

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

引用本文:

喻成龙, 汤建, 郑琴, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2554–2560.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0759>

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>

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>

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>

不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响

刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 杨林章, 薛利红

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1395–1405 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1674>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

喻成龙, 汤建, 郑琴, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2554–2560.

YU Cheng-long, TANG Jian, ZHENG Qin, et al. Effects of biochar-based fertilizers on the migration and accumulation of Cd in rice under incorporation of *Astragalus sinicus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2554–2560.



开放科学 OSID

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¹, 汤建¹, 郑琴³, 倪国荣¹, 谢志坚¹, 荣勤雷¹, 郭乃嘉⁴, 王惠明^{4*}, 周春火^{1,2*}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院/江西省农业废弃物资源化利用与面源污染防控产教融合重点创新中心, 南昌 330045; 2. 南昌市农业农田养分资源管理与农业面源污染防控重点实验室, 南昌 330045; 3. 万年县农业农村局, 江西 万年 336100; 4. 江西省农业生态与资源保护站, 南昌 330046)

摘要:为探究翻压紫云英条件下, 生物炭基肥配施量对水稻生长发育和水稻各器官 Cd 迁移累积的影响。通过盆栽试验, 设置 5 个处理: 紫云英替代 30% 的氮肥+70% 氮肥 (FNG30, 对照)、30% 紫云英+10% 生物炭基肥+60% 氮肥 (FNG30B10)、30% 紫云英+20% 生物炭基肥+50% 氮肥 (FNG30B20)、30% 紫云英+30% 生物炭基肥+40% 氮肥 (FNG30B30)、30% 紫云英+40% 生物炭基肥+30% 氮肥 (FNG30B40), 研究不同生物炭基肥配施量对早稻生长发育和水稻 Cd 迁移累积的影响。结果表明: 与对照相比, 生物炭基肥配施处理均能提高水稻籽粒的产量, 且水稻籽粒产量随生物炭基肥配施量的增加而提高; 生物炭基肥的配施可降低水稻糙米中的 Cd 含量, 与对照相比, 生物炭基肥配施后各处理降幅大小为 FNG30B30 (29.2%) > FNG30B20 (20.8%) > FNG30B40 (19.6%) > FNG30B10 (8.3%); 生物炭基肥可抑制 Cd 从水稻根向地上部位的转运, 在 30% 的生物炭基肥配施处理时抑制效果最为明显, 且 Cd 从谷壳到糙米的转运能力最低。综上, 在翻压紫云英条件下, 配施生物炭基肥能有效降低水稻 Cd 污染风险, 且 30% 的生物炭基肥配施量时降低稻田 Cd 污染风险效果最佳。

关键词:水稻; 紫云英; 生物炭基肥; Cd 污染

中图分类号: X53; X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)11-2554-07 doi:10.11654/jaes.2020-0759

Effects of biochar-based fertilizers on the migration and accumulation of Cd in rice under incorporation of *Astragalus sinicus*

YU Cheng-long¹, TANG Jian¹, ZHENG Qin³, NI Guo-rong¹, XIE Zhi-jian¹, RONG Qin-lei¹, GUO Nai-jia⁴, WANG Hui-ming^{4*}, ZHOU Chun-huo^{1,2*}

(1. School of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University/Innovative Integration Center of Industry and Education in Resource Utilization of Agricultural Waste, Prevention and Control of Non-point Pollution of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China; 2. Key Laboratory of Nutrient Management of Farmland and Prevention of Agricultural NPS Pollution, Nanchang 330045, China; 3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of the Wannian County, Wannian 336100, China; 4. Jiangxi Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Nanchang 330046, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of different dosages of biochar-based fertilizers on the growth and development of

收稿日期: 2020-07-06 录用日期: 2020-09-10

作者简介: 喻成龙 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤重金属污染修复和环境功能材料的研发。E-mail: chenglongyu888@163.com

