247100, China; 4. CNSIG Anhui Hongsifang Fertilizer Co., Ltd., Hefei 231602, China)

Abstract: In this study, we explored the remediation effect of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on cadmium-contaminated rice fields. Under field conditions, the repair fertilizer and milk vetch treatments were set up, and the safety utilization effect was compared with lime, which is a widely used remedial treatment. The effects of cadmium on the uptake and transport of cadmium, DTPA-cadmium, chemical forms, and enzyme activities of cadmium in different parts of rice plants in cadmium-polluted paddy fields were studied. The results showed that: the combined application of repair fertilizer and milk vetch could increase rice yields by 9.01% compared to treatments without soil conditioner. The individual application of repair fertilizer or milk vetch also increased yield to a certain degree.

收稿日期:2022-06-28 录用日期:2022-10-12

作者简介:陶荣浩(1995—),男,安徽淮南人,硕士研究生,从事农田土壤污染修复研究。E-mail:906551666@qq.com

*通信作者:马友华 E-mail:yhma2020@qq.com

基金项目:安徽省科技重大攻关项目(17030701053)

Project supported: Major Science and Technology Project of Anhui Province, China(17030701053)

Repair fertilizer and milk vetch applied alone or in combination could effectively reduce the content of cadmium in brown rice. The combined application of cadmium in brown rice had the best effect, reaching 28.64%. The cadmium content of brown rice treated with lime was also lower than the limit value of GB 2762—2017. The pH of the rhizosphere and non-rhizosphere rice soils increased by 0.20 and 0.32 units, respectively, with the combined application of repair fertilizer and milk vetch, which was better than that of lime treatment (increased by 0.08 and 0.23 units). The DTPA-cadmium content in rhizosphere and non-rhizosphere soils decreased by 32.25% and 40.54%, respectively, when the repair fertilizer was applied alone or in combination with milk vetch, and the cadmium reduction effect was close to that of lime treatment (27.87% and 42.85%, respectively). The combined application of repair fertilizer and milk vetch reduced the content of weak acid-extracted and reducible cadmium in soil, and increased the content of residual cadmium. In addition, the combined and separate application of repair fertilizer and milk vetch increased the activities of soil invertase, urease, protease, and catalase to a certain extent. The input-output of milk vetch and repair fertilizer applied alone or combined were 1.76, 1.73 and 1.72, respectively. To summarize, when returning milk vetch from cadmium-contaminated rice fields, the application of repair fertilizer can reduce the cadmium content of rice, increase rice yield, and improve soil enzyme activity. Its input and output are relatively high, and it has higher economic benefits and operability.

Keywords: milk vetch; repair fertilizer; Cd; paddy; soil enzyme; economic performance

随着我国重金属采矿、冶炼行业的迅速发展,化肥农药、工业废水和矿业过程等含有的重金属不断被释放到农田环境,导致优质耕地面积大幅缩减^[1-5]。镉是一种有毒的重金属,在环境中具有高度的累积性和持久性^[6-7]。水稻是中国乃至全世界最重要的粮食作物,具有较强的镉吸收积累特性^[8],当稻田土壤中镉浓度超标时,不仅会使稻米中镉含量超标,危害人体健康,还会对水稻产量产生不利影响^[9-10]。此外,重金属污染还会抑制土壤酶活性,降低土壤中活性菌落的数量和土壤微生物生物量,对土壤微生物的群落结构产生影响^[11-12]。土壤pH是控制土壤养分有效性、土壤微生物活动以及作物生长发育的关键因素,相关研究证实,土壤pH值降低会提高土壤中镉的活性,增加水稻对镉的吸收和累积^[13]。因此,开展镉污染稻田土壤治理与水稻镉吸收积累控制研究,对于保障食品安全和改善土壤环境具有十分重要的现实意义。

施肥是满足作物生长所需养分的重要途径,同时对重金属活性产生较大影响。相关研究表明,氮肥施用,优化铵态氮与硝态氮的施用比例,可以提高稻田土壤pH值,降低重金属活性^[14];曹巧滢等^[15]的研究表明,在镉污染农田土壤中施用碱性肥料(含氮20%)能够降低土壤有效镉含量。而钙镁磷肥和硫酸钾的添加不仅可以提升作物产量,还能够抑制土壤中重金属的有效性^[16-17]。绿肥还田是土壤重金属改良的一项重要农艺措施,不仅可以降低水稻糙米中镉的含量,还可改变土壤中镉的赋存形态,并降低土壤中镉有效性^[18-19]。紫云英(*Astragalus sinicus* L.)是当前长江流域乃至南方地区大力发展的一种提升耕地质量和改善稻田生态环境的一种绿肥^[20]。紫云英还田可

为土壤微生物提供碳源,增强土壤酶活性以及铁锰氧化物还原过程,促进根表铁膜形成,进而影响水稻对镉的吸收^[21]。也有研究表明,紫云英还田提高了土壤镉活性^[22]。紫云英还田对水稻土镉有效性影响存在差异的原因,以及与其他修复材料配合施用的效果还需要进一步研究。

利用修复材料降低重金属活性是目前修复镉污染农田土壤的一种较为合理且经济的方法,它主要是通过重金属镉的吸附、沉淀或共沉淀等作用,改变镉在土壤中的存在形态,从而降低其生物有效性和迁移性^[23]。但土壤调理剂在实际应用中经济成本相对较高,不利于普通农户大面积推广应用。修复肥料是一种修复土壤重金属镉功能的肥料,主要以能够钝化土壤重金属活性的大颗粒尿素、颗粒磷铵、硫酸钾和调理剂等按照当地土壤环境状况与种植作物特征,并结合耕作制度、气候、土壤等情况进行配比而成,在增产的同时能够降低土壤中重金属活性,减少作物对土壤中重金属的吸收,使作物重金属含量达到限量值标准以下,达到安全生产的效果,并具备一定的经济效益。当前,修复肥料这个概念在农田土壤重金属修复中尚未提出,在田间试验条件下也缺乏深入研究,与其他农艺措施结合效果也未见报道。因此,本研究选取池州市青阳县某安全利用类镉污染稻田作为试验田,开展修复肥料和紫云英单施以及二者联合施用下对农田土壤镉污染修复试验效果的研究,并与石灰处理进行对比,通过比较水稻产量、水稻镉含量、土壤pH值、有效态镉含量、镉形态变化及酶活性的差异,以期为青阳县乃至长江中下游流域镉污染稻田的安全生产提供理论与实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的水稻品种为在当地适宜种植的特糯2072。

土壤调理材料:修复肥料由安徽农业大学和中盐安徽红四方肥业股份有限公司联合研发,主要成分为大颗粒尿素、颗粒磷铵、硫酸钾和调理剂等,N-P₂O₅-K₂O:20-10-15,Cl⁻:0.43%,S:8.84%。紫云英品种为弋江籽,石灰购自当地市场。

