

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21510

添加紫云英和水稻秸秆对稻田污染土壤 Cd 形态的影响

王 慧¹, 程文龙¹, 卜容燕¹, 韩 上¹, 唐 杉¹, 李 敏¹, 章 文²,
赵 婧¹, 武 际^{1*}, 曹卫东³

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所 / 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽省农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 3. 中国农业科学院农业资源与
农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为给紫云英、水稻秸秆还田综合治理重金属污染土壤提供理论支撑, 采用室内培养的方法, 设置不添加任何有机物料 (CK)、单独添加水稻秸秆 0.2 g (R2G0)、添加水稻秸秆 0.15 g+ 紫云英 0.05 g (R3G1)、添加水稻秸秆 0.1 g+ 紫云英 0.1 g (R1G1)、单独添加紫云英 0.2 g (R0G2) 共 5 个处理, 研究了紫云英、水稻秸秆对重金属污染稻田土壤中有有效态 Cd 和 Cd 形态分级的影响。结果表明, 随着紫云英添加比例的增加, 有效态 Cd 含量呈降低的趋势; R0G2 处理土壤有效态 Cd 含量比 R2G0 处理下降 34.41%, 且差异显著。R0G2 和 R2G0 的残渣态 Cd 含量显著高于 R3G1 和 R1G1 处理, 其中 R0G2 的残渣态 Cd 比其他处理提高 20.00% ~ 51.90%。通过冗余分析 (RAD) 认为, 土壤可溶性氮 (DON) 和 pH 均与有效态 Cd 和弱酸提取态 Cd 呈负相关关系, 有机质与有效态 Cd 和弱酸提取态 Cd 呈正相关关系, 且 DON、有机质和 pH 对有效态 Cd 与 Cd 形态分级的解释量分别为 64.6%、17.2% 和 4.1%, 达到显著性相关关系。单独添加紫云英对 Cd 的稳定具有较好的效果, 其主要通过改变土壤 DON、有机质和 pH 影响 Cd 有效性和形态特征。

关键词: 污染土壤; Cd 有效性; Cd 形态分级; 土壤化学性质; RDA 分析

有机物料的投入是提高稻田肥力的重要技术措施^[1-3]。但是部分有机物料携带一定量重金属, 长期施用会增加土壤重金属的投入量, 造成土壤重金属的积累^[4-5], 甚至有研究认为, 有机肥施用是土壤镉 (Cd) 累积的主要原因之一, 长期施用不合格有机肥 (猪粪、牛粪) 会增加土壤全 Cd 含量, 增加稻田土壤重金属污染风险^[6]。长期单一化学氮肥的不合理施用, 在造成土壤 pH 下降的同时, 提高了土壤重金属的活性, 增加了土壤重金属污染风险, 进而影响了土壤健康和粮食安全^[7-8]。

水稻秸秆作为重要的有机物料来源, 其还田

有利于土壤可持续利用, 目前安徽省水稻秸秆的还田率达到 92.77%^[9]。但是在水稻秸秆全量还田时, 易造成土壤短期内有效氮含量下降, 并产生一些毒害物质。紫云英作为豆科绿肥, 是我国南方稻区的主要冬季绿肥作物, 也是能够提升地力的清洁有机肥源, 具有较低的 C/N 值。研究表明, 豆科绿肥与水稻秸秆协同还田, 既能弥补水稻秸秆还田出现的问题, 也能提升土壤培肥效果, 提高水稻产量^[2, 10-11]。

水稻秸秆和绿肥作为有机物料, 也常被认为是一类很好的重金属污染土壤改良材料, 可以抑制土壤重金属的生物有效性, 在修复重金属污染土壤方面有积极的作用^[12-13]。研究表明, 紫云英腐解通过提高土壤 pH 和有机质含量, 影响氮素循环、有机质降解和硫酸盐还原等, 降低了土壤水溶态和交换态 Cd 含量, 促使 Cd 由有效态向某些潜在有效态或无效态转变^[14-15]。水稻秸秆还田也可以作为有效的改良剂, 通过促进 Cd 离子与土壤腐殖质和 POM 组分的螯合能力, 降低可溶性 Cd 含量^[16]。紫云英和水稻秸秆二者配合也可以降低酸性土壤镉的有效性, 且在冬种紫云英后降低对后茬稻田分蘖