*通信作者: 周春火 E-mail: zchh3366@163.com; 王惠明 E-mail: 923234200@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200808); 江西省重大科技研发专项 (20194ABC28010); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ170300, GJJ170265)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0200808); The Key R&D Program of Jiangxi Province (20194ABC28010); Research Project of Jiangxi Provincial Education Department (GJJ170300, GJJ170265)

early season rice and the migration and accumulation of Cd in various rice organs under the incorporation of *Astragalus sinicus*. Five treatments were set up through pot experiments: control[*A. sinicus* in lieu of 30% nitrogen fertilizer + 70% nitrogen (FNG30)], 30% *A. sinicus* + 10% biochar-based fertilizers + 60% nitrogen (FNG30B10), 30% *A. sinicus* + 20% biochar-based fertilizers + 50% nitrogen (FNG30B20), 30% *A. sinicus* + 30% biochar-based fertilizers + 40% nitrogen (FNG30B30), and 30% *A. sinicus* + 40% biochar-based fertilizers + 30% nitrogen (FNG30B40). The results showed that compared with the control group, different dosages of biochar-based fertilizers could increase yield in rice grains. The yield in rice grains improved with the increase in the dosage of biochar-based fertilizers. The application of biochar-based fertilizers could reduce the Cd content in brown rice, compared to that in the control group; the decrease with each treatment application of biochar-based fertilizers was: FNG30B30 (29.2%) > FNG30B20 (20.8%) > FNG30B40 (19.6%) > FNG30B10 (8.3%). Biochar-based fertilizers could inhibit the transport of Cd from rice root to above ground parts, and the inhibition effect was most evident when the dosage of biochar fertilizers was 30%. At this point, the ability to transport Cd from rice husk to brown rice was also the lowest. To summarize, with the incorporation of *A. sinicus*, the application of biochar-based fertilizers can effectively reduce the risk of Cd pollution in the rice field. In addition, when the dosage of biochar-based fertilizers is 30%, the treatment effect on Cd pollution in the rice field is the best.

Keywords: rice; *Astragalus sinicus*; biochar-based fertilizers; Cd pollution

水稻土是我国主要的耕作土壤类型之一,随着经济和现代工业化的发展,稻田土壤污染日益加剧。稻田土壤重金属镉(Cd)是威胁人类健康的主要污染物之一,近年来由于Cd污染引起的稻米安全问题常有报道,因其对人体健康产生严重威胁,已经引起了国内外科研工作者对稻田Cd污染问题的极大关注^[1-3]。

农业生产中,施肥是提高作物产量、保证作物正常生长发育的重要措施,大量研究表明土壤重金属含量和活性会由于施肥产生一定程度的改变^[4-5]。谢杰等^[6]研究发现在22.5 t·hm⁻²的紫云英翻压施用下不同深度稻田土壤的有机质含量显著提高,且各土层中具有生物活性的Cd形态占总Cd的比例明显升高;倪幸等^[7]研究发现,以紫云英等有机物料作活化剂,可有效提高土壤中重金属生物有效性;而杨滨娟等^[8]研究表明,30%紫云英翻压配施100%氮肥处理能降低土壤中Cd含量。因此,目前学界对于紫云英翻压条件下,肥料的配施如何影响土壤重金属含量和活性仍然没有明确结论。

生物炭是近年来研发出的一种治理重金属污染的新型材料,具有较大的比表面积、较强的吸附能力等特性^[9-10]。但由于生物炭本身并不具备足够的养分,不能较好地促进作物生长。因此,将生物炭与肥料进行有机结合制成的生物炭基肥就成为在重金属污染土壤上种植作物的理想选择。使用生物炭基肥代替部分化肥,不仅可减施化肥,且在降低重金属污染风险方面具一定优势。魏张东^[11]研究发现生物炭基肥表面富含的活性官能团(硅氧基、烷氧基、氨基、胺基、羧基等)能与Cd发生络合反应,使生物炭基肥

对土壤中Cd起到稳定化作用。Zhao等^[12]将P肥与生物物质/炭(锯末和柳枝)进行混合后热解制成生物炭复合材料,研究表明,与单一生物炭相比,该含磷生物炭复合材料在养分的慢速释放及对土壤重金属稳定方面有明显作用。以上研究表明炭基肥料对土壤中重金属有明显的钝化作用,但目前关于翻压紫云英条件下,探究生物炭基肥对稻田土壤重金属影响的研究仍鲜有报道,且生物炭基肥用于重金属污染土壤治理的最佳施用量有待进一步研究。

因此,本文采用盆栽试验,在重金属Cd污染土壤上种植水稻,以生物炭基肥配施量作为不同试验处理,研究翻压紫云英条件下生物炭基肥配施量对水稻生长发育、水稻各器官Cd含量及Cd迁移转运的影响,以期找到翻压紫云英条件下生物炭基肥修复重金属污染稻田的最佳施用量,为重金属污染稻田安全高效生产提供一定的科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻为早稻品种荣优华占,紫云英品种为余江大叶(鲜质量0.08 kg·pot⁻¹);化肥分别是尿素、钙镁磷肥和氯化钾。试验中所用生物炭基肥购自辽宁金和福农业科技股份有限公司(总养分:N:P₂O₅:K₂O=24:8:10,以玉米秸秆为原料采用限氧裂解法制备混合而成,生物炭基肥中Cd含量未检出)。供试土壤为江西农大化工厂周边Cd污染稻田土壤。供试土壤理化性质为:土壤pH为5.46,有机质含量为15.09 g·kg⁻¹,碱解N含量为66.74 g·kg⁻¹,有效P含量为22.59 g·kg⁻¹,