其他肥料:含氮磷钾45%(15-15-15)的复合肥、含纯氮量(N)46%的尿素、含纯钾量(K₂O)60%的氯化钾。如表1所示,本试验土壤调理材料重金属含量均符合《农业行业标准 有机肥料》(NYT525—2021)规定的限值(Cd≤3 mg·kg⁻¹;Hg≤2 mg·kg⁻¹;As≤15 mg·kg⁻¹;Pb≤50 mg·kg⁻¹;Cr≤150 mg·kg⁻¹)。

表1 土壤调理材料重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Heavy metals content of soil conditioning materials(mg·kg⁻¹)

| 材料Material | 镉Cd | 汞Hg | 砷As | 铅Pb | 铬Cr |
|------------------------|------|-------|------|------|-----|
| 复合肥Compound fertilizer | 0.18 | 0.012 | 11.7 | 16.8 | 15 |
| 修复肥料Repair fertilizer | 0.05 | 0.004 | 8.7 | 17.7 | 11 |
| 石灰Lime | 0.52 | 0.019 | 18.1 | 39.0 | 14 |

1.2 试验区概况

试验田所在的区域位于118°02′33″E,30°42′34″N,土壤亚类为潜育性水稻土,成土母质为河流冲积物。该区域范围内耕地土壤重金属镉含量在0.19~0.34 mg·kg⁻¹之间,试验前一季区域内收获后稻米镉含量在0.17~0.42 mg·kg⁻¹之间,存在稻米镉超标情况。如表2所示,参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)要求,本次试验田耕地土壤重金属镉含量为0.31 mg·kg⁻¹,高于筛选值(0.30 mg·kg⁻¹),但低于农用地土壤污染风险管控值(1.50 mg·kg⁻¹),土壤有效态镉含量为0.206 mg·kg⁻¹。

试验地土壤基本理化性质:土壤pH值5.41、有机质23.94 mg·kg⁻¹、全氮1.16 g·kg⁻¹、有效磷13.71 mg·kg⁻¹、速效钾95.48 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计和样品处理

小区试验设计采用区组随机分布,共5个处理,每个处理小区设置3次重复,共计15个处理小区,每个小区面积为20 m²,各小区间用薄膜护埂,清洁水灌

溉,截断污染源。

田间小区修复材料施用量如表2所示,在施用基肥前7 d施用土壤调理材料,紫云英按一定量鲜样翻耕施入土壤,然后用旋耕机混匀,翻耕期间直至种植作物前,田中水不外排。按照当地高产栽培技术施肥量施肥,基肥采用45%氮磷钾(15-15-15)复合肥,用量为0.6 t·hm⁻²,在插秧前1~2 d施入,水稻直播密度为13 cm×30 cm;20 d后施尿素0.15 t·hm⁻²作返青分蘖肥,施用0.11 t·hm⁻²的钾肥,水稻孕穗期追施尿素0.10 t·hm⁻²作孕穗肥。根据当地水稻优质高产栽培方式,采用关键期(抽穗期前后三周、孕穗期至灌浆期)进行淹水灌溉(维持3~5 cm水层)。

表2 田间小区试验处理及材料用量

Table 2 Field plot test treatments and material consumption

| 处理Treatment | 修复材料Repair material | 施用量Amount/(t·hm ⁻²) | 备注Remark |
|-------------|---------------------|---------------------------------|----------|
| CK | — | — | 常规施基肥 |
| SH | 石灰 | 2.25 | 常规施基肥 |
| FL | 修复肥料 | 0.45 | 不施基肥 |
| ZYY | 鲜紫云英 | 22.50 | 基肥减少20% |
| FZ | 修复肥料+鲜紫云英 | 0.36+22.50 | 不施基肥 |

注:各处理氮磷钾施用量和追肥用量保持一致。

Note: The application rate of N, P and K in each treatment is consistent with the application rate of topdressing.

样品于2021年9月15日水稻成熟期采集。水稻成熟期进行实际测产,同时随机统计每个小区1 m²调查框内的水稻有效穗数和总共结实的穗粒数,并计算平均每株有效穗粒数(总共结实的穗粒数/有效穗数),称量1 000粒穗粒的质量计为千粒质量。水稻样品按梅花形取样法每个小区采取水稻5株,采集后先后用自来水和去离子水清洗干净,再将整株分为根部、茎叶和稻谷。植株部于105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒质量;稻谷晒干后按《农业行业标准 米质测定方法》(NY/T83—2017)出糙,分离出糙米和壳。称量各部位干质量,利用不锈钢粉碎机进行粉碎。土壤样品在采集水稻样品当日采集,根际土壤样品(0~20 cm)用抖落法收集水稻根部附近的土壤,并组成混合样^[24];非根际土壤样品(0~20 cm)按照五点采样法在小区内用木铲进行采集并组成混合土样。在阴凉处风干后,粉碎研磨10目筛和100目筛装入自封袋备用。

1.4 样品测定

水稻各部位中重金属镉含量的测定根据《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—

2016),称取0.3 g样品(精确到0.001 g)于微波消解罐内,加入5 mL硝酸,加盖放置1 h后用CEM MRAS6进行微波消解,冷却后取出,缓慢打开罐盖排气,用少量水冲洗内盖,将消解罐放在控温电热板上,于100 °C加热30 min后用超纯水定容至25 mL,使用iCAP 7000 Series电感耦合等离子发射光谱法测定。土壤有效态镉(DTPA-Cd)的测定根据《土壤质量 有效态铅和镉的测定》(GB/T 23739—2009),用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计火焰法测定。土壤镉不同形态的测定采用改进后的BCR三步连续提取法^[25],将三步提取态之和加上残渣态含量与国家标准土壤物质中重金属总量进行了比较,回收率在93.9%~104%之间,分析结果在允许误差范围内。土壤酶的分析主要按照《土壤酶及其研究方法》中规定方法检测。土壤pH采用去CO₂蒸馏水浸提(土水比1:2.5),精密pH计(TARTER2100)测定。以国家标准参比物质土壤样品(GBW07461)和植物样品(GBW10045)进行质量控制,分析结果均在允许误差范围内。

根据以下公式计算相关指标:

糙米富集系数(BCF_{糙米})=糙米某种元素含量(mg·kg⁻¹)/土壤该种元素含量(mg·kg⁻¹)

糙米-秸秆转运系数(TF_{糙米-秸秆})=水稻糙米重金属含量(mg·kg⁻¹)/水稻秸秆重金属含量(mg·kg⁻¹)

秸秆-根转运系数(TF_{秸秆-根})=水稻秸秆重金属含量(mg·kg⁻¹)/水稻根重金属含量(mg·kg⁻¹)

