

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.

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¹, 汤建¹, 喻惟⁴, 倪国荣¹, 谢志坚¹, 康丽春³, 荣勤雷¹, 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. 江西农业大学工学院, 南昌 330045; 4. 万载县农业农村局, 江西 万载 336100)

摘要:针对稻田土壤重金属 Cu 污染问题,在翻压紫云英条件下,探究化肥与生物炭基肥配施对土壤-水稻系统 Cu 吸收及转运的影响。采用盆栽试验,设置 5 个施肥处理:对照(CK, 不施肥)、常规施氮(CN)、紫云英+氮肥(CNG)、紫云英+有机肥+氮肥(CNGO)、紫云英+生物炭基肥+氮肥(CNGC)。研究了不同施肥处理对早稻五优 156 生长和重金属 Cu 吸收特性的影响。结果表明:与 CN 相比,CNG 在无污染和污染土壤中水稻籽粒产量分别提高 47.1% 和 50.1%;与 CNG 相比,CNGC 在无污染和污染土壤中水稻籽粒产量分别提高 4.5% 和 12.8%。单施化肥条件下水稻植株体中 Cu 的总吸收量最大,且水稻根部 Cu 含量最高;在污染土壤中,CNG 处理下水稻糙米存在一定的重金属污染风险,而在 CNGC 处理下糙米中 Cu 含量低于相关食品卫生标准($\leq 10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。进一步研究表明,翻压紫云英能提高 Cu 从根向秸秆的转运能力,而在污染土壤条件下 Cu 从秸秆向谷壳的转运能力会受到抑制。在污染土壤中 CN 处理下 Cu 有效态含量最高,CNGC 处理比 CN 处理土壤 Cu 有效态含量降低 39.4%,比 CK 处理降低 17.6%。研究表明,翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥可以提高水稻产量,抑制水稻对 Cu 的吸收和转运,降低水稻籽粒中 Cu 含量,适宜在重金属 Cu 污染稻田施用。

关键词:水稻;紫云英;转运;Cu;生物炭基肥

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)09-2095-08 doi:10.11654/jaes.2019-0549

Effects of combined chemical and biochar-based fertilizers applied on Cu absorption and transport in rice under *Astragalus sinicus* conditions

YU Cheng-long¹, TANG Jian¹, YU Wei⁴, NI Guo-rong¹, XIE Zhi-jian¹, KANG Li-chun³, RONG Qin-lei¹, 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. School of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 4. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of the Wanzai County, Wanzai 336100, China)

Abstract: To address Cu pollution in paddy field soils, we studied the effects of a chemical fertilizer combined with a biochar-based fertilizer on Cu absorption and transport in the soil-rice system under ploughed *Astragalus sinicus* conditions. Pot experiments were conducted with five treatment groups, including control (CK, unfertilized), conventional nitrogen fertilizer (CN), *A. sinicus* + nitrogen fertilizer (CNG),

收稿日期:2019-05-18 录用日期:2019-07-19

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

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200808);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ170300, GJJ170265);国家自然科学基金项目(51808269)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0200808); Research Project of Jiangxi Provincial Education Department(GJJ170300, GJJ170265); The National Natural Science Foundation of China(51808269)

A. sinicus + organic fertilizer + nitrogen fertilizer (CNGO), and *A. sinicus* + biochar-based fertilizer + nitrogen fertilizer (CNGC). The effects of different fertilization treatments on the growth of early-season rice, Wuyou 156, were evaluated in uncontaminated and contaminated soil, and the Cu absorption and transportation processes were examined in rice organs. The results showed that, compared with the CN treatment, the grain yield increased by 47.1% and 50.1% in uncontaminated and contaminated soil, respectively, with the CNG treatment. Compared with the CNG treatment, the CNGC treatment only increased the grain yield by 4.5% and 12.8% in uncontaminated and contaminated soil, respectively. Under the application of inorganic fertilizer, Cu concentrations were the highest in rice roots and the total absorbed Cu was also at its maximum. In contaminated soil, there was a risk of heavy metal (Cu) pollution in brown rice for the CNG treatment; however, the Cu content of brown rice for the CNGC treatment was lower than the related food hygiene standard ($10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Further results indicated that the Cu transporting capacity from root to straw was clearly enhanced under the conditions of ploughed *A. sinicus*, while the Cu transporting capacity from straw to husk was inhibited in Cu-contaminated soil. Moreover, in contaminated soil, the mass fraction of available Cu was at its maximum for the CN treatment. Compared with the CN treatment, the mass fraction of available Cu in soil for the CNGC treatment was reduced by 39.4%. Compared with the CK treatment, the mass fraction of available Cu in soil for the CNGC treatment was reduced by 17.6%. In summary, in the case of ploughed *A. sinicus*, a fertilization method that uses a biochar-based fertilizer combined with a chemical fertilizer not only increased rice yield but also inhibited rice Cu absorption and transportation processes, thus reducing the Cu content of rice grains. Thus, such a fertilization method could be applied for the improvement and remediation of Cu in contaminated rice soil.