速效K含量为197.80 g·kg⁻¹,总Cd含量为2.41 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验以翻压紫云英条件下不同生物炭基肥添加量为处理,共设置不添加生物炭基肥、添加量10%、20%、30%和40% 5个水平,具体处理设置见表1。所有处理施肥量相等。所有肥料均分3次施入,其中基肥、分蘖肥、穗肥分别占总肥料的40%、30%和30%。将10 kg风干过筛后的土壤装入直径30 cm、高40 cm的橡胶桶中,移栽长势相同的30 d苗龄的水稻秧苗,每桶2株,每个处理3次重复。所有盆栽试验于2019年4月在江西农业大学生态科技园进行,水稻整个生育期过程保持约3 cm的淹水状态。

表1 各组试验处理

Table 1 Treatment of each group

处理编号 Numbers of treatments	施肥处理 Fertilization treatments
FNG30(对照)	30% 紫云英(紫云英替代30%的氮肥,下同)+70% 氮肥
FNG30B10	30% 紫云英+10% 生物炭基肥+60% 氮肥
FNG30B20	30% 紫云英+20% 生物炭基肥+50% 氮肥
FNG30B30	30% 紫云英+30% 生物炭基肥+40% 氮肥
FNG30B40	30% 紫云英+40% 生物炭基肥+30% 氮肥

1.3 样品采集及测定方法

水稻成熟后收获样品,将水稻分为根、秸秆和籽粒3部分,洗涤、杀青1 h后,80℃烘干至恒质量,然后使用天平测定植株各部位的干质量。水稻谷壳和糙米分开磨碎,根和秸秆使用植株粉碎机粉碎,过100目筛用于测定各器官的重金属Cd含量。

土壤pH值使用风干土以pH计(雷磁pHS-3C)测定。土壤碱解N、有效P、速效K和有机质分别采用碱解扩散法、Olsen法、火焰光度计法和重铬酸钾容量法-外加法进行测定^[13]。水稻生物量用分析天平[TLE,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]称量测定。土壤有效态Cd含量采用5 mmol·L⁻¹的DTPA浸提剂提取。土壤采用三酸消解法进行消解备用^[14],植株的消解参照Xu等^[15]的方法使用硝酸-微波消解法,分别使用原子吸收分光光度计(上海光谱仪器有限公司SP-3530和SP-3500GA)进行测定。

采用转运系数(Translocation factor,TF)来研究水稻前一部位向后一部位的转运Cd的能力。计算公式^[16]为:

$$TF=C_a/C_b$$

式中: C_a 为水稻后一部位(分别对应为秸秆、谷壳、糙米)