糙米-根转运系数(TF_{糙米-根})=水稻糙米重金属含量(mg·kg⁻¹)/水稻根重金属含量(mg·kg⁻¹)

总产出(元·hm⁻²)=水稻产量(kg·hm⁻²)×水稻单价(元·kg⁻¹)

投入产出比(ROI)=所获得的产出总收入/所投入的总成本

1.5 数据分析

采用Excel 2016进行数据整理,使用SPSS 23.0进行方差分析和相关分析,采用Origin 2017制图。数据表示为平均值±标准差,用Duncan's法检验显著性差异($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻农艺性状的影响

由表3可知,不同处理下水稻产量在7.21~7.53 t·hm⁻²之间,与CK处理相比,FL、ZYY和FZ处理下水稻增产率分别达到了7.07%、6.86%和9.01%,FZ处理下水稻增产效果最好。FL、ZYY和FZ处理下稻谷产量

表3 不同处理对田间小区水稻农艺性状影响

Table 3 Effects of different treatments on agronomic characters of rice in field plot

| 处理 Treatment | 千粒质量 1 000-grain weight/g | 结实率 Seed setting rate/% | 有效分蘖数 Effective tillers number | 产量 Yield/(t·hm ⁻²) |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| CK | 24.97±0.53a | 78.67±1.16a | 14.67±0.14a | 6.91±0.05b |
| SH | 24.90±1.11a | 81.00±1.73a | 14.60±0.53a | 7.21±0.02ab |
| FL | 25.34±0.28a | 80.00±3.00a | 14.67±0.55a | 7.40±0.38a |
| ZYY | 25.16±0.68a | 80.67±2.08a | 14.61±0.44a | 7.38±0.25a |
| FZ | 25.23±1.05a | 78.33±1.53a | 14.84±0.22a | 7.53±0.18a |

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

与SH处理间存在差异,但不显著($P>0.05$)。各处理对水稻千粒质量、结实率和有效分蘖数无显著影响。

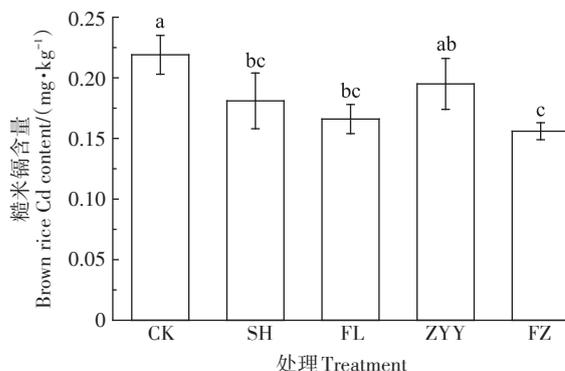
2.2 不同处理对水稻重金属吸收、富集和转运的影响

2.2.1 水稻糙米重金属镉含量的差异

由图1可知,不同处理下糙米中重金属镉含量在0.156~0.219 mg·kg⁻¹之间,各处理除CK处理外均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定的限量值。FL、ZYY和FZ处理下,糙米中镉含量分别为0.166、0.195 mg·kg⁻¹和0.156 mg·kg⁻¹,其中FZ处理的降低效果显著高于其他处理,较CK处理降低了28.65%,与SH处理相比降低了13.80%,而ZYY处理的降低率为11.02%,与FZ处理相比具有显著差异($P<0.05$)。

2.2.2 水稻各部位重金属镉含量的差异

由图2可知,不同处理下水稻各部位重金属镉含



相同柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different small letters above the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同处理对水稻糙米重金属镉含量的影响(mg·kg⁻¹)

Figure 1 Effects of different treatments on Cd content in brown rice (mg·kg⁻¹)

量存在差异性,水稻根、秸秆和稻壳镉含量分别在0.461~0.566、0.223~0.337 mg·kg⁻¹和0.113~0.156 mg·kg⁻¹之间。相较于CK处理,FL处理下水稻秸秆和稻壳镉含量分别降低了30.67%和16.61%;ZYY处理下水稻根、秸秆和稻壳镉含量分别降低14.26%、18.65%和14.75%;FZ处理下水稻秸秆和稻壳镉含量分别降低33.79%和27.52%,水稻根中镉含量虽较CK处理增加了5.15%,但差异不显著($P>0.05$)。

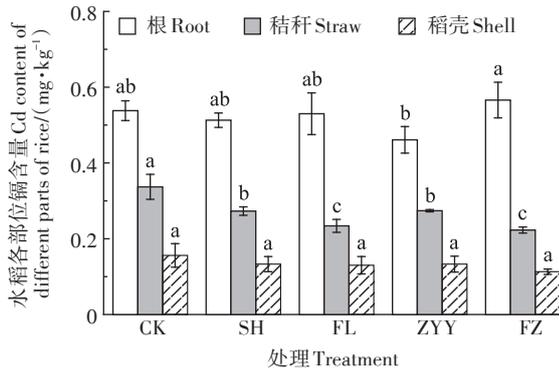


图2 不同处理对水稻各部位重金属镉含量的影响(mg·kg⁻¹)

Figure 2 Effects of different treatments on the content of Cd in various parts of rice(mg·kg⁻¹)

2.2.3 水稻各部位镉的富集和转运系数的差异

由表4可知,相较于CK处理,FL和FZ处理均能显著降低糙米对重金属镉的富集系数,降低率分别为25.42%和28.84%,ZYY处理虽较CK处理下降了13.18%,但差异不显著($P>0.05$),FL和FZ处理的降低效果优于SH处理,但ZYY处理对降低水稻糙米中的富集镉的能力则弱于SH处理。与CK处理相比,FL处理降低了水稻秸秆-根和糙米-根的转运系数,分别为29.23%和23.16%,糙米-秸秆的转运系数则提高了8.49%;ZYY处理降低了秸秆-根的转运系数,降低率为4.76%,而糙米-秸秆和糙米-根的转运系数

表4 不同处理对水稻各部位镉富集和转运系数的影响

Table 4 Effects of different treatments on Cd enrichment and transport coefficients in various parts of rice

| 处理 Treatment | BCF 籽粒 BCF _{Grain} | TF 秸秆/根 TF _{Straw/Root} | TF 糙米/秸秆 TF _{Grain/Straw} | TF 糙米/根 TF _{Grain/Root} |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| CK | 0.716±0.067a | 0.626±0.053a | 0.657±0.114a | 0.408±0.048a |
| SH | 0.580±0.081b | 0.533±0.035b | 0.663±0.057a | 0.355±0.052ab |
| FL | 0.534±0.040b | 0.443±0.052c | 0.713±0.061a | 0.314±0.010bc |
| ZYY | 0.622±0.083ab | 0.596±0.043ab | 0.710±0.075a | 0.422±0.016a |
| FZ | 0.510±0.040b | 0.393±0.035c | 0.700±0.014a | 0.278±0.030c |