Keywords: rice; *Astragalus sinicus*; transport; Cu; biochar-based fertilizer

21 世纪以来,土壤重金属污染已成为一个危及全球环境质量的重要问题,特别是由于采矿、冶炼、电镀等工业“三废”的排放以及农业生产中农药化肥的不合理施用等导致的农田重金属污染日趋严重^[1-2]。水稻是我国重要的粮食作物,在农业生产中具有非常重要的地位^[3]。近年来,我国稻田土壤和稻米中重金属污染问题日益严重,已经引起政府和公众的广泛关注。因此,如何在污染的稻田进行水稻安全生产已经成为目前迫切需要解决的问题。重金属由于具有难移动性、累积性及滞后性等特点而导致其易在土壤中大量积累,并通过食物链进入人体,最终严重威胁人类健康^[4-5]。

农业生产中,施肥是提高作物产量的必要措施^[6-7],但土壤重金属的含量及活性均受施肥影响较大^[8]。有研究表明,长期单施化肥可在一定程度上影响黑土、潮土和红壤的Cu含量^[9],黑土施用磷肥提高了Cu的酸提取态和氧化结合态比例,而施用有机肥增加了土壤Cu的酸提取态和有机结合态比例^[10]。王腾飞等^[11]研究表明,长期化肥和有机肥配施没有提高土壤稻田Cu污染风险。可见,不同施肥模式对土壤中Cu的积累和形态的影响不同。有研究表明绿肥具有良好的改土培肥作用,绿肥(紫云英)还田不仅能够改善土壤矿质养分状况,且可减少化肥投入和降低农业生产成本^[12]。吴浩杰等^[13]研究发现,在Cd污染稻田土壤上选用紫云英还田条件下施用化肥,既能提高水稻产量,还能降低土壤Cd活性和水稻Cd积累。而丁炳红^[14]研究表明,与单施化肥处理相比,紫云英还田

提高了稻田土壤重金属的活性。因此,翻压紫云英对降低重金属污染风险仍无明确的结论,翻压紫云英条件下土壤-水稻系统重金属迁移规律仍需深入研究。

生物炭作为一种新兴的绿色土壤改良剂,近年来受到越来越多学者的关注。其丰富的孔隙度、表面官能团、高pH值和高阳离子交换量特性使其在固定土壤中重金属^[15-16]和降低植物中重金属含量上具有重要作用^[17-19]。生物炭基肥不仅含有丰富的生物炭,还能改良酸性土壤,促使金属阳离子形成氢氧化物沉淀,且其中含有较多的可溶性硅酸盐、磷酸盐和碳酸盐可与重金属离子结合形成沉淀^[20-21]。刘冲^[22]研究也发现生物炭基肥对Cu、Cd、Pb、Zn的钝化效果强于生物炭。以上研究表明生物炭或生物炭基肥对稻田重金属含量和形态变化有重要影响,但目前对于翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对土壤-水稻系统重金属迁移转运的影响研究较少。

因此,本试验以水稻为研究对象,采用盆栽试验,在无污染和污染土壤中采取不同施肥处理,研究翻压紫云英条件下化肥与生物炭基肥配施对水稻生长及其对重金属含量和活性的影响,探究土壤-水稻系统重金属转运规律,以期在减施化肥条件下寻找合理安全的施肥方式,为重金属污染稻田的经济安全化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年在江西农业大学试验基地进行,

绿肥为紫云英,品种为余江大叶($0.1\text{ kg}\cdot\text{盆}^{-1}$);化学氮、磷、钾肥分别是尿素(含N 46%)、钙镁磷肥(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。供试早稻品种为五优156。试验所用有机肥为江阴市联业生物科技有限公司提供(总养分:N- P_2O_5 - K_2O =7.4-3.4-6),生物炭基肥为辽宁金和福农业科技股份有限公司生产(养分比:N- P_2O_5 - K_2O =24-8-10,以玉米秸秆为原料采用限氧裂解法制备而成)。供试土壤采自江西农业大学试验田,分别为无重金属污染土壤[深度0~15 cm,因供试土壤中Cu含量未超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中最低风险筛选值,即为无污染土壤]和Cu污染土壤(深度0~15 cm)。供试土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