中重金属Cd含量,mg·kg⁻¹; C_b 为水稻前一部位(分别对应为根系、秸秆、谷壳)中重金属Cd含量,mg·kg⁻¹。

1.4 统计分析

所有数据利用SPSS软件进行单因素ANOVA分析和显著性分析($P<0.05$),利用Origin 2019软件进行绘图。

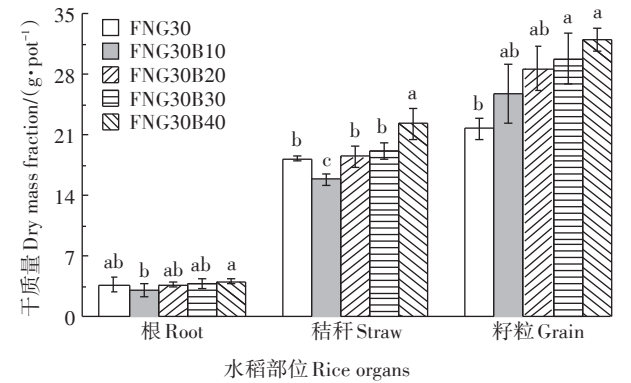
2 结果与分析

2.1 生物炭基肥配施量对水稻各部位干质量的影响

由图1可以看出,紫云英替代30%氮肥的条件下,配施40%的生物炭基肥处理水稻各部位干质量在所有处理中均为最高。对于根干质量而言,FNG30B40处理显著($P<0.05$)高于FNG30B10处理,提高了33.3%;而水稻秸秆干质量随着生物炭基肥配施量的增加而增加,且FNG30B40处理显著($P<0.05$)高于其他处理,较FNG30、FNG30B10、FNG30B20和FNG30B30处理分别提高了22.1%、40.1%、20.6%和16.6%;对于水稻籽粒来说,配施生物炭基肥均能提高水稻籽粒产量,且随着配施量的增加,籽粒产量逐渐提高。FNG30B30和FNG30B40处理显著($P<0.05$)高于FNG30处理,分别提高了47.0%和37.2%。表明在30%紫云英还田量的条件下,配施生物炭基肥能明显提高水稻产量,且随着生物炭基肥用量的提高,水稻产量也明显提高。

2.2 生物炭基肥配施量对水稻各部位Cd含量的影响

由图2可知,水稻各器官Cd含量的分布为根>秸秆>谷壳>籽粒。紫云英还田条件下生物炭基肥配施量对水稻各部位Cd含量有较为明显的影响。在加



同一水稻部位不同字母表示各处理间在5%水平差异显著。下同
Different letters in the same rice organ mean significant difference at 0.05 level using Duncan's test. The same below

图1 生物炭基肥配施量对水稻各部位干质量的影响
Figure 1 Effects of different biochar-based fertilizer dosages on dry quality of different rice organs

入生物炭基肥后,FNG30B20处理的水稻根部Cd含量较对照显著($P<0.05$)提高,FNG30B10、FNG30B30和FNG30B40处理与对照相比均无显著差异,但Cd含量略有增加。对于水稻秸秆,加入生物炭基肥后除FNG30B20处理高于对照,其他处理均低于对照,且在FNG30B30和FNG30B40处理时达到显著水平($P<0.05$),FNG30B10、FNG30B20处理较对照无显著差异,FNG30B10、FNG30B30和FNG30B40分别降低了3.7%、12.3%和11.1%。加入生物炭基肥后的处理均降低了水稻谷壳和糙米中的Cd含量,对于谷壳来说,4个处理中Cd含量较对照分别降低了12.5%、17.5%、5%和17.5%,与对照相比,FNG30B10和FNG30B30处理的谷壳Cd含量无显著差异,而FNG30B20和FNG30B40处理的谷壳Cd含量显著($P<0.05$)降低。对于糙米来说,FNG30B10、FNG30B20、FNG30B30、FNG30B40 4个处理相比于对照处理分别降低了8.3%、20.8%、29.2%和19.6%,其中FNG30B10、FNG30B20和FNG30B40处理较对照无显著差异,但FNG30B30处理显著($P<0.05$)低于对照,重金属降低效果最好。在30%的生物炭基肥配施处理时,糙米中重金属含量为 $0.167\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。说明生物炭基肥能有效降低水稻籽粒中重金属Cd的含量,且在生物炭基肥配施量为30%时降低效果最好。

2.3 生物炭基肥配施量对水稻重金属转运系数的影响

从表2中可以看出,不同生物炭基肥配施量处理的水稻根部向地上部位转移能力有所不同。所有处理根部到地上部位的转运系数 $TF_{\text{地上部位/根}}$ 均大于1.0,且

在配施生物炭基肥后均低于未配施生物炭基肥的处理,其中FNG30B30处理显著($P<0.05$)低于对照处理,降低了17.6%,FNG30B10、FNG30B20和FNG30B40处理分别降低了10.8%、13.4%和15.0%,说明在施加生物炭基肥后能抑制重金属Cd向水稻地上部位的转运,且在30%生物炭基肥配施处理时抑制效果最佳。

重金属Cd由根到秸秆的转运系数($TF_{\text{秸秆/根}}$)均接近1.0,说明Cd从根到秸秆的转运能力较强,且从表2中可以看出,施加生物炭基肥后,转运系数 $TF_{\text{秸秆/根}}$ 较对照处理均无显著下降,4个处理分别降低了8.3%、4.6%、16.6%和12.2%。从重金属Cd由秸秆至谷壳的转运系数($TF_{\text{谷壳/秸秆}}$)看出,5个处理的转运系数 $TF_{\text{谷壳/秸秆}}$ 为0.398~0.542,说明重金属Cd从秸秆到谷壳的转运能力较其他转运过程弱,除FNG30B30处理外,FNG30B10、FNG30B20和FNG30B40均低于对照处理,分别降低了8.0%、18.3%和6.4%。对于重金属Cd从谷壳到糙米的转运系数($TF_{\text{糙米/谷壳}}$),FNG30B20、FNG30B30和FNG30B40处理较对照处理都有所降低,在FNG30B30处理时降低幅度最大,为29.8%,说明一定量的生物炭基肥配施能够减少水稻中Cd向糙米的转运。

