

钝化修复对不同水稻品种镉累积效应及土壤特性的影响

孙国红¹, 李剑睿^{2,3}, 梁学峰³, 黄青青³, 徐应明³

(1. 天津农学院 工程技术学院, 天津 300384; 2. 太原工业学院, 太原 030008;
3. 农业部 环境保护科研监测所, 农田重金属污染修复创新团队, 天津 300191)

摘要:为了探讨坡缕石钝化修复下不同水稻品种(T优272和丰优9号)吸收累积Cd差异,采用盆栽试验,研究了酸性Cd污染稻田土(PL1、PL2和PL3处理)对2种水稻品种重金属Cd累积效应,以及对土壤酶活性、氮磷有效性的影响。结果表明,种植的常规水稻品种T优272稻谷干物质量比低Cd吸收品种丰优9号高7.91%。坡缕石钝化修复下,T优272与丰优9号稻谷干物质量无显著差异,但土壤pH值分别较CK增加了0.33~0.46和0.40~0.53。与CK相比,PL1F、PL2F和PL3F处理土壤有效态Cd质量分数最大降低13.59%,稻米Cd质量分数降幅达20.51%~51.28%,其中PL3F处理的稻米Cd质量分数为0.19 mg/kg,低于食品安全国家标准限量值(0.20 mg/kg);PL1T、PL2T和PL3T处理土壤有效态Cd质量分数最大降低25.08%,糙米Cd质量分数最大降低37.50%,其中PL3T处理糙米Cd质量分数为0.35 mg/kg。土壤酶活性随着坡缕石添加量的增加而逐渐升高,而且种植T优272品种的土壤酶活性总体上高于丰优9号。随着坡缕石添加量的增加,钝化修复各处理间土壤碱解氮质量分数无显著差异,但土壤有效磷质量分数呈逐渐降低趋势;与CK相比,种植丰优9号和T优272品种的土壤有效磷质量分数分别降低了7.08%~18.08%和9.02%~19.59%。研究结果可为重金属Cd污染酸性水稻田土壤坡缕石钝化与低Cd吸收水稻品种联合修复提供一定的科学依据。

关键词:坡缕石; 镉; 土壤; 钝化修复; 水稻; 品种差异

中图分类号: X53

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.004

孙国红,李剑睿,梁学峰,等. 钝化修复对不同水稻品种镉累积效应及土壤特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2017,36(2):25-31.

0 引言

当前我国南方酸性水稻区土壤重金属Cd污染形势严峻,局部区域稻米重金属Cd超标严重,迫切需要开展重金属Cd污染酸性水稻田安全生产技术研究。研究表明,同一条件下水稻不同品种间,以及不同器官间的Cd吸收和累积存在显著性差异^[1]。这种差异主要是由于水稻外部和内部的形态结构的不同、Cd在不同品种中产生反应的生理生化机制以及水稻植株对Cd的吸收转运机制的不同造成的。不同水稻品种对Cd向其籽粒转运的能力一般是按超级稻、杂交稻和常规稻的顺序递减的。也有研究显示,籼型、新株型和粳型3种类型水稻的糙米中的Cd质量分数一般是按籼型、新株型、粳型的顺序递减^[2]。但水稻不同品种对土壤重金属Cd吸收的差异一般不足以解决轻中度酸性Cd污染水稻田安全生产问题。

钝化修复技术具有修复速率快、效果高、稳定性好、价格适中、操作简单等优点^[3],特别适应于大面积重金属污染农田土壤的修复治理。目前,研究内容主要集中在钝化修复效应^[4-5]、稳定性^[6-7]及土壤环境质量影响^[8]等方面,而有关钝化修复技术与低Cd吸收水稻品种联合用于修复治理酸性重金属Cd污染水稻田土壤研究较少。但就钝化修复技术来看,该项技术主要适应于轻度Cd污染酸性水稻田修复治理,对中重度Cd污染酸性水稻田仅依靠钝化修复技术仍然难以达到修复目的。所以,需要从水稻品种的选择、配套的水肥管