盆栽试验土样采回后平铺在塑料薄膜上压碎,并剔除根系及石块等杂物,过10目筛,混匀后分别装于直径30 cm、高40 cm的橡胶桶中,每桶10 kg。处理设置:(1)对照(CK,不施肥);(2)氮肥(CN);(3)紫云英+氮肥(CNG);(4)紫云英+有机肥+氮肥(CNGO);(5)紫云英+生物炭基肥+氮肥(CNGC)。每盆紫云英的施加量相当于替代37.5%的氮,有机肥和生物炭基肥分别代替20%的氮,且所有处理施氮量相等。所有肥料均分3次施入:基肥:分蘖肥:穗肥为4:3:3。肥料与土壤充分混匀,保持土壤在淹水状态(水层约3 cm)。移栽长势一致的30 d苗龄的水稻秧苗,每桶3株,每个处理3次重复。

1.3 样品采集及测定方法

于100 d水稻成熟后采集植株样品,用剪刀将水稻的根、籽粒和秸秆分开,并用去离子水清洗干净,放入烘箱105℃杀青1 h,而后保持80℃恒温烘干至恒质量(约48 h),冷却后使用天平分别测定植株各个部位的生物量,水稻籽粒需将谷壳和糙米分开磨碎,根和秸秆则用植株粉碎机粉碎,过100目筛用于测定其中重金属Cu的含量。

土壤pH的测定采用风干土以pH计(雷磁pHS-2F)测定,水土比为2.5:1(即每10 g土加25 mL水)。土壤的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾分别采用重

铬酸钾容量法-外加热法、碱解扩散法、Olsen法、火焰光度法进行测定^[23]。土壤Cu全量的测定使用三酸(硝酸、氢氟酸、高氯酸)消解法消解定容备用,使用电感耦合等离子体发射光谱法(Varian 720-ES)进行测定。土壤有效态Cu含量采用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 以1:5土水比提取。水稻生物量用分析天平[ME204E/02,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]称量测定。样株中Cu含量测定方法:称取约0.5 g烘干的植株样品,参照Xu等^[24]的方法加入10 mL体积分数为65%的 HNO_3 溶液,使用微波消解仪进行消解,将消解液加热浓缩至2 mL,定容至25 mL,使用ICP-AES测定Cu含量。

采用转运系数(Translocation factor, TF)来研究Cu在水稻各部位中的累积和转运能力。TF是水稻后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值,可用于评估水稻各部位对于重金属的转运能力。

1.4 统计分析

所有数据输入Excel 2010进行初步处理计算,利用SPSS(Version 25.0)软件进行单因素ANOVA分析和Duncan法进行不同处理间差异显著性分析($P<0.05$),利用Origin Pro(Version 8.0)软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻生物量的影响

在无污染土壤上进行水稻种植,水稻不同处理各部位生物量的大小均为 $\text{CNGC}>\text{CNG}>\text{CNGO}>\text{CN}>\text{CK}$ (表2),CN处理秸秆和籽粒干质量显著($P<0.05$)低于CNG处理,而根的干质量虽低于CNG处理,但差异未达到显著水平,可见在翻压紫云英条件下施肥可提高水稻产量。对于根部,CNGC处理显著($P<0.05$)高于CK、CN、CNGO处理;对于秸秆,CNG和CNGC处理显著($P<0.05$)高于CN和CNGO处理;对于籽粒,各施肥处理均显著($P<0.05$)高于CK,且CNGC和CNG处理显著($P<0.05$)高于CN和CNGO处理,CNGC处理的水稻籽粒干质量较CN、CNG和CNGO处理分别增产53.7%、4.5%和40.3%。可见在无污染土壤中,CNGC处理水稻产量最高。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil were tested

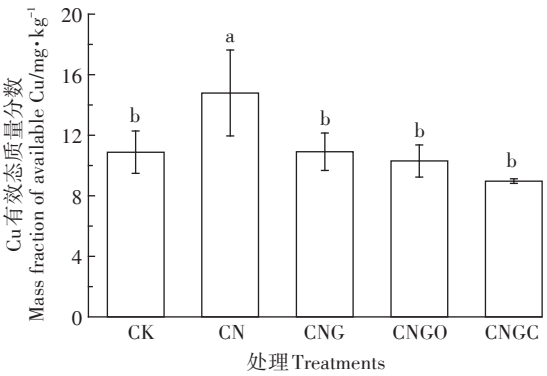
样品 Samples	有机质 Organic matter/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	碱解氮 Available nitrogen/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 Available phosphorus/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
无污染土壤	17.94	5.47	634.50	28.64	163.66	30.19
污染土壤	18.85	5.39	634.58	30.47	147.36	298.44