2.4 水稻各器官间重金属含量与转运系数的关系

由表3可知,水稻根中重金属含量与水稻各部位重金属的转运系数均无显著的线性相关关系。秸秆中重金属含量与根到秸秆的转运系数 $TF_{\text{秸秆/根}}$ 存在极显著的正线性相关关系($P<0.01$),与秸秆到谷壳的转运系数 $TF_{\text{谷壳/秸秆}}$ 存在显著的负线性相关关系($P<0.05$),这说明水稻秸秆中Cd的积累与根对Cd的转运能力呈正相关,与茎对Cd的转运能力呈负相关;谷壳中重金属含量与谷壳到糙米的转运系数 $TF_{\text{糙米/谷壳}}$ 存

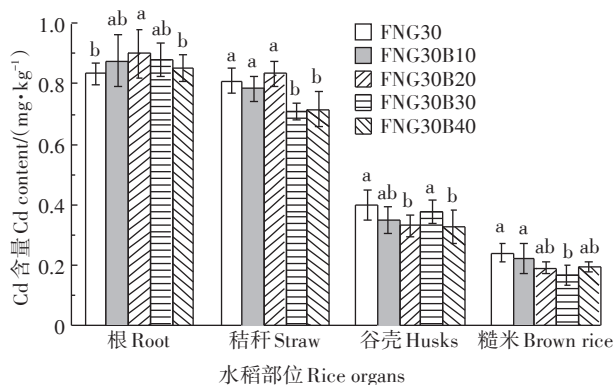


图2 生物炭基肥配施量对水稻各部位Cd含量的影响

Figure 2 Effects of biochar-based fertilizers dosage on Cd content in different rice organs

表2 不同生物炭基肥配施量下水稻各器官间Cd的转运系数

Table 2 Translocation factor of heavy metal in different rice organs of different biochar-based fertilizer dosages

处理 Treatments	地上部位/根 The aboveground part/Root	秸秆/根 Straw/Root	谷壳/秸秆 Husks/Straw	糙米/谷壳 Brown rice/Husks
FNG30	1.737a	0.972a	0.487ab	0.627a
FNG30B10	1.549ab	0.891a	0.448ab	0.633a
FNG30B20	1.504ab	0.927a	0.398b	0.584a
FNG30B30	1.431b	0.811a	0.542a	0.440a
FNG30B40	1.476ab	0.853a	0.456ab	0.601a

注:同一水稻部位不同字母表示各处理间在5%水平差异显著。

Note: Different letters in the same rice organ mean significant difference at 0.05 level using Duncan's test.

表3 水稻各器官间Cd含量与TF的关系

Table 3 Correlations between translocation factors and concentrations of Cd in rice tissues

Cd转运系数 Translocation factors of Cd	根中Cd含量 Content of Cd in root	秸秆中Cd含量 Content of Cd in straw	谷壳中Cd含量 Content of Cd in husks	糙米中Cd含量 Content of Cd in brown rice
$TF_{\text{秸秆/根}}$	-0.312	0.750**	0.264	0.227
$TF_{\text{谷壳/秸秆}}$	-0.235	-0.606*	0.422	-0.201
$TF_{\text{糙米/谷壳}}$	-0.041	0.181	-0.587*	0.712**

注: *和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平, $n=15$, $r_{0.05}=0.514$, $r_{0.01}=0.641$ 。
Note: * significant at $P<0.05$, ** significant at $P<0.01$, $n=15$, $r_{0.05}=0.514$, $r_{0.01}=0.641$.

在显著的负线性相关关系($P<0.05$);糙米中重金属含量与谷壳到糙米的转运系数 $TF_{\text{糙米/谷壳}}$ 存在极显著的正线性相关关系($P<0.01$),这表明谷壳转运Cd到糙米的能力是影响糙米中Cd积累的关键。

2.5 生物炭基肥配施量对Cd有效态含量及其在水稻中分配的影响

由图3可知,在10%的生物炭基肥配施处理时,土壤中Cd的有效态含量没有明显变化,说明少量生物炭基肥的施入对土壤Cd的有效态含量影响不大。而随着生物炭基肥施入量增加,土壤Cd有效态含量均有所降低,在30%生物炭基肥配施量时下降幅度最大,降幅为15.1%。这表明一定量的生物炭基肥的施用能降低土壤中Cd的有效态含量,且在30%的生物炭基肥配施时土壤Cd有效态含量降低效果最佳。