则分别提高了8.11%和3.21%;FZ处理对水稻秸秆-根和糙米-根的转运系数分别降低了36.72%和32.00%,与CK处理相比具有显著差异性($P<0.05$),对降低水稻镉转运能力效果最好。

2.3 不同处理对土壤pH、有效态镉和镉形态的影响

2.3.1 不同处理对土壤pH和有效态镉的影响

由表5可知,与CK处理相比,FL、ZYY和FZ处理均能提高成熟期土壤的pH值,其中根际土壤分别提升了0.23、0.10个和0.20个单位,非根际土壤分别提升了0.32、0.26个和0.32个单位,均显著差异($P<0.05$),ZYY处理对根际土壤pH值提升幅度低于其他处理,且显著差异($P<0.05$),SH处理下根际和非根际土壤pH值分别提高0.08个和0.23个单位。各处理对非根际土壤pH值的提升效果均要好于根际土壤。相较于CK处理,FL、ZYY和FZ处理均能降低成熟期土壤有效态镉含量,其中对根际土壤有效态镉降低幅度分别为31.07%、24.82%和32.25%,对非根际土壤有效态镉降低幅度分别达到了35.98%、37.37%和40.54%,SH处理下根际和非根际土壤有效态镉分别降低27.87%和42.85%,FZ处理降低对根际土壤有效态镉的效果最好,且与其他处理差异显著($P<0.05$),各处理对非根际土壤中有效态镉的降低效果好于根际土壤。

表5 不同处理对成熟期土壤pH和有效态镉含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on soil pH and DTPA-Cd content at ripening stage

| 处理 Treatment | 土壤pH Soil pH | | 有效态镉 DTPA-Cd/(mg·kg ⁻¹) | |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | 根际土 Rhizosphere soil | 非根际土 Non rhizosphere soil | 根际土 Rhizosphere soil | 非根际土 Non rhizosphere soil |
| CK | 5.47±0.02c | 5.36±0.03b | 0.203±0.011a | 0.195±0.013a |
| SH | 5.65±0.05ab | 5.59±0.04a | 0.147±0.005bc | 0.112±0.002b |
| FL | 5.70±0.04a | 5.68±0.05a | 0.140±0.007bc | 0.125±0.007b |
| ZYY | 5.57±0.07b | 5.62±0.06a | 0.153±0.002b | 0.122±0.004b |
| FZ | 5.67±0.02a | 5.68±0.06a | 0.138±0.008c | 0.116±0.006b |

2.3.2 不同处理对土壤镉形态转化的影响

由图3可知,相较于CK处理,FL、ZYY和FZ处理均能使根际土壤中土壤弱酸提取态镉和可还原态镉含量降低,降幅在19.97%~31.97%和3.76%~14.08%之间,FZ处理降幅最明显;FL和ZYY处理均能够提高根际土壤中的可氧化态,但提升效果低于SH处理;FZ处理对根际土壤残渣态含量提升效果最佳,达到了39.63%。非根际土壤中,FZ处理可以显著降低土壤弱酸提取态,达到了28.78%,但FL和ZYY处理的效果

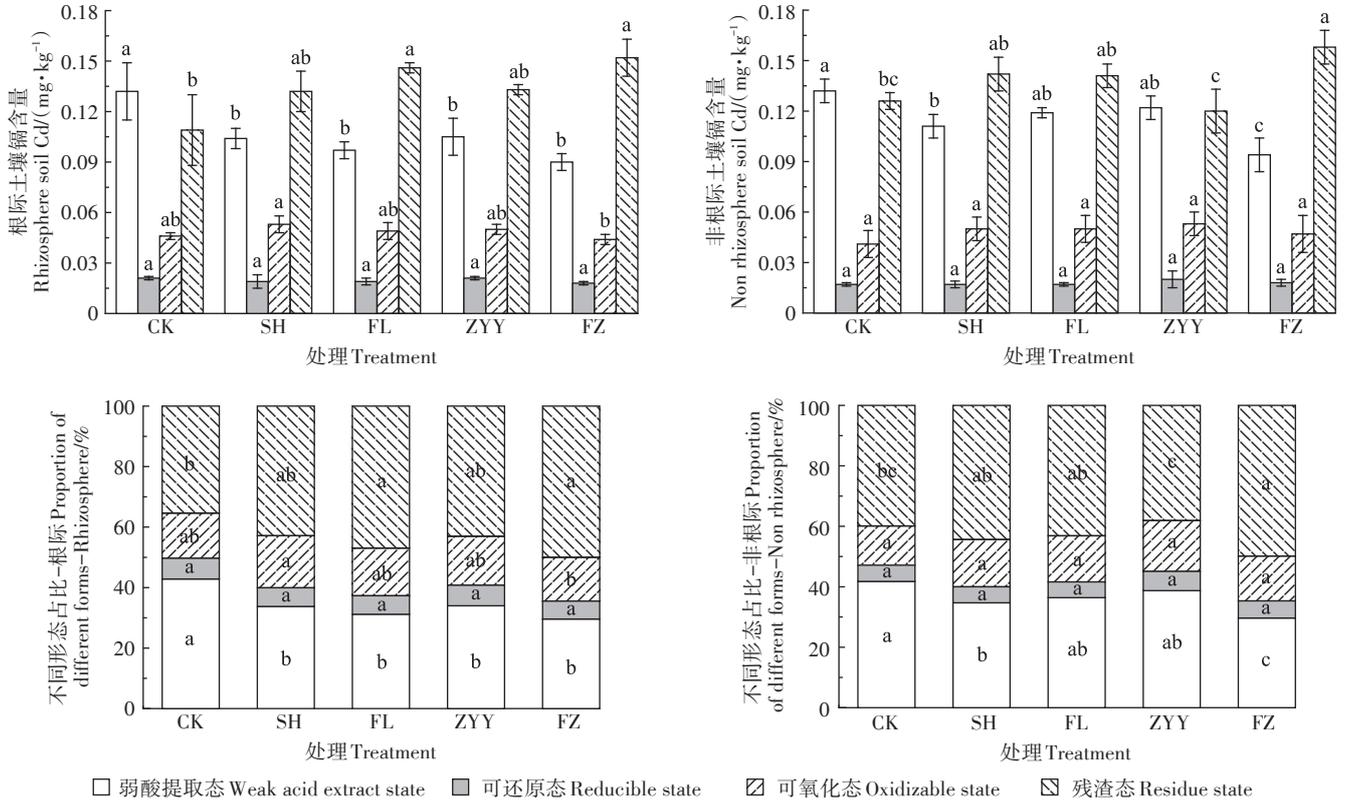


图3 不同处理对成熟期土壤镉形态及分布比例的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the form and distribution proportion of Cd in soil at maturity