在污染土壤中,水稻不同处理各部位生物量的大小规律与在无污染土壤下种植的情况基本一致, CNG、CNGC、CNGO各处理根的干质量无显著差异, 且CNGC处理的籽粒干质量显著($P<0.05$)高于CN和CNGO处理。CNGC处理的水稻籽粒干质量比CN、CNG和CNGO处理分别增产69.4%、12.8%和29.6%。

综合两种不同土壤进行对比分析可知,较之于无污染土壤,在污染土壤中种植水稻时CK处理的产量明显下降,表明Cu污染对无肥的水稻生长具有一定程度的毒害作用。且无论是在无污染土壤还是污染土壤中种植水稻,CN处理的水稻产量均低于CNG、CNGO和CNGC处理,说明翻压紫云英条件下几种施肥处理相比单施化肥均能提高水稻产量。翻压紫云英条件下不同肥料配施在一定程度上对水稻产量有所影响,且在两种土壤中化肥配施生物炭基肥的施肥方案下水稻籽粒产量要明显高于其他处理。

2.2 不同施肥处理对污染土壤中Cu有效态质量分数的影响

由图1可知,污染土壤中5组处理间Cu的有效态含量大小规律为CN>CNG>CK>CNGO>CNGC,CN处理Cu的有效态含量较其他4组处理显著($P<0.05$)提高,说明单施化肥会提高稻田土壤有效态Cu的含量。而在翻压紫云英之后,土壤中Cu的有效态含量显著



不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among the fertilization treatments. The same below

图1 污染土壤中不同施肥处理下Cu有效态质量分数

Figure 1 Mass fraction of available Cu in contaminated soil of different fertilizer treatment

($P<0.05$)降低。尤其是CNGC处理,相比CN处理降低了39.4%,比CK处理降低了17.6%。表明翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥能有效降低单施化肥带来的Cu污染风险。

2.3 不同施肥处理对水稻各部位Cu含量的影响

在无污染土壤中进行水稻种植,由图2A可知,水稻各器官中Cu含量的分布为根>秸秆>糙米>谷壳。各施肥处理水稻根中Cu含量显著($P<0.05$)低于CN,而各施肥处理水稻秸秆、谷壳、糙米中Cu含量均明显低于CNG。CK、CNGO和CNGC处理间根、谷壳和糙米中Cu含量无显著差异,CK、CNG、CNGO及CNGC处理间水稻根Cu含量无显著差异。可见,单施化肥时Cu易于在水稻根部积累,而在翻压紫云英条件下单施化肥Cu易转移至水稻的地上部分。CNGO和CNGC处理的水稻根、秸秆、壳和糙米中Cu含量较CNG处理明显下降,这说明翻压紫云英条件下化肥与有机肥或生物炭基肥配施可明显减少水稻对Cu的吸收。

而在污染土壤中进行水稻种植,由图2B可知,水稻各器官中Cu含量的分布规律与在无污染土壤下种植的情况一致。各施肥处理水稻根中Cu含量显著($P<0.05$)低于CN,且CK、CNG、CNGO和CNGC处理根中Cu含量逐渐下降。CNG处理水稻的秸秆、谷壳和糙米中Cu含量最高,且秸秆和糙米中Cu含量显著($P<0.05$)高于CK和CNGC处理,谷壳中Cu含量显著($P<0.05$)高于CNGC处理。CNGC处理水稻所有器官Cu含量较其他处理均有下降,说明在Cu污染土壤中,翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥更能降低水稻

表2 不同施肥处理下水稻各部位干质量

Table 2 The dry weight of each part of rice in each basin under different fertilization

处理 Treatments		根 Root/g·pot ⁻¹	秸秆 Straw/g·pot ⁻¹	籽粒 Grain/g·pot ⁻¹
无污染土壤 Un-contaminated soil	CK	2.55±0.69c	7.73±1.40b	6.51±0.45c
	CN	3.45±1.17b	9.70±0.63b	11.89±3.83b
	CNG	4.26±1.39ab	16.44±1.22a	17.49±3.38a
	CNGO	3.46±0.13b	11.18±1.36b	13.02±3.97b
	CNGC	4.80±0.59a	17.21±1.59a	18.27±3.70a
污染土壤 Contaminated soil	CK	1.40±0.22c	3.23±0.72c	2.64±0.92d
	CN	3.34±0.57b	12.11±2.73b	12.73±1.21c
	CNG	4.44±0.03a	16.83±1.21a	19.11±1.68ab
	CNGO	3.91±1.49ab	15.52±3.13a	16.64±2.54b
	CNGC	4.81±0.64a	18.18±2.87a	21.56±0.53a

注:CK、CN、CNG、CNGO、CNGC分别表示对照、氮肥、紫云英+氮肥、紫云英+有机肥+氮肥、紫云英+生物炭基肥+氮肥处理。同一列不同字母表示各处理间5%差异显著性水平。下同。

Note: CK, CN, CNG, CNGO and CNGC respectively refer to control, conventional nitrogen fertilizer, A. sinicus + nitrogen fertilizer, A. sinicus + organic fertilizer + nitrogen fertilizer, A. sinicus + biochar-based fertilizer + nitrogen fertilizer treatment. Values followed by different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level using Duncan's test. The same below.