收稿日期: 2021-09-24; 录用日期: 2021-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700200); 国家自然科学基金青年基金项目 (41807106); 安徽省科技重大专项 (202003a06020008); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (绿肥, CARS-22); 安徽省自然科学基金项目 (2008085QD165); 芜湖市科技计划项目 (2021hg13)。

作者简介: 王慧 (1987-), 助理研究员, 博士, 主要从事稻区农田重金属污染治理以及绿肥综合利用。E-mail: kangxi20052009@163.com。

通讯作者: 武际, E-mail: wuji338@163.com。

期和抽穗期土壤有效态 Cd 含量^[12, 17]。然而,也有不同的研究结果,谢杰等^[18]认为长年翻压紫云英趋向活化土壤中的 Cd,提高生物活性 Cd 形态的百分比,并且认为土壤有机质组成是影响土壤 Cd 形态的关键因素之一;李本银等^[19]认为,施用水稻秸秆不仅增加了土壤 Cd 含量,还提高了土壤有效态 Cd 含量。而王阳等^[20]研究认为,紫云英还田对重金属 Cd 无显著影响。可见,前人就紫云英和秸秆添加对重金属形态影响的研究结果并不一致。本文通过室内土培试验,明确添加紫云英和水稻秸秆对自然污染土壤的重金属 Cd 的有效性、赋存形态的影响,并结合土壤化学性质,分析紫云英和水稻秸秆腐解后土壤肥力特征与重金属 Cd 有效性和赋存形态的相关性,解析土壤重金属 Cd 有效态和赋存形态的关键影响因素,旨在为紫云英、水稻秸秆还田修复重金属污染的稻田土壤提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样采集于安徽省铜陵市,土壤为河流冲积物发育的水稻土,质地为砂壤土。供试土壤基础理化性质:有机质 29.71 g/kg、全氮 1.53 g/kg、全磷 0.36 g/kg、全钾 12.88 g/kg、有效磷 7.58 mg/kg、速效钾 105.18 mg/kg、pH 5.36、全 Cd 4.84 mg/kg、有效态 Cd 1143 $\mu\text{g/kg}$ 。供试的水稻秸秆和紫云英均采自无重金属污染的农田。

1.2 试验设计

土培试验设 5 个处理,分别为:1) 不添加任何有机物料 (CK); 2) 单独添加水稻秸秆 0.2 g (R2G0); 3) 添加水稻秸秆 0.15 g+ 紫云英 0.05 g (R3G1); 4) 添加水稻秸秆 0.1 g+ 紫云英 0.1 g (R1G1); 5) 单独添加紫云英 0.2 g (R0G2)。将供试土样风干后过 1 mm 筛,水稻秸秆和紫云英烘干后剪成 <1 cm 长。按照方案,称取 100 g 土样加入总重为 0.2 g 的水稻秸秆和紫云英,充分混合均匀,装入底部直径 5 cm、体积 150 mL 的塑料培养杯中。培养过程中始终保持淹水状态,水层深度为 1 cm 左右,室内常温培养 90 d,每隔 3 d 添加 1 次水,采用称重法保持土壤含水量,每个处理重复 3 次。

1.3 测定项目与方法

将培养后的土壤样品进行风干,磨细,分别过 1 和 0.149 mm 筛,备用。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾和 pH 的测定

按照鲁如坤^[21]的方法进行;土壤可溶性有机碳 (DOC)、可溶性有机氮 (DON) 和可溶性有机磷 (DOP) 的测定按照陈武荣等^[22]的方法进行。土壤 Cd 全量的测定按照 GB/T 17141-1997 消解-ICP-AES 测定的方法进行;Cd 有效态测定采用 EDTA 浸提-ICP-AES 测定的方法进行^[16];Cd 形态分级测定采用 BCR 4 步提取 (分为弱酸提取态、可还原态、可氧化态、残渣态), ICP-AES 测定 Cd 含量^[17]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 进行数据整理, SPSS 20.0 进行统计分析, Duncan 法进行方差分析和显著性检验。采用 Canoco 5.0 进行冗余分析 (RDA), 筛选土壤肥力特征因子, 并采用 Excel 2010 和 Origin 8.5 作表、图。