收稿日期:2016-08-15

基金项目:中国农业科学院创新工程项目(2013-cxgc-xym,2014-cxgc-xym);国家自然科学基金项目(21177068);天津市科技支撑计划项目(14ZCZDSF00004);天津市农业科技成果转化与推广项目(201404100)

作者简介:孙国红(1967-),女,教授,主要从事土壤-植物系统重金属污染行为模拟研究。E-mail: sgh1999@126.com

通信作者:徐应明(1964-),男,研究员,主要从事农田土壤重金属污染钝化修复技术研究。E-mail: ymxu1999@126.com

理措施、安全高效的钝化修复技术等入手,集成相关产品与技术,开展联合修复技术模式研发,从而达到阻隔与阻控水稻对重金属Cd的吸收,提高稻米的产量和品质。

以酸性重金属Cd污染水稻土作为研究对象,选取湖南低Cd吸收水稻品种丰优9号和常规种植水稻品种T优272,研究添加不同量的坡缕石钝化修复对2种水稻品种地上部干物质量、水稻体内各部位累积Cd质量分数,以及土壤pH值、有效态Cd质量分数、水稻根表Fe和Cd质量分数、土壤酶活性及氮磷有效性的影响,以期为中重度Cd污染酸性水稻田土壤修复治理提供新的技术方法。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤采自湖南省某地水稻田,属于红壤性水稻土,取自0~20 cm的表土层,土样自然风干后,过2 mm筛备用。供试土壤基本理化性质:pH值6.03,阳离子交换量(CEC)19.38 cmol/kg,全氮质量分数1.28 g/kg,总磷质量分数0.62 mg/kg,有机质质量分数21.30 g/kg,总Cd质量分数1.10 mg/kg。供试钝化材料坡缕石(PL)采购于江苏盱眙,属于土状坡缕石,为白色粉末,其中CaO质量分数1.20%、Al₂O₃质量分数10.40%、Na₂O质量分数1.51%、MgO质量分数20.53%、SiO₂质量分数64.40%,pH值8.00,Cd质量分数0.11 mg/kg。供试尿素、碳铵均为实验室分析纯试剂;供试水稻品种为湖南省筛选出的低Cd吸收品种丰优9号和当地种植的常规水稻品种T优272,均由湖南省农业科学院作物研究所提供。

1.2 试验设置

试验设钝化材料和水稻品种2个因素。水稻品种包括丰优9号和T优272。试验共设对照(CK,未添加坡缕石钝化材料)和0.50%坡缕石(PL1)、1.00%坡缕石(PL2)、1.50%坡缕石(PL3)处理,每个处理3个重复,坡缕石添加量为盆栽土壤质量百分比。

供试土样风干过2 mm筛后,加入坡缕石,充分混匀后装入塑料盆钵,每盆装土6.00 kg;同时施入氮肥(尿素,含N质量分数200 mg/kg)、磷肥(过磷酸钙,含P₂O₅质量分数150 mg/kg)和钾肥(硫酸钾,含K₂O质量分数150 mg/kg)作为底肥,平衡30 d后将育好的水稻秧苗移入盆内,每盆定植4株。试验所用塑料盆钵采用随机区组排列,在温室大棚内进行。

1.3 样品分析

水稻收获后采集盆中土样,风干过1 mm筛后混匀,用于测定土壤pH值、有效态Cd质量分数、土壤酶活性及土壤氮磷有效性等。单独测定各盆水稻茎叶、稻谷干物质量。土壤基本理化性状测试包括pH值、有机质、全氮、全磷、CEC等,采用土壤农化常规分析方法测定^[9]。土壤样品全Cd质量分数采用HNO₃-HClO₄-HF消化、原子吸收法测定。植物样品全Cd质量分数采取HNO₃-HClO₄消化、石墨炉法测定。