低于SH处理;FL处理可以使非根际土壤中可氧化态和残渣态的含量分别提高21.60%和11.98%,FZ处理非根际土壤中残渣态的含量提升最明显,达到了25.00%。

2.3.3 不同处理对土壤酶活性的影响

由图4可知,不同处理对土壤中酶活性的影响具有差异性。相较于CK处理,FL、ZYY和FZ处理均能有效提高土壤中酶活性,其中,ZYY处理对土壤过氧化氢酶提高了21.73%,与SH处理相比差异显著($P < 0.05$)。FZ处理提高了土壤脲酶和蔗糖酶的活性,分别达到了54.26%和65.79%,显著高于SH处理($P < 0.05$)。FL、ZYY和FZ处理对土壤蛋白酶的的提升率在0.01%~7.84%之间,低于SH处理的效果。

2.4 不同处理对水稻各部位镉含量、土壤pH、有效态镉及酶活性相关性分析

对水稻不同部位镉含量进行相关性分析,结果如表6所示,糙米镉含量与稻壳镉含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),与秸秆镉含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),秸秆镉含量与稻壳镉含量之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。根部镉含量与糙米镉含量和秸秆镉含量之间呈负相关关系,与稻米镉含量呈正相关关系,但相关性均不显著。

对水稻土壤pH、有效态镉含量及酶活性进行相关性分析,结果如表7所示,土壤pH与有效态镉含量之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),过氧化氢酶与脲酶之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$)、与蔗糖酶之间呈显著正相关关系($P < 0.05$),有效态镉含量与脲酶之间呈显著负相关关系($P < 0.05$),蔗糖酶与蛋白酶之间呈显著负相关关系($P < 0.05$),其余指标之间存在相关性,但不显著。

2.5 不同处理经济效益分析

本试验所涉及的肥料和水稻价格以及种子、化肥、机械、人工等成本价格结合市场调查得出,具体价格以市场实际价格为准。在其他管理水平一致的基础上,经济效益对比如表8所示。投入产出比较高的是ZYY、FL处理和FZ处理,分别为1.76、1.73和1.72,显著高于SH处理($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同处理对水稻各部位镉富集、吸收与转运的影响

植物对重金属镉的吸收和迁移受多个因素的影响,如土壤pH、有效态镉以及离子间的作用等。添加土壤调理剂不仅影响了土壤有效态镉,也改变了土壤

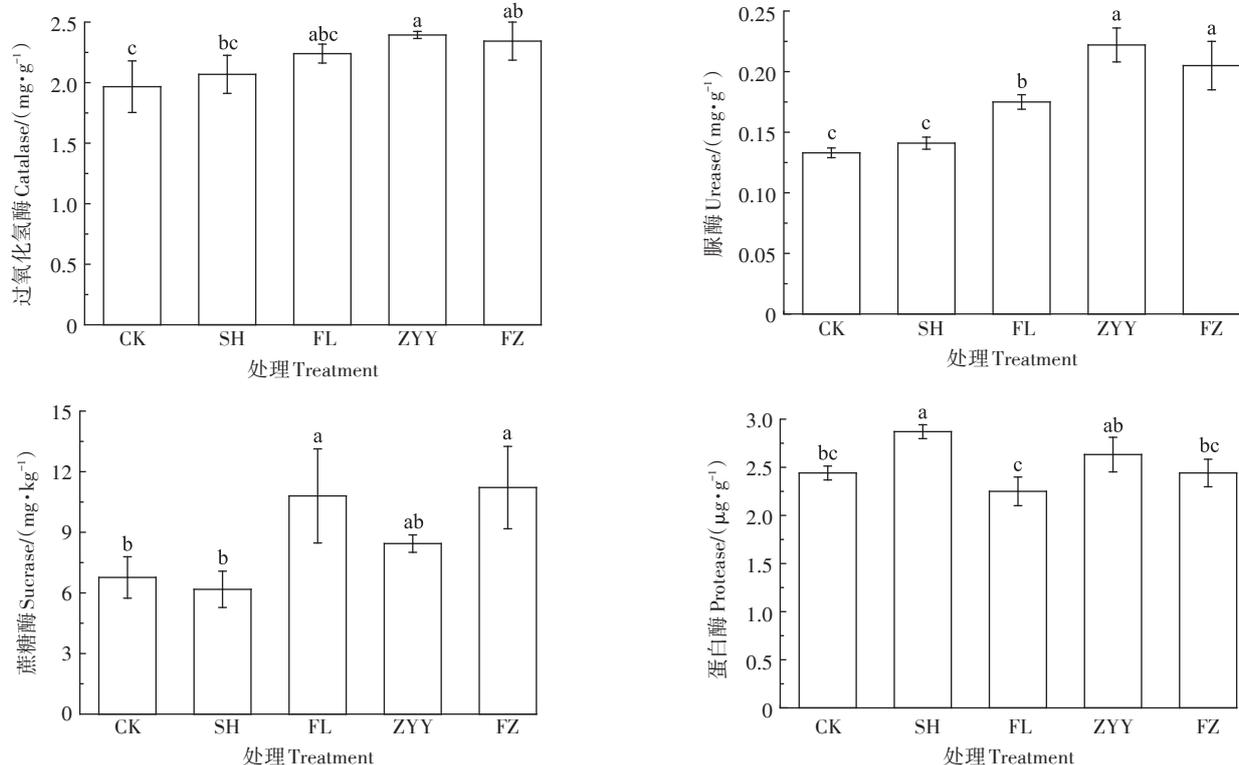


图4 不同处理对成熟期根际土壤酶活性的影响

Figure 4 Effects of different treatments on enzyme activities in rhizosphere soil at maturity

的肥力和酶活性等,进而影响植物对镉的吸收、迁移和转化^[26-27]。本研究表明,镉在水稻植株中分布情况表现为根>秸秆>糙米>稻壳,这与Shi等^[28]的研究结果一致,镉从土壤溶液进入根细胞,通过转运蛋白经过木质部运输到茎叶部位,当籽粒进行灌浆时,再通过韧皮部将茎叶中的镉转运至籽粒中;在灌浆阶段,根系与秸秆部新陈代谢旺盛,镉富集量大,使糙米部位的重金属镉含量相对较小。本研究表明,不同处理对水稻糙米镉含量均有降低的效果,且均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的限量值,其中,降低效果最为显著的为单施修复肥料和两者联合施用,这可能是由于修复肥料中富含硫酸钾,而硫是植物生长发育的必需元素之一,可以和重金属形成有机化合物,减轻重金属的生理毒害作用^[29]。有关研究表明紫云英可以显著降低水稻镉有效性,抑制根系对镉的吸收和籽粒中镉积累^[30],本研究中,修复肥料和紫云英的施用能够使根-秸秆和根-籽粒镉的转运系数降低,进而降低水稻糙米中镉的含量。单施紫云英虽能够降低糙米中重金属镉含量,效果却与其他处理相比不明显,而紫云英与修复肥料联合施用却能够显著降低糙米中重金属镉含量,