2 结果与分析

2.1 添加紫云英和水稻秸秆对污染土壤有效态 Cd 含量的影响

添加紫云英和水稻秸秆, 土壤有效态 Cd 的含量见图 1。在 5 个处理中, 单独添加紫云英处理 (R0G2) 的土壤有效态 Cd 含量最低, 比单独添加水稻秸秆 (R2G0) 下降 34.41%, 达到显著性差异 ($P < 0.05$)。在 R2G0、R3G1 和 R1G1 处理之间, 有效态 Cd 含量差异不显著; 但 R1G1、R3G1 处理的有效态 Cd 含量小于 R2G0 处理, 且 R1G1 的有效态 Cd 含量略低于 R3G1 处理。因此, 与单独添加水稻秸秆处理相比, 单独添加紫云英处理有利于土壤有效态 Cd 含量的降低; 且随着紫云英添加比例的增加, 有效态 Cd 含量呈降低的趋势。

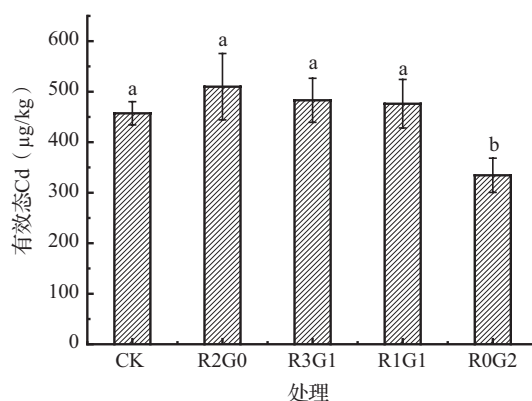


图 1 添加紫云英和水稻秸秆下土壤有效态 Cd 含量

注: 不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 添加紫云英和水稻秸秆对污染土壤中 Cd 形态分级的影响

由图 2 可知，重金属 Cd 的主要形态呈弱酸提取态，占比 60% 以上，其次为可还原态 Cd，二者总共占比可达 90% 以上。与 CK 相比，R0G2 和 R2G0 处理的土壤 Cd 的弱酸提取态和残渣态均显著提升，分别增加 4.89% 和 5.79%、20.00% 和 15.00%，而可还原态和可氧化态含量分别显著降低了 10.63% ~ 12.08% 和 23.66% ~ 27.48%。添加紫云英和水稻秸秆处理（R1G1、R3G1）与 CK 相比，Cd 的弱酸提取态含量显著增加 6.16% ~ 6.97%，

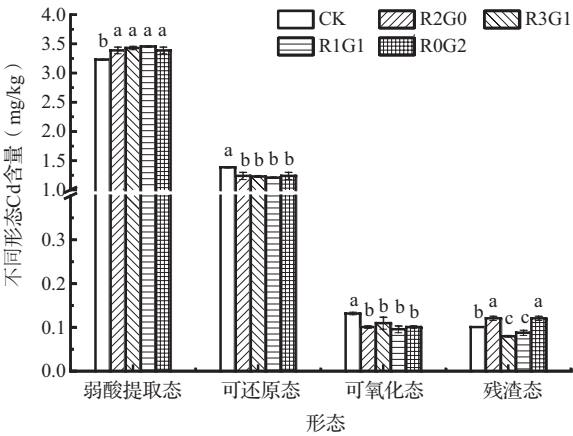


图 2 添加紫云英和水稻秸秆下土壤不同形态 Cd 的含量
注：相同形态中不同小写字母代表处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

而可还原态 Cd、可氧化态 Cd 和残渣态 Cd 含量则明显下降，分别下降 11.35% ~ 12.87%、16.79% ~ 27.48% 和 13.00% ~ 21.00%。R1G1 和 R3G1 处理中 Cd 的弱酸提取态、可还原态和可氧化态与 R2G0 处理之间差异不显著，但是残渣态 Cd 增加 24.35% ~ 31.30%。与 R0G2 处理相比，R1G1 和 R3G1 处理中残渣态 Cd 显著降低 27.50% ~ 34.17%。因此，单独添加紫云英（R0G2）或水稻秸秆（R2G0）对 Cd 的稳定效果优于二者共同添加。

2.3 添加紫云英和水稻秸秆对土壤化学性质的影响

无论单独添加紫云英、水稻秸秆还是共同添加，土壤的有机质、全氮、全磷和全钾含量均高于 CK 处理，其中有机质、全磷、全钾含量均达到显著性差异（表 1）。与 R2G0 处理相比，R0G2 处理的全氮含量提高 26.92%，pH 提高 0.33 个单位，全钾含量减少 3.39%，均达到显著性差异。R3G1 处理的土壤全钾含量与 R2G0 处理之间差异不明显，但 R1G1 处理的全钾含量则显著低于 R2G0 处理。