从图4可以看出,配施生物炭基肥会增加重金属Cd在水稻根部的分配,但不同生物炭基肥配施量对Cd在根部积累的影响不同,在FNG30B30处理时最高。对于秸秆而言,在30%生物炭基肥配施处理时秸秆Cd在植株中占比最低,较对照处理下降了7.3%,这表明30%生物炭基肥配施处理能够抑制Cd从根部向秸秆中的迁移。在添加生物炭基肥后,所有

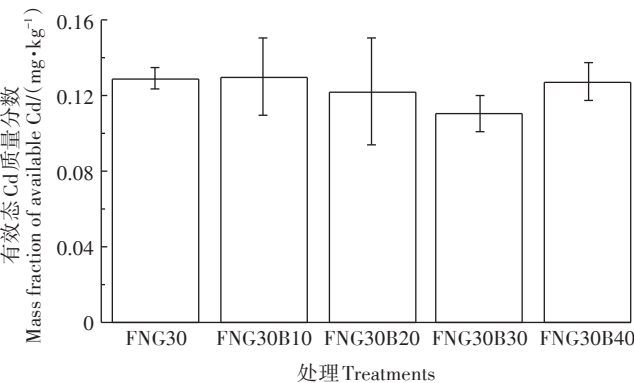


图3 不同生物炭基肥配施量处理下土壤有效态Cd质量分数
Figure 3 Mass fraction of available Cd of different biochar-based fertilizers dosage

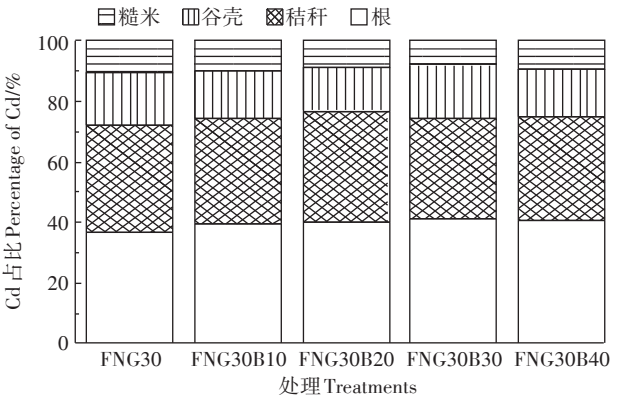


图4 生物炭基肥配施量对Cd在水稻中分配比的影响
Figure 4 Effects of biochar-based fertilizers dosage on Cd distribution ratio in rice

处理的糙米中Cd的百分比含量均有降低,在30%生物炭基肥配施处理时降幅最大,为34.6%。表明生物炭基肥的施用能够提高水稻根系Cd的积累,减少水稻糙米中Cd所占的百分比,且在30%生物炭基肥配施量时降低效果最好。

3 讨论

本文研究发现种植水稻时施用生物炭基肥能明显提高水稻产量,且随着生物炭基肥施用量的增加,水稻产量提高,这与刘善良等^[17]所得出的结论一致。水稻产量提高可能与生物炭基肥的肥料缓释效应存在一定关联,水稻能持续吸收利用养分,稳定提高产量。

同时本文在翻压紫云英条件下,通过不同量生物炭基肥与化肥配施研究重金属Cd在土壤-水稻系统中的迁移积累规律,结果表明:生物炭基肥的施用会提高水稻根部的Cd含量,促进土壤中Cd向水稻根部的迁移。刘冲^[18]研究表明,在桉树炭和钙镁磷肥一定比例的混施下,油菜菜地下部的富集系数 BCR_{Root} 较对照有所提高,这与本文研究结论类似。与对照相比,不同量生物炭基肥配施均可降低水稻谷壳和糙米中