这可能是修复肥料中包含了磷酸盐成分,其被吸附后能够增加土壤的表面负电荷,使重金属离子不断以静电吸附的方式吸附在土壤颗粒周围,并通过改变重金属在土壤-植物系统中的形态来降低重金属的有效性,进而降低糙米中镉含量^[31]。紫云英等有机物料施用对镉在水稻植株体内转运的影响存在较大差异,这可能是由于其转运过程受土壤pH值、Eh、养分供应状况以及水稻品种等多种因素的共同影响^[32],因此紫云英施用促进镉由叶向稻米转运的作用机制有待进一步研究。

3.2 不同处理对土壤pH、有效态镉及镉形态转化的影响

土壤pH值对重金属形态有显著影响,提高土壤pH能够降低土壤重金属的有效性和迁移能力,其原因是pH影响着土壤重金属的溶解-沉淀平衡。Zhang等^[33]通过开展长期的水稻-绿肥轮作试验发现,种植并翻压紫云英、油菜、黑麦草等绿肥相比于对照处理会使土壤中pH值从5.98上升至6.24~6.28。Mohamed等^[34]研究发现施加绿肥后土壤pH从6.04增加到6.91,使得可交换态镉从1.00 mg·kg⁻¹降低至0.03~0.39 mg·kg⁻¹。本研究中,在单施紫云英及与修

表6 不同处理对水稻各部位镉含量的相关性

Table 6 Correlation of Cd content in different parts of rice under different treatments

| 指标 Index | 糙米 Cd Brown rice Cd | 稻壳 Cd Shell Cd | 秸秆 Cd Straw Cd | 根 Cd Root Cd |
|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 糙米 Cd Brown rice Cd | 1.000 | | | |
| 稻壳 Cd Shell Cd | 0.615* | 1.000 | | |
| 秸秆 Cd Straw Cd | 0.772** | 0.761** | 1.000 | |
| 根 Cd Root Cd | -0.169 | 0.067 | -0.125 | 1.000 |

注:**在0.01级别(双尾),相关性显著。*在0.05级别(双尾),相关性显著。下同。

Note:** indicates the correlation is extremely significant at the level of 0.01 (two tailed); * indicates the correlation is significant at the level of 0.05 (two tailed). The same below.

复肥料联合施用下,使土壤pH增加了0.10~0.23个单位,而Wang等^[35]研究发现施加绿肥后水稻根区土壤pH高于非根区土壤,但水稻各部位重金属镉含量增加。土壤中有效态镉含量是影响植物根系吸收镉的重要因素。相关研究表明,通过肥料调控可改变土壤镉的生物有效性,进而影响植物对土壤镉的吸收^[36]。修复肥料中含有的磷酸根溶解后可与重金属生成沉淀,使土壤中重金属活性降低并向残渣态转化。Qiu等^[37]在植物亚细胞水平上研究磷与镉的交互作用,发

现在镉污染土壤中外源添加磷会使镉离子与磷酸盐在菜心细胞壁上形成磷-镉化合物,进而对镉起到固定作用。Wang等^[38]的研究显示,磷酸二氢钙使镉的有效浓度降低98%。本研究中,单施修复肥料和修复肥料与紫云英联合施用分别使土壤有效态镉含量降低了31.07%和32.25%。添加紫云英等会改变土壤的理化性状,并最终导致土壤重金属生物有效性的变化^[39]。Yin等^[40]的研究认为有机质可以促进土壤对镉的吸附,从而降低镉的有效性。绿肥的施加提高了土壤中有机质含量,由于土壤对有机质的吸附改变了土壤中重金属的结合位点和黏土矿物表面的电荷,从而提高了土壤颗粒对重金属镉离子的吸附能力。大量研究表明,土壤有效态镉含量与其总量呈显著或极显著正相关,与pH呈显著或极显著负相关^[41-43]。本试验中,土壤pH与有效态镉含量之间呈极显著负相关关系($P<0.01$),与前人研究结果一致。重金属在土壤中经过络合、吸附、溶解、沉淀等化学反应可形成各种具有不同生物有效性的赋存形态^[44]。重金属镉极易被植物吸收利用,其在土壤中的赋存形态直接影响镉的生物有效性,因此分析土壤中镉不同形态具有重要意义。土壤中的可交换态镉易被植物直接吸收,可还原态镉和可氧化态镉在一定条件下能转变为可交换态镉,能够间接被植物吸收。Zhang等^[45]研究表明,施用紫云英可以促进土壤中镉的酸可提取态和可还

表7 不同处理对根际土壤pH、有效态镉及酶活性的相关性

Table 7 Correlation of rhizosphere soil pH, available Cd and enzyme activity

| 指标 Index | 土壤 pH Soil pH | 有效态 Cd DTPA-Cd | 过氧化氢酶 Catalase | 脲酶 Urease | 蔗糖酶 Sucrase | 蛋白酶 Protease |
|----------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------|-----------------|
| 土壤 pH Soil pH | 1.000 | | | | | |
| 有效态 Cd DTPA-Cd | -0.814** | 1.000 | | | | |
| 过氧化氢酶 Catalase | 0.394 | -0.516* | 1.000 | | | |
| 脲酶 Urease | 0.310 | -0.529* | 0.776** | 1.000 | | |
| 蔗糖酶 Sucrase | 0.553* | -0.467 | 0.536* | 0.465 | 1.000 | |
| 蛋白酶 Protease | -0.134 | -0.102 | -0.072 | -0.132 | -0.579* | 1.000 |

表8 不同处理经济效益分析

Table 8 Economic benefit analysis of different treatments

| 处理 Treatment | 投入 Input(元·hm ⁻²) | | | 总投入 Total input/(元·hm ⁻²) | 总产出 Total output/(元·hm ⁻²) | 投入产出比 Input-output ratio |
|-----------------|-------------------------------|---------------|----------|--|---|-----------------------------|
| | 调理剂 Conditioner | 肥料 Fertilizer | 其他 Other | | | |
| CK | 0 | 1 215 | 9 500 | 10 715 | 10 755±81b | 1.01±0.01c |
| SH | 2 250 | 1 215 | 9 500 | 12 965 | 19 159±301a | 1.48±0.02b |
| FL | 1 350 | 0 | 9 500 | 10 850 | 18 757±62a | 1.73±0.01a |
| ZYY | 450 | 972 | 9 500 | 10 922 | 19 236±551a | 1.76±0.05a |
| FZ | 1 530 | 0 | 9 500 | 11 030 | 18 963±411a | 1.72±0.04a |