单独添加紫云英或者水稻秸秆的土壤有效磷、速效钾、DOC 和 DOP 含量均显著高于 CK 处理（表 2）。R0G2 处理的土壤有效磷、DOC 和 DON 含量比 R2G0 处理分别提高了 11.46%、14.55% 和 53.96%，

表 1 添加紫云英和水稻秸秆下土壤全量养分和 pH

处理	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	pH
CK	32.56 ± 2.60b	1.51 ± 0.08b	0.38 ± 0.02b	12.51 ± 0.07c	6.12 ± 0.05b
R2G0	37.11 ± 1.87a	1.56 ± 0.10b	0.45 ± 0.02a	13.88 ± 0.21a	6.00 ± 0.04b
R3G1	36.96 ± 1.07a	1.57 ± 0.08b	0.43 ± 0.01a	13.62 ± 0.08a	6.02 ± 0.10b
R1G1	36.49 ± 1.85a	1.65 ± 0.04b	0.43 ± 0.02a	13.34 ± 0.30b	6.15 ± 0.09b
R0G2	36.70 ± 1.78a	1.98 ± 0.16a	0.43 ± 0.02a	13.41 ± 0.16b	6.33 ± 0.09a

注：表中同列不同小写字母代表处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

表 2 添加紫云英和水稻秸秆下土壤速效养分和可溶性碳、氮、磷含量 (mg/kg)

处理	有效磷	速效钾	DOC	DON	DOP
CK	7.82 ± 0.17c	121.64 ± 1.12c	473.49 ± 40.11c	39.78 ± 1.42b	0.38 ± 0.05c
R2G0	9.42 ± 0.30b	309.37 ± 9.36a	616.69 ± 53.82b	45.61 ± 5.82b	0.81 ± 0.09a
R3G1	9.40 ± 0.59b	304.30 ± 10.71a	819.02 ± 33.87a	44.78 ± 1.33b	0.66 ± 0.07b
R1G1	9.60 ± 0.19ab	297.30 ± 10.44ab	625.76 ± 68.04b	46.29 ± 2.73b	0.78 ± 0.06a
R0G2	10.50 ± 0.24a	287.40 ± 11.91b	706.41 ± 55.56b	70.22 ± 6.16a	0.56 ± 0.01b

速效钾和 DOP 含量分别降低了 7.10% 和 30.86%。共同添加紫云英和水稻秸秆时, R1G1 处理的有效磷、速效钾、DOC、DON 和 DOP 含量与 R2G0 处理之间差异不显著; R3G1 处理的 DOC 含量比 R2G0 提高了 32.81%, DOP 含量降低了 18.52%, 且均达到显著差异。

2.4 土壤重金属有效态 Cd 和 Cd 形态分级与土壤化学性质的相关性分析

由图 3 可知, pH、全氮、DON 与有效态 Cd 方向相反, 夹角较小, 呈显著负相关关系, 说明 pH、全氮、DON 对 Cd 有效态存在显著负效应; 有机质、DOP 和全磷与有效态 Cd 方向相同, 夹角小于 90°, 呈显著正相关关系, 说明有机质、DOP 和全磷对有效态 Cd 存在显著正效应; DOC 与有效态 Cd 之间的夹角接近 90°, 说明二者之间的相关关系较弱。

分析不同形态 Cd 与有效态 Cd 之间的关系, 残渣态 Cd 与有效态 Cd 方向相反, 夹角较小, 说明残渣态 Cd 对于有效态 Cd 含量的增加具有显著负相关关系; 弱酸提取态连线较长, 与 Cd 有效态方向相同, 说明弱酸提取态 Cd 含量的增加, 有利于有效态 Cd 含量的提升; 可还原态和可氧化态 Cd 连线较长, 与有效态 Cd 关联性越强, 但是夹角接近直角, 对有效态 Cd 影响较小。另外, 弱酸提取态 Cd 与有机质、全磷、DOP 和 DOC 夹角较小, 方向一致, 其对弱酸提取态 Cd 含量的提高具有显著正效

应; 而 pH、DON、全氮、有效磷与残渣态 Cd 夹角较小, 具有正相关关系, 特别是 pH。而 DOC、全磷、有机质、DOP 和有效磷则与可还原态 Cd 和可氧化态 Cd 之间方向相反, 夹角较小, 与还原态 Cd 和可氧化态 Cd 之间呈现出显著负相关关系。