土壤样品Cd形态分析采用 Tessier 分级提取方法^[10]。水稻根表Fe质量分数测定参考文献[11]。在第一步提取水稻根表Fe(II)时可以提取出部分可提取态Cd,第二步提取水稻根表Fe(III)时同样可以再提取出部分可提取态Cd,将上述2个提取液中测定的Cd质量分数相加可以获得水稻根表Cd质量分数(水稻根表Cd质量分数=根表总Cd量/根系重量),根系Cd质量分数为根表Cd质量分数和经上述2步提取后的根系消解测得的Cd质量分数之和。

土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性测定分别采用苯酚钠-次氯酸钠靛酚蓝比色法、对硝基苯磷酸二钠法和比色法^[12]。

1.4 数据分析

试验所有数据均采用3次重复的平均值±标准偏差来表示,数据采用SAS 9.2进行统计分析,利用最小显著差法(LSD)进行均值比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻地上部干物质量的影响

表1为坡缕石钝化修复下不同基因型水稻品种地上部干物质量。由表1可见,对于2个水稻品种,稻草干物质量均显著高于稻谷干物质量;比较2种不同类型水稻品种的地上部干物质量可以发现,常规水稻品种T优272的地上部干物质量明显高于低Cd吸收水稻品种丰优9号,其中CK下,T优272稻谷干物质量比丰优

表1 添加坡缕石钝化修复下不同基因型水稻品种地上部干物质量

品种	处理	稻谷质量分数/(g·盆 ⁻¹)	稻草质量分数/(g·盆 ⁻¹)
丰优9号	CK	25.03±1.60 c	33.10±2.45 a
	PL1F	27.60±2.40 b	32.75±1.83 ab
	PL2F	26.52±1.20 b	32.21±2.54 b
	PL3F	30.86±1.82 a	33.34±1.53 a
T优272	CK	27.01±2.16 c	39.63±3.50 bc
	PL1T	27.38±1.95 bc	38.76±2.00 c
	PL2T	28.90±1.47 ab	40.03±2.90 b
	PL3T	30.02±2.59 a	43.31±2.42 a

注 同列中相同水稻品种下不同小写字母表示差异达到5%显著水平,下同。

坡缕石钝化修复后,稻谷干物质量的增加表明钝化修复减轻了重金属Cd对水稻的毒害作用,改善了土壤环境质量,有利于水稻的生长。农作物可食部产量是农业生产中关注的重要指标,坡缕石钝化修复对稻谷干物质量无明显不利影响而且还有一定的促进作用。

2.2 不同处理对土壤pH值和有效态Cd质量分数的影响

土壤对重金属Cd的吸附随pH值降低而减弱,移动性变大,随着pH值升高,土壤吸附重金属Cd的能力增强,形成重金属Cd的碳酸盐和氢氧化物沉淀,土壤重金属Cd的有效性下降。表2所示为坡缕石钝化处理下土壤pH值和有效态Cd质量分数。由表2可知,在种植丰优9号品种下,与CK相比,随着坡缕石添加量的不断增加,土壤pH值逐渐升高。与CK相比,在PL1T和PL2T处理下,随着坡缕石添加量的增加,土壤pH值逐渐升高。然而,PL3T处理的土壤pH值略有降低,但仍然比CK增加0.47,与PL2T处理时的土壤pH值相差0.06,二者间并无显著性差异。表明土壤pH值并不随着坡缕石添加量的增加而无限升高。但在种植T优272和丰优9号品种的情况下,与CK相比,添加坡缕石钝化修复土壤的pH值分别增加0.40~0.53和0.33~0.46。说明种植常规水稻品种T优272时土壤pH增加幅度要大于种植低Cd吸收品种丰优9号,但种植丰优9号品种的土壤pH值总体上要高于T优272。

由表2可知,土壤有效态Cd质量分数与pH值的变化趋势相反。随着坡缕石添加量的逐渐增大,土壤有效态Cd质量分数总体呈不断下降的趋势。PL2F处理土壤有效态Cd质量分数降幅最大,较CK降低13.59%;而PL3T处理土壤有效态Cd质量分数降幅最大,较CK降低25.08%。说明2种水稻品种对土壤重金属Cd有效性影响差异显著。统计相关分析表明,土壤pH值与有效态Cd质量分数呈显著负相关关系($r = 0.52, P < 0.05$)。