各器官中Cu的含量。

此外,在无污染土壤中CNG处理Cu易转移至水稻的地上部分,且其水稻秸秆、谷壳和糙米中Cu含量最高,其中糙米中Cu含量为10.5 mg·kg⁻¹,已超过澳大利亚新西兰食品标准(2002)中关于Cu≤10.0 mg·kg⁻¹的规定[目前我国已取消了食品中Cu的限量标准,原《食品中铜限量标准》(GB 15199—1994)的最大限值为10.0 mg·kg⁻¹]。这说明翻压紫云英条件下施加化肥可能存在重金属风险,因此,施用绿肥改良重金属污染土壤应该谨慎。但在污染土壤中,翻压紫云英条件下化肥与生物炭基肥配施可明显减少水稻各器官中Cu含量,且其水稻各器官中Cu含量在所有处理中最低。

2.4 不同施肥处理对水稻重金属TF的影响及水稻各部位重金属含量与TF之间的关系

从表3中可以看出,在无污染土壤中CNGC、CNGO和CNG处理的TF_{秸秆/根}要显著($P<0.05$)高于CK和CN处理,分别提高了132.4%、123.5%、121.3%和214.4%、202.5%、199.5%,表明在翻压紫云英条件下

施肥会显著($P<0.05$)提高水稻根系将Cu转运到秸秆的能力。不同施肥处理TF_{谷壳/秸秆}的大小为CNGC<CNGO<CNG<CN<CK,与TF_{秸秆/根}基本相反,说明在无污染土壤中加入紫云英会降低水稻秸秆将Cu转运到谷壳的能力。对于TF_{糙米/谷壳},5个处理间的差异不显著,但均大于1.0,说明Cu更易从谷壳转运到糙米中。CNG和CNGO处理的TF_{糙米/谷壳}较CN处理都有升高,说明添加紫云英可提高水稻中Cu由谷壳转运至糙米的能力。

在污染土壤下CNG、CNGO、CNGC处理Cu的TF_{秸秆/根}显著($P<0.05$)高于CK和CN处理,分别提高了43.1%、41.6%、42.5%和104.2%、102.1%、103.3%。CK处理TF_{秸秆/根}显著($P<0.05$)高出CN处理42.7%,说明单施化肥能抑制Cu从根系到水稻秸秆的转运作用。从TF_{谷壳/秸秆}来看,5个处理的TF_{谷壳/秸秆}为0.073~0.126,说明在污染土壤中,Cu在水稻中从秸秆到谷壳的转运效果较差,从一定程度上限制了Cu进入水稻的可食部位。对于TF_{糙米/谷壳},CNG处理分别高出CK、CN、CNGO和CNGC处理10.3%、10.9%、29.1%和5.8%,表

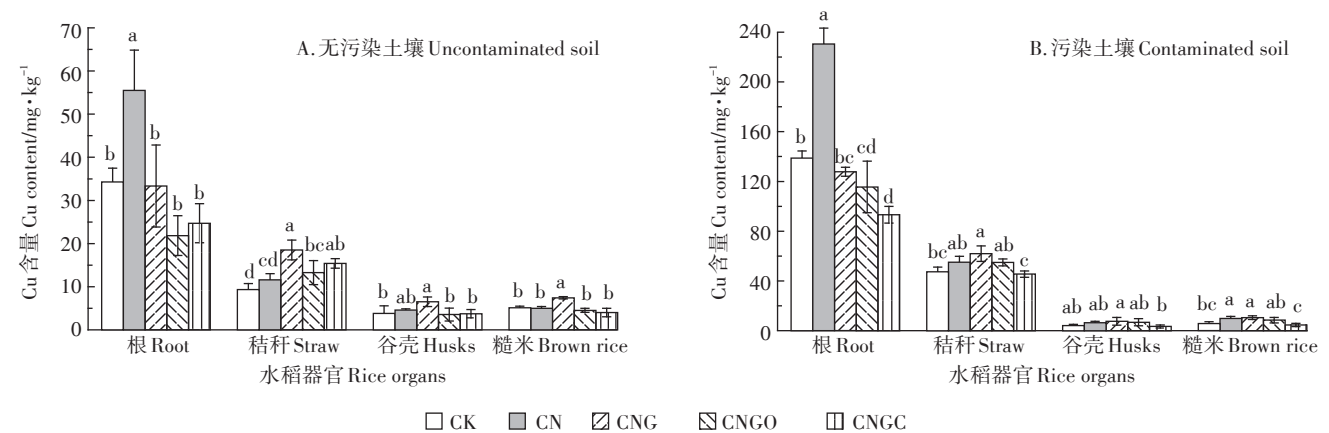


图2 不同施肥处理下水稻各部位重金属含量

Figure 2 Content of heavy metal in different rice organs of different fertilizer treatment