通过 RDA 二维图得出土壤化学性质与有效态 Cd 和 Cd 形态分级存在相关关系, 然后进行蒙特卡洛检验和向前选择排序法对相关土壤化学性质进行排序, 进一步量化土壤肥力特征对有效态 Cd 和 Cd 形态分级的贡献程度 (表 3)。结果表明, 土壤化学特征指标对有效态 Cd 及 Cd 形态分级解释力度达到 96.36%, 由大到小分别为 DON、有机质、pH、全磷、DOC、DOP、有效磷、全氮; 其中, DON、有机质和 pH 对有效态 Cd 和 Cd 形态的解释量分别达到 64.6%、17.2% 和 4.1%, 加和达到 85.9%。DON、有机质、pH 对有效态 Cd 及 Cd 不同形态的影响均达到显著水平 ($P=0.048$), DON 和有机质的影响达到极显著水平 ($P=0.006$)。

表 3 土壤肥力特征因子的显著性检验和重要项排序

化学性质	Cd			
	重要项排序	解释量	F 值	P 值
DON	1	64.6	23.7	0.006
有机质	2	17.2	11.3	0.006
pH	3	4.1	7.2	0.048
全磷	4	4.0	5.1	0.058
DOC	5	3.0	2.7	0.132
DOP	6	1.7	2.6	0.174
有效磷	7	1.0	1.5	0.284
全氮	8	0.7	1.2	0.304

3 讨论

紫云英和水稻秸秆是稻田系统重要的原位还田的清洁有机肥源。在本试验中, 紫云英、水稻秸秆单独添加或者二者共同添加均可以显著改善土壤化学性质, 这与其他研究结果一致^[2-3, 10-11]。在本试验中, 共同添加水稻秸秆和紫云英以及单独添加水稻秸秆或紫云英均能降低可还原态 Cd 和可氧化态 Cd, 增加残渣态 Cd 含量, 其中单独添加紫云英处理 (R0G2) 与 CK 处理相比土壤有效态 Cd 显著降低 26.85%, 残渣态 Cd 提高了 20.00% ~ 51.90%。吴浩杰等^[23]研究表明, 施加紫云英能使福林地区试验田有效态 Cd 降低 1.8% ~ 12.1%, 醴陵地区试验田有效态 Cd 降低 1.5% ~ 9.0%。研究表明, 施加绿肥显著降低了土壤中可溶态 / 交换态 Cd 含量, 增加了土壤有机结合态

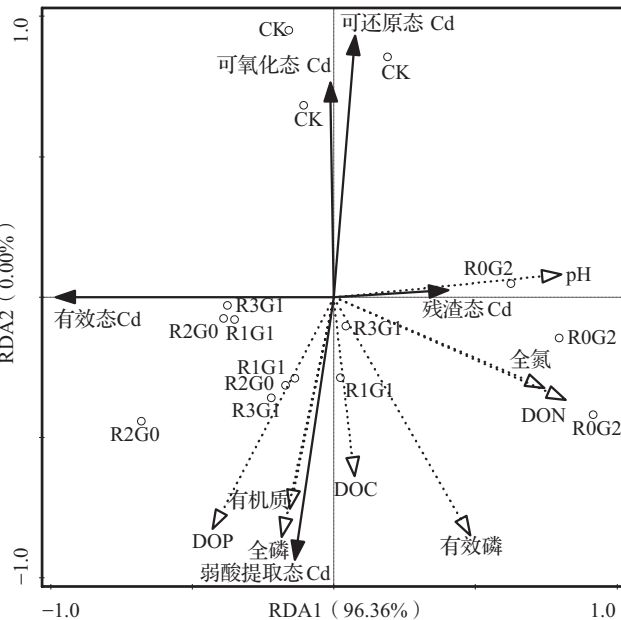


图 3 添加紫云英和水稻秸秆后土壤化学性质与 Cd 有效态和形态分级的冗余分析

和无机沉淀态 Cd 含量^[16]；添加绿肥（油菜）、紫云英和水稻秸秆均能显著降低交换态 Cd 含量，增加氧化物结合态、紧有机结合态和残渣态 Cd 的含量，单独添加紫云英的效果最为明显^[12, 23]。