的Cd含量,表明生物炭基肥能有效降低水稻籽粒中重金属Cd的含量,减少Cd污染的风险。这可能与生物炭的高pH值、疏松多孔、比表面积大、容重小等特性有关,且生物炭表面具有丰富的官能团能增加阳离子吸附位点,从而易与重金属发生吸附、络合等反应^[19-21]。不同生物炭基肥配施量对水稻糙米重金属吸收量影响不同,在生物炭基肥配施量为30%时,水稻糙米中Cd含量最低。汪玉瑛等^[22]研究发现,羊栖菜炭添加量对土壤Cd形态变化有较为明显的影响,Cd的交换态含量在羊栖菜炭2%的施用量时降幅最大,杜胜南^[23]也发现添加 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭比 $4.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭更能降低土壤可交换态重金属Cd含量。结合本研究的结果可以得出在施用生物炭或者生物炭基肥降低土壤重金属污染时,并不一定是施加量越多土壤修复效果越好,最适宜的施加量可能与土壤理化性质、生物炭种类等因素有关。施用生物炭基肥后,水稻Cd从根部向地上部的转运系数 $TF_{\text{地上部位/根}}$ 较对照均有降低,其中在30%生物炭基肥配施处理时降幅最大,且达到显著水平,说明在施加生物炭基肥后能抑制重金属Cd向水稻地上部位的转运。重金属Cd由根到秸秆的转运系数 $TF_{\text{秸秆/根}}$ 均接近1.0,且大于 $TF_{\text{谷壳/秸秆}}$ 和 $TF_{\text{糙米/谷壳}}$,说明Cd从根到秸秆的转运能力强于秸秆到其他器官,这与沈浩然^[24]的研究结论基本一致。水稻从秸秆到谷壳的转运系数大小规律为 $\text{FNG30B30}(0.542) > \text{FNG30}(0.487) > \text{FNG30B40}(0.456) > \text{FNG30B10}(0.448) > \text{FNG30B20}(0.398)$,在30%生物炭基肥配施处理时,水稻中Cd从秸秆到谷壳的转运系数最高,这可能是因为30%生物炭基肥配施处理下,Cd从根到秸秆的转运系数 $TF_{\text{秸秆/根}}$ 在所有处理中最低,导致秸秆内Cd含量较低,在叶片解毒机制作用下,水稻叶片中的Cd重新活化后转运到穗颈韧皮部,因此在成熟阶段水稻谷壳中Cd又得到充分积累^[25], $TF_{\text{谷壳/秸秆}}$ 相应提高。

综上,紫云英翻压条件下生物炭基肥与化肥配施不仅能提高水稻籽粒的产量,减少化肥的施用,同时在Cd污染土壤中能有效抑制水稻籽粒对重金属Cd的吸收。该施肥方案为重金属污染稻田安全高效生产提供了一定的科学依据和参考价值。

4 结论

(1)紫云英翻压条件下,与无生物炭基肥配施处理(对照)相比,不同生物炭基肥配施量处理均能提高水稻籽粒的产量,且水稻籽粒产量随生物炭基肥配施

量的增加而提高。

(2)生物炭基肥配施处理均可降低水稻谷壳和糙米中的Cd含量,不同生物炭基肥配施量对水稻糙米Cd累积量有较大影响,在生物炭基肥配施量为30%时,水稻糙米中Cd含量最低。

(3)适量生物炭基肥的施用能降低水稻Cd从根部向地上部的转运系数及土壤中重金属Cd的有效态,在30%生物炭基肥配施处理时降幅最为明显,且水稻中Cd从谷壳到糙米的转运能力最小。

(4)“紫云英+化肥+生物炭基肥”施肥方案能在提高水稻籽粒产量的同时有效抑制水稻对Cd的迁移积累,该施肥方案可为Cd污染稻田安全生产提供一定参考和科学依据。

参考文献:

- [1] 张佳, 杨文戮, 廖柏寒, 等. 有机肥对酸性稻田土壤Cd赋存形态的影响途径和机制[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 365-370.
ZHANG Jia, YANG Wen-tao, LIAO Bo-han, et al. Mechanisms and influence approaches of organic fertilizer on occurrence mode of Cd in acid paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 365-370.
- [2] Zhang B Q, Liu X S, Feng S J, et al. Developing a cadmium resistant rice genotype with OsHIPP29 locus for limiting cadmium accumulation in the paddy crop[J]. *Chemosphere*, 2020, 247.
- [3] Lv H Q, Chen W X, Zhu Y M, et al. Efficiency and risks of selenite combined with different water conditions in reducing uptake of arsenic and cadmium in paddy rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262.
- [4] 黄文粤. 碳酸盐岩地区不同有机-无机肥配比对土壤重金属Cd活性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
HUANG Wen-yue. Effects of different ratios of organic to inorganic fertilizers on Cd activity of soil heavy metals in carbonate rock area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [5] Muhammad Q, Liu Y R, Huang J, et al. Soil nutrients and heavy metal availability under long-term combined application of swine manure and synthetic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soils Sediments*, 2020, 20(4): 1-14.
- [6] 谢杰, 董爱琴, 徐昌旭, 等. 紫云英长期还田对稻田土壤Cd含量与形态的影响[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(12): 2084-2094.
XIE Jie, DONG Ai-qin, XU Chang-xu, et al. Impact of long-term returning of *Astragalus sinicus* on content and forms of Cd in different depths of paddy soils[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(12): 2084-2094.
- [7] 倪幸, 李雅倩, 白珊, 等. 活化剂联合柳树对重金属Cd污染土壤的修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 365-371.
NI Xing, LI Ya-qian, BAI Shan, et al. Remediation effects of activating agents combined with willow on the heavy metal Cd contaminated soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 365-371.
- [8] 杨滨娟, 黄国勤, 吴龙华, 等. 施氮和冬种绿肥对稻田土壤重金属含