表3 不同施肥处理下水稻各器官间Cu的转运系数

Table 3 Translocation factor of heavy metal in different rice organs of different fertilizer treatment

处理 Treatments	无污染土壤 Uncontaminated soil			污染土壤 Contaminated soil		
	秸秆/根 Straw/Root	谷壳/秸秆 Husk/Straw	糙米/谷壳 Brown rice/Husk	秸秆/根 Straw/Root	谷壳/秸秆 Husk/Straw	糙米/谷壳 Brown rice/Husk
CK	0.272b	0.432a	1.568a	0.341b	0.088a	1.548a
CN	0.201b	0.399a	1.086a	0.239c	0.116a	1.540a
CNG	0.602a	0.351a	1.157a	0.486a	0.126a	1.708a
CNGO	0.608a	0.293a	1.560a	0.483a	0.121a	1.323a
CNGC	0.632a	0.246a	1.079a	0.488a	0.073a	1.614a

明在翻压紫云英条件下单施化肥仍存在一定的重金属污染风险。

综合两种土壤下Cu的TF来看,污染土壤相比于无污染土壤,TF_{秸秆/根}在CK、CN处理下分别提高了25.4%、18.9%,在CNG、CNGO、CNGC处理下分别降低了19.3%、20.6%和22.8%。表明在高浓度Cu胁迫下,Cu由根向秸秆的转运过程受到抑制。污染土壤下的TF_{谷壳/秸秆}较无污染土壤在5个处理下都有明显下降,CK、CN、CNG、CNGO及CNGC处理分别下降了79.6%、70.9%、64.1%、58.7%及70.3%,表明Cu从秸秆向谷壳的转运能力在Cu污染的情况下反而有所降低。对于TF_{糙米/谷壳},在两种土壤中都大于1.0,表明Cu从谷壳转运到糙米的能力非常强。而在污染土壤中CNG处理TF_{谷壳/秸秆}和TF_{糙米/谷壳}在5个处理中均最高,说明在翻压紫云英条件下单施化肥后的水稻仍存在重金属污染的风险。

2.5 生物炭基肥的特征

图3为生物炭基肥的傅里叶红外光谱图,图中于3440 cm⁻¹及3340 cm⁻¹处有明显的吸收峰,其为分子间缔合或分子内缔合的O-H伸缩振动吸收峰^[25]。而1688 cm⁻¹处的吸收峰为-COOH振动吸收峰,在1622 cm⁻¹处的吸收峰为-COOH反对称伸缩振动^[25]。在1466 cm⁻¹处的吸收峰为-CH₃的不对称变角振动^[25]。图4为一定倍率下生物炭基肥的扫描电镜图,从图中可以看出本试验所使用的生物炭基肥呈现片、块交织状。此外,从图中还可以看出生物炭基肥具有丰富的孔隙结构,有利于重金属离子的附着。综合分析表明,生物炭基肥中存在大量的羟基、羧基等官能团,且具有丰富的孔隙结构,对土壤重金属具有较强的固定作用。因此,生物炭基肥所具备的这些结构和特性是CNGC处理能降低土壤-水稻系统重金属风险的重要原因之一。

3 讨论

本研究中,Cu主要集中在水稻的根部,而谷壳和籽粒中的Cu含量较低,这与马荣辉^[26]的研究结果一致。与单施化肥处理相比,翻压紫云英后的处理均能显著减少水稻根系中Cu的含量;与翻压紫云英条件下单施化肥处理相比,化肥配施有机肥或生物炭基肥对于减少水稻各部位Cu的含量效果更明显;在污染土壤中,翻压紫云英条件下化肥与生物炭基肥配施可明显减少水稻各器官中Cu含量,且水稻各器官中Cu含量在所有处理中最低。可见翻压紫云英条件下化