试验采用的钝化修复材料坡缕石属于弱碱性黏土矿物材料,添加坡缕石后能够使土壤pH值提高0.33~0.53,土壤pH值是影响土壤中Cd的形态和有效性的重要因素,提高土壤pH值,会增加土壤胶体负电荷,促进土壤胶体和黏粒对重金属Cd离子的吸附,使重金属Cd被结合得更牢固,且多以难溶的氢氧化物或碳酸盐及磷酸盐的形式存在,大大降低土壤重金属Cd的有效性和可迁移性。另外,坡缕石特殊的结构导致其对重金属Cd的吸附机制主要为硅氧四面体外缘存在的大量Si-OH可以与重金属Cd离子形成稳定的内层络合化学吸附或者非稳定的外层络合物物理吸附。

2.3 不同处理对水稻地上部镉质量分数的影响

表3所示为坡缕石钝化处理下2种水稻品种地上部镉质量分数。由表3可见,对于丰优9号品种,水稻地上部Cd质量分数整体上按稻草、稻壳、稻米的次序逐级递减,其中,稻壳Cd质量分数与稻米Cd质量分数基本相当。土壤添加不同量的坡缕石后,稻草、稻壳和稻米Cd质量分数显著下降,随着坡缕石添加量的不断增加,水稻地上部Cd质量分数降幅逐渐增大。与CK相比,PL1F、PL2F和PL3F处理稻米、稻壳和稻草中

9号高7.91%;而坡缕石钝化修复下,除PL2处理下T优272稻谷干物质量比丰优9号高8.97%,差异显著,其他钝化修复下,T优272稻谷干物质量与丰优9号无显著差异。但无论CK还是钝化修复下,T优272稻草干物质量均比丰优9号高,其中CK、PL1、PL2和PL3处理下,T优272稻草干物质量分别比丰优9号高19.58%、18.35%、24.28%和29.90%。说明坡缕石钝化修复下,T优272稻草干物质量显著高于丰优9号,试验也说明低Cd吸收水稻品种稻谷干物质量一般比常规水稻低。土壤添加

表2 坡缕石钝化处理下土壤pH值和有效态Cd质量分数

品种	处理	pH值	有效态Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)
丰优9号	CK	6.03±0.48 b	0.64±0.03 a
	PL1F	6.36±0.30 a	0.58±0.04 b
	PL2F	6.45±0.42 a	0.51±0.02 c
	PL3F	6.49±0.50 a	0.53±0.03 c
T优272	CK	5.91±0.27 c	0.68±0.05 a
	PL1T	6.31±0.43 b	0.61±0.04 b
	PL2T	6.44±0.35 a	0.58±0.02 c
	PL3T	6.38±0.56 a	0.51±0.04 d

Cd质量分数的降幅分别可达20.51%~51.28%、16.67%~38.10%和18.33%~45.83%。其中在试验土壤总Cd质量分数1.10 mg/kg下,PL3F处理稻米Cd质量分数为0.19 mg/kg,低于食品安全国家标准食品中污染物限量规定的谷物中Cd的限量值(0.20 mg/kg)。

表3 坡缕石钝化处理下不同基因型水稻品种地上部镉质量分数

品 种	处 理	稻米Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)	稻壳Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)	稻草Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)
丰优9号	CK	0.39±0.042 a	0.42±0.043 a	1.19±0.11 a
	PL1F	0.31±0.040 b	0.35±0.040 b	0.98±0.093 b
	PL2F	0.26±0.036 c	0.30±0.035 c	0.77±0.072 c
	PL3F	0.19±0.035 d	0.26±0.033 d	0.65±0.069 d
T优272	CK	0.56±0.061 a	0.58±0.071 a	1.38±0.23 a
	PL1T	0.47±0.053 b	0.50±0.068 b	1.16±0.021 b
	PL2T	0.37±0.046 c	0.40±0.061 c	0.98±0.018 c
	PL3T	0.35±0.044 d	0.35±0.056 d	0.92±0.017 d