在本试验中，单施紫云英处理的 DON 含量显著高于单施水稻秸秆以及紫云英和二者共同添加处理，其中紫云英腐解产生的 DON 比单独添加秸秆提升了 51.70% ~ 76.52%。结合冗余分析，DON 与有效态 Cd 和弱酸提取态 Cd 呈负相关关系，且解释量达到 64.6%，这表明土壤 DON 含量可能是影响重金属 Cd 有效性和形态的主要因素，这也可能是单独添加紫云英比单独添加水稻秸秆显著降低土壤有效态 Cd 的主要原因。研究表明，紫云英含氮量显著高于水稻秸秆，在提高土壤全氮以及 DON 方面，紫云英比水稻秸秆更有优势^[24]。在紫云英腐解的过程中释放较多的含氮物质，增加土壤 DON 的含量，其中包括大分子量 DON（酚类、醇类、芳香族类化合物），且含有大量的类蛋白成分，这部分大分子有机物可以与 Cd 结合，形成活性较小有机络合物，在一定程度上钝化 Cd 离子；另外，这些有机大分子可能通过吸附在土壤颗粒表面，创造出更多 Cd 的吸附位点，增强土壤固相颗粒对 Cd 的固持能力^[25-27]。

土壤 pH 是控制 Cd 生物有效性的主要因素之一，有机物料的添加可以增加土壤 pH，减少土壤中有效态重金属含量^[27]。pH 的升高可通过降低土壤胶体表面点位，增加土壤表面的负电荷量，增加土壤颗粒与重金属之间的静电引力；也可以通过促进金属阳离子羟基态的形成，增强与土壤吸附点位的亲和力；增加土壤溶液中 OH⁻ 的浓度，阳离子重金属可与 OH⁻ 结合生成难溶的沉淀，降低土壤溶液中 Cd 的溶解度，降低有效态 Cd 和弱酸提取态 Cd 含量，增加残渣态 Cd 含量^[23, 26]。同时在本试验中添加紫云英处理的 pH 要高于单独水稻秸秆，显著降低了重金属有效态 Cd 含量。这可能与各自含有的碱性物质和碳含量有关，相比水稻秸秆，一方面由于紫云英的碱性物质含量较高，如钙、镁含量均高于水稻秸秆；另一方面紫云英的含碳量低于水稻秸秆，其碱度和碳酸钙当量高于水稻秸秆，使添加紫云英后土壤 pH 高于水稻秸秆^[23-24]，影响重金属的活性。结合冗余分析，pH 与重金属 Cd 之间呈现显著负相关关系（ $P=0.048$ ，表 3）。因此，认为相对于水稻秸秆，紫云英腐解通过提高土壤 pH 可能是降低土壤有效态和弱酸提取态 Cd 的重要控制因素之一。

有机质是影响重金属 Cd 的另一个主要因素。在本试验中，有机质与重金属有效态 Cd 和 Cd 形态呈显著正相关关系，解释量为 17.2%。有机质可通过表面官能团吸附土壤中的重金属，降低重金属的生物有效性；也可以通过土壤中有有机物料的分解可能产生水溶性有机物，在一定程度上提高重金属的生物有效性^[18]。在本试验中，添加紫云英或水稻秸秆处理后弱酸性提取态 Cd 含量也得到显著提高。紫云英和水稻秸秆腐解过程中产生大量水溶性有机物，带有较多活性官能团，与 Cd 离子相互作用，形成 Cd 有机络合物；还吸附土壤颗粒表面，创造出较多的吸附位点，增加土壤颗粒对 Cd 的吸附，增加了 Cd 的可交换态。谢杰等^[28]也认为，紫云英腐解后产生的腐殖质可以将土壤游离态 Cd 转变为有机结合态 Cd，主要表现为增加可交换态和铁锰氧化物结合态 Cd 所占比例。

4 结论

单独添加紫云英显著降低重金属 Cd 的有效性；单独添加紫云英或者水稻秸秆稻田显著提高土壤残渣态 Cd 的含量，降低可还原态 Cd 和可氧化态 Cd 的含量。添加紫云英或水稻秸秆对有效态 Cd 和 Cd 形态分级的影响，是通过改变土壤中 DON、有机质和 pH 等多方面因素的综合效应。在农田重金属污染治理中，需结合水分管理等农艺措施，发挥紫云英和水稻秸秆在土壤降 Cd 方面的积极作用。