原态向残渣态转化,增加土壤中镉的稳定性,从而削弱土壤中镉向植物中的转化能力。Mohamed等^[34]发现施加绿肥显著降低了土壤中可溶态/交换态镉的含量,增加了土壤中有机关态和无机沉淀态镉的含量。本研究中,单施修复肥料和紫云英与修复肥料联合施用均能使根际土壤中弱酸提取态镉和可还原态镉含量占比降低,提高根际土壤中的可氧化态镉比例,对根际土壤中残渣态镉比例提高较为显著。

3.3 不同处理对根际土壤酶活性的影响

土壤酶由土壤动物、微生物和植物根系共同作用产生,是土壤生化反应的催化剂,能够直接或间接参与重金属的生物地球化学循环过程,其活性受环境因子等多种因素影响。相关研究表明,土壤酶活性可敏感地反映土壤理化性质及重金属污染程度^[46]。本研究中,土壤有效态镉与土壤酶活性之间呈显著负相关关系,表明土壤中重金属镉对土壤酶活性具有负面效应,与前人研究结果一致。Stark等^[47]发现,在试验初期,绿肥的添加显著提高了土壤微生物生物量和活性,改变了土壤微生物群落。本研究发现,紫云英和修复肥料能够显著提高土壤中酶活性,这可能是由于该措施补充了土壤中有有机碳源,改善了土壤化学性质,提升了土壤养分含量和酶活性,利于土壤微生物活性的增加,活化土壤养分。土壤酶活性值的大小综合反映了土壤理化性质和重金属浓度的高低,特别是脲酶的活性对于反映土壤重金属污染具有重要的监测价值,也可以作为土壤中重金属污染的指标^[48]。本研究中,单施修复肥料和紫云英及两者联合施用对土壤蔗糖酶、脲酶、蛋白酶和过氧化氢酶均有不同程度的提升作用。这可能是由于一方面施加修复肥料和紫云英显著降低了土壤中有效态镉含量,从而降低了重金属对土壤微生物的胁迫;另一方面,修复肥料和紫云英能够促进土壤养分循环,使土壤微生物生长环境得到改善,进而提高土壤酶活性。土壤酶的活性与土壤肥力状况有显著的相关性,所以土壤酶活性可以较好地反映土壤的肥力状况,用来指导集约化农业生产,有利于提高农业生产的经济性。

4 结论

(1)修复肥料和紫云英单施及联合施用均能够使水稻产量较空白增产,联合施用的增产效果最好,增产达到了9.01%。

(2)修复肥料和紫云英联合施用对降低糙米中镉含量的效果最好,达到了28.64%,且在《食品安全国

家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定的限量值以下,二者单独施用也能够达到标准以下。

(3)修复肥料和紫云英单施及联合施用能够在提高土壤pH值的同时降低土壤中有效态镉的含量,提高土壤中残渣态镉的含量,也能提高土壤中蔗糖酶、脲酶、蛋白酶和过氧化氢酶的活性。

(4)投入产出比较高的处理是紫云英单施(1.76)、修复肥料单施(1.73)和二者联合施用(1.72)。

参考文献:

- [1] DEMIM S, DROUCHE N, AOUABEDC A, et al. Cadmium and nickel: Assessment of physiological effects and heavy metal removal using a response surface approach by L.gibba[J]. *Ecological Engineering*, 2013 (61):426-435.
- [2] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49:750-759.
- [3] SENEVIRATNE M, RAJAKARUNA N, RIZWAN M, et al. Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: A critical review[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(4):1813-1831.
- [4] ARSHAD, NAQVI N, GUL I, et al. Lead phytoextraction by *Pelargonium hortorum*: Comparative assessment of EDTA and DIPA for Pb mobility and toxicity[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 748(2):141496.
- [5] MANZOOR, GUL I, MANZOOR A, et al. Arshad optimization of integrated phytoremediation system (IPS) for enhanced lead removal and restoration of soil microbial activities[J]. *Chemosphere*, 2021, 277:1-10.
- [6] LI X, MENG D, LI J, et al. Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination[J]. *Environ Pollut*, 2017, 231:908-917.
- [7] BEHNKE G D, ZUBER S M, PITTELKOW C M, et al. Long-term crop rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2018, 261:62-70.
- [8] BASHIR A, RIZWAN M, UREHMAN M Z, et al. Application of co-composted farm manure and biochar increased the wheat growth and decreased cadmium accumulation in plants under different water regimes[J]. *Chemosphere*, 2020, 246:1-11.
- [9] 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.
- [10] ZHAO H R, XIA B C, FAN C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan mine, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417:45-54.
- [11] BROOKES P C, MCGRATH S P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. *Soil Science*, 1984, 35(2):341-346.
- [12] JORDAN M J, LECHEVALIER M P. Effects of zinc-smelter emissions on forest soil microflora[J]. *Canada Journal of Microbiology*, 1975, 21(11):1855-1865.