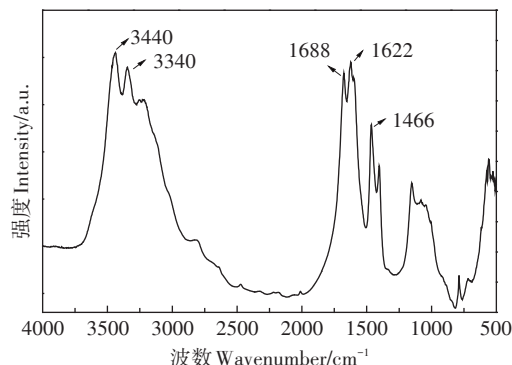


图3 生物炭基肥的红外光谱图

Figure 3 FTIR spectra of the biochar based fertilizer

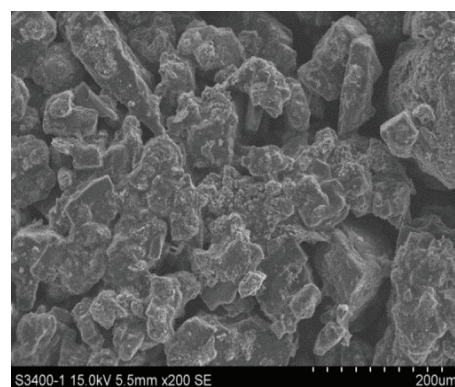


图4 生物炭基肥的扫描电镜图

Figure 4 SEM image of the biochar based fertilizer

肥配施生物炭基肥能明显减少水稻各部位对Cu的吸收。大量研究表明生物炭基肥中的生物炭能够减少作物对重金属的吸收,这与生物质炭对土壤重金属的直接吸附和固持作用相关^[27]。此外,生物质炭也可间接通过影响土壤pH、电导率、阳离子交换量(CEC)等理化性质来减少土壤重金属向植物体的迁移^[28]。本研究发现翻压紫云英后水稻土壤中Cu有效态含量较单施化肥处理显著减少,这与吴浩杰等^[13]的研究结论类似。

翻压紫云英后会显著提高水稻根系将Cu转运到秸秆的能力;Cu从秸秆向谷壳的转运能力在一定Cu浓度水平下会受到抑制,可能是由于水稻籽粒对Cu的吸收在达到一定的峰值时会停止,对于这一现象尚需进行更深入的研究。单施化肥会抑制Cu从根到秸秆的转运能力,这可能是由于CN处理下根系对于Cu吸收能力较强,而水稻秸秆对于Cu的吸收可能存在一定的上限,导致TF_{秸秆/根}降低。这种不易从地下部向地上部转运的抗性机制有多种原因,如植株根细胞功能性的原生质膜和胞间连丝产生抗性机制,降低了

Cu的转运^[29], Cu在植株中的长距离运输通过韧皮部循环运输至根部^[30], 以及Cu在木质部中与一些有机化合物形成某种稳定的络合物^[31]。Cu从谷壳转运到糙米的能力非常强, 但由于Cu的 $TF_{\text{秸秆/根}}$ 和 $TF_{\text{谷壳/秸秆}}$ 都不高, 所以导致最终稻米中Cu的含量不高。本研究表明在无污染和污染土壤中水稻Cu的 $TF_{\text{糙米/谷壳}}$ 均大于1.0, 这与陈立伟^[32]对于早稻添加土壤调理剂后, 水稻中Cd的 $TF_{\text{糙米/谷壳}}$ 均大于1.0的研究结论类似。

4 结论

(1)在本试验所取的污染土壤中种植水稻, 与无污染土壤相比, 籽粒产量无明显差异。与翻压紫云英条件下单施化肥相比, 生物炭基肥与化肥配施处理在无污染和污染土壤中水稻籽粒产量分别提高4.5%和12.8%。

(2)单施化肥条件下水稻植株体中Cu的总吸收量最大, 且水稻根部Cu含量最高; 在污染土壤中, 翻压紫云英条件下单施化肥时水稻糙米存在一定的重金属污染风险, 而在翻压紫云英条件下生物炭基肥与化肥配施时糙米中Cu含量低于相关食品卫生标准($\leq 10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

(3)翻压紫云英能提高Cu从根向秸秆的转运能力, 而在污染土壤条件下Cu从秸秆向谷壳的转运能力会受到抑制。在污染土壤中单施化肥处理下Cu有效态含量最高, 生物炭基肥与化肥配施处理相比于单施化肥处理土壤Cu有效态含量降低了39.4%。

(4)翻压紫云英条件下生物炭基肥与化肥配施可抑制水稻对Cu的吸收和迁移, 降低水稻籽粒中重金属Cu含量, 适宜在重金属Cu污染稻田施用。

参考文献:

[1] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 437-444.
WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1): 437-444.

[2] 徐芹磊, 陈炎辉, 谢团辉, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属污染现状与评价[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2): 176-182.
XU Qin-lei, CHEN Yan-hui, XIE Tuan-hui, et al. Current situation and assessment of heavy metals pollution in farmland soils around a Pb-Zn mine[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(2): 176-182.

[3] 钱玲, 汪丽. 优质高产水稻栽培技术相关要点[J]. 江西农业, 2018(20): 1.