- 量、微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(3): 1-10.
- YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, WU Long-hua, et al. Effects of nitrogen application and winter green manure on soil heavy metal content, soil microorganism and enzyme activities in paddy field[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3): 1-10.
- [9] Trakal L, Bingöl D, Pohořelý M, et al. Geochemical and spectroscopic investigations of Cd and Pb sorption mechanisms on contrasting biochars: Engineering implications[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171.
- [10] Shen Z T, Jin F, Wang F, et al. Sorption of lead by salisbury biochar produced from British broadleaf hardwood[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193.
- [11] 魏张东. 生物炭复合肥料的制备及其对农田土壤镉污染修复效应[D]. 开封: 河南大学, 2019.
- WEI Zhang-dong. Preparation of hang biocharcoal-based composite fertilizer and its remediation effect on Cd pollution in farmland soil [D]. Kaifeng: Henan University, 2019.
- [12] Zhao L, Cao X D, Zheng W, et al. Copyrolysis of biomass with phosphate fertilisers to improve biochar carbon retention, slow nutrient release, and stabilize heavy metals in soil[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2016, 4: 1630-1636.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- BAO Shi-dan. Soil agriculturalization analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [14] 喻成龙, 汤建, 喻惟, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2095-2102.
- YU Cheng-long, TANG Jian, YU Wei, et al. Effects of combined chemical and biochar-based fertilizers applied on Cu absorption and transport in rice under *Astragalus sinicus* conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2095-2102.
- [15] Xu D C, Zhou P, Zhan J, et al. Assessment of trace metal bioavailability in garden soils and health risks via consumption of vegetables in the vicinity of Tongling mining area, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 90(2): 103-111.
- [16] 周航. 组配改良剂对土壤-水稻中重金属迁移累积的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- ZHOU Hang. Effects of combined amendments on heavy metal mobilization and accumulation in soil-rice systems[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [17] 刘善良, 常春丽, 蒲加军, 等. 生物炭基肥料在水稻上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2019(15): 5-6.
- LIU Shan-liang, CHANG Chun-li, PU Jia-jun, et al. Application effect of biochar-based fertilizer on rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(15): 5-6.
- [18] 刘冲. 生物炭基肥对水稻土中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的钝化效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- LIU Chong. Effect of biochar based fertilizer on remediation of Cd, Cu, Pb and Zn in paddy soils[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [19] Luo M K, Lin H, He Y H, et al. The influence of corncob-based biochar on remediation of arsenic and cadmium in yellow soil and cinnamon soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717.
- [20] Baltrėnaitė-Gedienė E, Leonavičienė T, Baltrėnas P. Comparison of Cu(II), Mn(II) and Zn(II) adsorption on biochar using diagnostic and simulation models[J]. *Chemosphere*, 2020, 245.
- [21] Imran M, Haq Khan Z U, Iqbal J, et al. Potential of siltstone and its composites with biochar and magnetite nanoparticles for the removal of cadmium from contaminated aqueous solutions: Batch and column scale studies[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259.
- [22] 汪玉瑛, 计海洋, 吕豪豪, 等. 羊栖菜生物炭对镉污染土壤性质及镉形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1132-1140.
- WANG Yu-ying, JI Hai-yang, LÜ Hao-hao, et al. Effects of biochar derived from *Sargassum fusiforme* on the properties and cadmium forms of cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1132-1140.
- [23] 杜胜南. 生物炭对土壤中镉的影响研究[J]. 农业科技与装备, 2013(1): 6-7.
- DU Sheng-nan. Research on the influence of biochar on soil cadmium [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2013(1): 6-7.
- [24] 沈浩然. 稻麦轮作体系下不同钝化材料对土壤镉砷复合污染修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- SHEN Hao-ran. Remediation of agricultural soils polluted by Cd and As using different amendments under rice-wheat rotation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [25] Rodda M, Li G, Reid R. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: The relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347: 105-114.