参考文献：

- [1] 武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年典型水稻土肥力演变特征 [J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24 (6): 1416-1424.
- [2] 高嵩渭, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制 [J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26 (11): 1-12.
- [3] 刘宇庆, 刘燕, 杨晓东, 等. 水稻秸秆还田对稻田土壤肥力影响的试验研究 [J]. 中国资源综合利用, 2020, 38 (11): 1-3.
- [4] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响 [J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20 (2): 466-480.
- [5] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 [J]. 环境科学, 2021, 42 (5): 2469-2479.
- [6] 严露, 林朝君, 王欣, 等. 有机肥及复配硫酸盐对土壤-水稻系统砷镉有效性的调控 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 667-679.
- [7] 孙向平, 严理, 曾粮斌. 氮肥对稻田土壤中镉的形态特征及生物有效性影响研究 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学版), 2018, 33 (5): 941-946.
- [8] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农

- 田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(6): 1615-1621.
- [9] 程文龙, 韩上, 李敏, 等. 主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1789-1798.
- [10] 唐杉, 王允青, 赵决建, 等. 紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3086-3093.
- [11] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163.
- [12] 杜爽爽. 稻草、紫云英用量及配比对酸性土壤砷、镉有效性的影响及其在水稻中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [13] 吴浩杰, 周兴, 鲁艳红, 等. 绿肥作物对耕地镉污染修复机理综述[J]. 湖南农业科学, 2016(4): 115-118.
- [14] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [15] 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: 110908-110916.
- [16] 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: 973-982.
- [17] 彭曦, 谭长银, 曹雪莹, 等. 冬种绿肥对后茬土壤 Cd 有效性及水稻 Cd 积累的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(5): 10-16.
- [18] 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.
- [19] 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-288.
- [20] 王阳, 刘恩玲, 王奇赞, 等. 紫云英还田对水稻镉和铅吸收积累的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 189-193.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 陈武荣, 刘勤, 禹洪双, 等. 长期不同施肥处理水稻土溶解性有机质组分含量及其特性研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 111-116.
- [23] 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.
- [24] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(5): 1153-1160.
- [25] 雷秀美. 翻压紫云英后水田土壤可溶性有机氮成分动态与剖面分异[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [26] 吕本春, 付利波, 湛方栋, 等. 绿肥作物矿化分解对土壤镉有效性的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 431-441.
- [27] Yin B K, Zhou L Q, 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: 537-546.
- [28] 谢杰, 陈院华, 秦文婧, 等. 外源有机物配合化肥减施对水稻产量及镉吸收的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(6): 26-35.

Effects of Chinese milk vetch and rice straw on the availability and forms of Cd in contaminated paddy soil

WANG Hui¹, CHENG Wen-long¹, BU Rong-yan¹, HAN Shang¹, TANG Shan¹, LI Min¹, ZHANG Wen², ZHAO Jing¹, WU Ji^{1*}, CAO Wei-dong³ (1. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences/Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources & Environment, Hefei Anhui 230031; 2. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The effects of Chinese milk vetch and rice straw on the availability and the forms of Cd were studied in order to afford the theoretical support for the remediation of heavy metal-contaminated paddy soil by the decomposition of Chinese milk vetch and rice straw. An in-lab experiment was conducted with five treatments including with control (CK), the incorporation of rice straw only (R2G0), the incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with the mass ratio 3:1 (R3G1), the incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with the mass ratio 1:1 (R1G1), and the incorporation of Chinese milk vetch only (R0G2). The available Cd was decreased with the increase of the mass ratio of Chinese milk vetch and the available Cd of R0G2 was significantly reduced by 34.41%, compared with that of R2G0. Both of the residual Cd content of R0G2 and R2G0 were higher than that of R3G1 and R1G1 and the residual Cd of R0G2 was higher than other treatments by 20.00% ~ 51.90%. There were significantly negative correlations between DON, pH and the available Cd and the acid-soluble fraction of Cd, while significantly positive correlations was existed between organic matter and the available and the acid-soluble fraction of Cd. The amount of explanations of DON, organic matter and pH for the availability and the forms of Cd were 64.6%, 17.2% and 4.1%, respectively. There were better effects of the addition of Chinese milk vetch on the stability of Cd. The addition of Chinese milk vetch may improve DON, organic matter and pH of the paddy soil to influence the availability and the forms of Cd.

Key words: contaminated paddy soil; Cd availability; Cd forms; Chemical properties of soil; RDA analysis