QIAN Ling, WANG Li. Key Points of high quality and high yield rice cultivation technology[J]. *Jiangxi Agricultural*, 2018(20): 1.

[4] Wuana R, Okieimen, F E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation[J]. *ISRN Ecology*, 2011. doi: 10. 5402/2011/402647.

[5] Lin Y C, Lian I B, Kor C T, et al. Association between soil heavy metals and fatty liver disease in men in Taiwan: A cross sectional study[J]. *BMJ Open*, 2017, 7(1): e014215.

[6] Liu S Y, Chi Q D, Cheng Y, et al. Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and reducing N loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1265-1273.

[7] Mampholo B M, Maboko M M, Soundy P, et al. Variety-specific responses of lettuce grown in a gravel-film technique closed hydroponic system to N supply on yield, morphology, phytochemicals, mineral content and safety[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018(11): 2447-2457.

[8] Suriyagoda L D B, Dittert K, Lambers H. Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: A review[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(3): 363-382.

[9] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 63-74.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 63-74.

[10] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1500-1510.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1500-1510.

[11] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.
WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.

[12] 张珺瑾. 种植利用紫云英对南方稻田土壤肥力性状影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
ZHANG Jun-tong. Effects of incorporation of Milk Vetch (*Astragalus sinicus*) on fertility characters of paddy soil in south China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.

[13] 吴浩杰, 周兴, 鲁艳红, 等. 紫云英翻压对稻田土壤镉有效性及水稻镉积累的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(16): 105-111.
WU Hao-jie, ZHOU Xing, LU Yan-hong, et al. Effects of *Astragalus sinicus* on cadmium effectiveness in paddy soil and cadmium accumulation in rice plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(16): 105-111.

[14] 丁炳红. 紫云英等有机物料还田对稻田氮磷损失及重金属活性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.

- DING Bing-hong. The effect of Chinese milk vetch and other organic materials' application on the loss of nitrogen and phosphorus and the activity of heavy metal in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2012.
- [15] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L, et al. A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3269-3282.
- [16] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(8): 935-940.
- [17] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (Cu- II, Cd- II, Ni- II, and Pb- II) by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(9): 5538-5544.
- [18] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*)[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1167-1171.
- [19] Park J H, Choppala G K, Bolan N S, et al. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1/2): 439-451.
- [20] 石红蕾, 周启星. 生物炭对污染物的土壤环境行为影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 486-494.
- SHI Hong-lei, ZHOU Qi-xing. Research progresses in the effect of biochar on soil-environmental behaviors of pollutants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2): 486-494.
- [21] 吕宏虹, 宫艳艳, 唐景春, 等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1429-1440.
- LÜ Hong-hong, GONG Yan-yan, TANG Jing-chun, et al. Advances in preparation and applications of biochar and its composites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1429-1440.
- [22] 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.
- [23] 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 Agricultural Press, 2007.
- [24] 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.
- [25] 席志楠, 李增波, 王聪颖, 等. 磁性生物炭对水体中砷的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 176-182.
- XI Zhi-nan, LI Zeng-bo, WANG Cong-ying, et al. The removal effect of magnetic biochar on pyrene in aqueous phase[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 176-182.
- [26] 马荣辉. 铜在黑土-作物系统中的迁移转化及其钝化机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- MA Rong-hui. Transfer and transformation of Cu in black soil-crop system and *in-situ* immobilization mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [27] 安增莉, 方青松, 侯艳伟. 生物炭输入对土壤污染物迁移行为的影响[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(3): 7-10.
- AN Zeng-li, FANG Qing-song, HOU Yan-wei. Effects on transfer behavior of soil pollutants from inputs of biochar[J]. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(3): 7-10.
- [28] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2282-2287.
- [29] Burkhead J L, Reynolds K A G, Abdel-Ghany S E, et al. Copper homeostasis[J]. *New Phytologist*, 2009, 182(4): 799-816.
- [30] Liao M, Chen C L, Huang C Y. Effects of heavy metals on soil microbial activity and diversity in a reclaimed mining wasteland of red soil area[J]. *Environmental Sciences*, 2005, 17(5): 832-837.
- [31] Irtelli B, Petrucci W A, Navari-Izzo F. Nicotianamine and histidine/proline are, respectively, the most important copper chelators in xylem sap of *Brassica carinata* under conditions of copper deficiency and excess[J]. *Experimental Botany*, 2009, 60(1): 269-277.
- [32] 陈立伟. 土壤调理剂与外源铁对稻田系统中Cd的迁移转运效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- CHEN Li-wei. Effects of combined amendment and exogenous iron on transport and accumulation of Cd and in soil-rice system[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.