- [13] 许璐,周春海,刘梅,等.石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复[J].环境科学,2022,43(6):3299-3307. XU L, ZHOU C H, LIU M, et al. Utilization and remediation of heavily cadmium-contaminated agricultural soils by two crop rotation patterns after lime and sepiolite passivation[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3299-3307.
- [14] 邱子健,申卫收,林先贵.化肥减量增效技术及其农学、生态环境效应[J].中国土壤与肥料,2022(4):237-248. QIU Z J, SHEN W S, LIN X G. Chemical fertilizer reduction technology and its agronomic and ecological environment effects[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4):237-248.
- [15] 曹巧滢,詹曜玮,丁尔全,等.分次施用碱性肥料对土壤pH及土壤镉有效性的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(7):1483-1489. CAO Q Y, ZHAN Y W, DING E Q, et al. Influences of alkaline fertilizer application on soil pH and soil available cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7):1483-1489.
- [16] 熊娟,王依涵,陈畅,等.伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展[J].农业环境科学学报,2022,41(3):441-454. XIONG J, WANG Y H, CHEN C, et al. Research progress on the remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium-contaminated farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3):441-454.
- [17] 庄重,王琦琪,米子冬,等.含磷肥料在土壤-植物系统中修复重金属污染的作用[J].磷肥与复肥,2020,35(7):16-20. ZHUANG Z, WANG Q Q, MI Z D, et al. Effect of fertilizers containing phosphorus on the remediation of heavy metals contamination in soil-plant system [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2020, 35(7):16-20.
- [18] WISZNIEWSKA A, HANUS-FAJERSK E, MUSZYNSKA E A, et al. Natural organic amendments for improved phytoremediation of polluted soils: A review of recent progress[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(1):1-12.
- [19] HUSSAIN B, ASHRAF M N, RAHMAN S U, et al. Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754:142188.
- [20] ELFSTRAND S, BATH B, MARTESSON A. Influence of various forms of green manure amendment on soil microbial community composition, enzyme activity and nutrient levels in leek[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(1):70-82.
- [21] 田汝响,和苗苗,郑夏萍.稻田土壤中氮-铁循环耦合体系研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2022,21(1):72-81. TIAN R X, HE M M, ZHENG X P. The Research on the coupling system of Fe-N cycling in paddy soils: A review[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2022, 21(1):72-81.
- [22] WANG G, ZHOU L. Erratum to: Application of green manure and pig manure to Cd-contaminated paddy soil increases the risk of Cd uptake by rice and Cd downward migration into groundwater: Field micro-plot trials[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2017, 228(4):1.
- [23] 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. HUANG W, ZHUANG R H, LIU H, et al. Recent advances of the current situation and remediation methods of cadmium contamination in paddy soil [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, 45(1):49-56.
- [24] 姚澄,周天宇,易超,等.施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(9):1955-1965. YAO C, ZHOU T Y, YI C, et al. Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9):1955-1965.
- [25] 张朝阳,彭平安,宋建中,等.改进BCR法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J].生态环境学报,2012,21(11):1881-1884. ZHANG C Y, PENG P A, SONG J Z, et al. Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11):1881-1884.
- [26] 曾昭霞,刘孝利,曾馥平,等.灌溉水净化耦合稻田土壤阻控措施对稻米Cd的累积减低效果[J].生态学杂志,2022,41(3):495-502. ZENG Z X, LIU X L, ZENG F P, et al. Effects of irrigation water purification coupling with paddy soil Cd resistance measures on the reduction of Cd accumulation in rice[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3):495-502.
- [27] 黄占斌,赵鹏,王颖南,等.土壤重金属固化稳定化材料研发及其应用基础研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(3):435-445. HUANG Z B, ZHAO P, WANG Y N, et al. Progress in basic research & development and its application on solidification and stabilization materials of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3):435-445.
- [28] SHI G L, LI D J, WANG Y F, et al. Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667:532-539.
- [29] CHAO D Y, PATRYCJA B, JOHN D, et al. Variation in sulfur and selenium accumulation is controlled by naturally occurring isoforms of the key sulfur assimilation enzyme ADENOSINE 5'-PHOSPHOSULFATE REDUCTASE2 across the arabidopsis species range[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166:1593-1608.
- [30] 杨滨娟,黄国勤.植物种植修复土壤重金属污染的模式、技术与效果综述[J].生态科学,2022,41(4):251-256. YANG B J, HUANG G Q. Review on model, technology and effect of phytoremediation technology on remediation of heavy metal pollution[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(4):251-256.
- [31] 曹俊,向斌,高焕方,等.磷酸盐稳定化处理铅污染土壤及铅的形态分析[J].环境工程学报,2016,10(10):6015-6020. CAO J, XIANG B, GAO H F, et al. Stabilization of lead contaminated soil with phosphate and the distribution of Pb speciation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10):6015-6020.
- [32] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224:622-630.
- [33] ZHANG X, ZHANG R, GAO J, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104:208-217.

- [34] MOHAMED I, AHAMADOU B, LI M, et al. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6):973-982.
- [35] WANG G, ZHOU L. Application of green manure and pig manure to Cd contaminated paddy soil increases the risk of Cd uptake by rice and Cd downward migration into groundwater: Field micro-plot trials [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(1):1-15.
- [36] 张燕,王宏航,黄奇娜,等. 施肥调控水稻镉污染的研究与应用进展 [J]. *中国稻米*, 2022, 28(4):6-11, 18. ZHANG Y, WANG H H, HUANG Q N, et al. Advances in research and application of fertilization related to cadmium contamination in rice[J]. *China Rice*, 2022, 28(4):6-11, 18.
- [37] QIU Q, WANG Y, YANG Z, et al. Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars differing in cadmium accumulation[J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2011, 49(9):2260-2267.
- [38] WANG Y M, CHEN T C, YE H K J, et al. Stabilization of an elevated heavy metal contaminated site[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 88(1):63-74.
- [39] 刘源鑫,李维庭,孙向阳,等. 园林废弃物堆肥对铅镉污染土壤的修复效果[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4):802-810. LIU Y X, LI W T, SUN X Y, et al. Pb and Cd-polluted soil remediation effects by green waste compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4):802-810.
- [40] YIN B, ZHOU L, YIN B, et al. Effects of organic amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and uptake of heavy metals in contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2):537-546.
- [41] 杨京民,梁新然,姜娜,等. 组配/改性材料对镉铜复合污染土壤的钝化修复[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(2):285-294. YANG J M, LIANG X R, JIANG N, et al. Passivation and remediation of cadmium and arsenic pollution in soil using composite/modified materials [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(2):285-294.
- [42] 张新帅,张红宇,黄凯,等. 石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3):481-491. ZHANG X S, ZHANG H Y, HUANG K, et al. Beneficial effects of lime and biochar application on farmland soil polluted by mine wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3):481-491.
- [43] 鲍广灵,陶荣浩,张慧敏,等. 硫铁矿污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12):2693-2703. BAO G L, TAO R H, ZHANG H M, et al. Screening of castor beans with high cadmium and lead enrichment from contaminated soils in a pyrite mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12):2693-2703.
- [44] 肖坤,田小辉,蒋珍茂,等. 镉钝化剂筛选及其对中微量元素有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(1):55-65. XIAO K, TIAN X H, JIANG Z M, et al. Screening of cadmium passivator and its effect on the availability of medium and trace elements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1):55-65.
- [45] ZHANG S Y, DENG Y, FU S D, et al. Reduction mechanism of Cd accumulation in rice grain by Chinese milk vetch residue: Insight into microbial community[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202:110908.
- [46] 吴春发,关浩然,张锦路,等. 含磷钝化剂对镉污染农田土壤酶活性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(2):361-368. WU C F, GUAN H R, ZHANG J L, et al. Effects of phosphorus-containing passivators on enzyme activity in cadmium-contaminated agricultural soils[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(2):361-368.
- [47] STARK C, CONDRON L M, STEWART A, et al. Influence of organic and mineral amendments on microbial soil properties and processes [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1):79-93.
- [48] 莫思琪,曹旖旎,谭倩. 根系分泌物在重金属污染土壤生态修复中的作用机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(2):382-392. MO S Q, CAO Y N, TAN Q. Research progress on root exudates and their effects on ecological remediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(2):382-392.

(责任编辑:叶飞)