由表3可见,对于T优272品种,CK糙米Cd质量分数为0.56 mg/kg,远远超过食品安全国家标准食品中污染物限量规定的谷物中Cd的限量值0.2 mg/kg。PL1T、PL2T和PL3T处理糙米Cd质量分数最大降幅为37.50%,PL3T处理糙米Cd质量分数为0.35 mg/kg,低于国际食品法典委员会标准Codex Stan 2010中规定的糙米Cd最大限量值(0.40 mg/kg),但仍然高于食品安全国家标准食品中污染物限量规定的谷物中Cd的限量值(0.20 mg/kg)。通过计算2种水稻品种的稻草/稻米Cd质量分数比值可以发现,稻草/稻米Cd质量分数比按照丰优9号、T优272的次序逐级递减,而重金属Cd由稻草向稻米的转移能力相应逐步增加。表明与常规杂交稻T优272相比,低Cd吸收品种丰优9号中重金属Cd由稻草至稻米的转移能力明显降低,说明杂交稻对Cd吸收累积能力较强。

水稻体内Cd累积量方面,与常规水稻品种T优272相比,土壤坡缕石钝化修复下,低Cd吸收品种丰优9号稻米中Cd质量分数显著低于T优272。然而,与CK相比,钝化修复的稻米Cd质量分数降幅要高于T优272,这与韩君等^[13]研究结论一致。但不同的是,相同土壤坡缕石钝化修复下,盆栽试验同一水稻品种稻米Cd质量分数降幅要低于田间试验条件下获得的相应结果。究其原因,可能是盆栽试验条件下,水稻根系生长在盆中重金属Cd污染土壤小环境范围内,根系紧密缠绕在一起,影响了水稻根系对土壤Cd的吸收^[14]。此外,不同水稻品种由于遗传上的差异,有可能造成水稻根系的形态和生理活性、根表氧化膜以及重金属Cd从水稻根系向地上部转运能力的较大区别,导致不同水稻品种对重金属Cd的吸收累积存在显著的基因型差异^[15]。水稻籽粒的Cd质量分数还受水稻品种的基因型、环境、基因型和环境互作3个方面的影响^[16]。而水稻根系是吸收土壤重金属Cd进入地上部的重要节点,根系与土壤环境相互作用所引起根际环境的不同会影响水稻对Cd的吸收^[17],本文研究结论也证明了这点。同时高Cd累积水稻品种可能与体内重金属Cd转运蛋白基因的较高表达能力有关^[18]。有可能导致不同水稻品种间稻米Cd质量分数变化极其显著^[19]。一般情况下,超级稻吸收累积的Cd量要明显高于普通杂交稻品种^[20]。常规稻和杂交稻间重金属Cd量差异累积不显著,但三系杂交稻糙米Cd积累量高于二系杂交稻^[21]。因此,水稻对重金属Cd的吸收积累,受品种类型和遗传背景的影响较大。

2.4 不同处理对水稻根表铁和镉及根系镉质量分数的影响

作为淹水作物的水稻,其根表具有较强的输氧能力,根表铁胶膜的形成是水稻区别于其他大田谷类作物的明显特征之一。而且,根表铁对水稻养分、重金属等元素的吸收均有重要影响。表4所示为坡缕石钝化修复下2种水稻根表Fe和Cd及根系Cd质量分数。由表4可见,土壤未钝化修复和添加坡缕石钝化修复时,低Cd吸收品种丰优9号的根表Fe(II)和Fe(III)质量分数整体上高于常规杂交稻T优272,其中CK和PL1、PL2和PL3处理下,丰优9号根表Fe(II)质量分数比T优272分别增加19.07%、19.91%、15.01%和16.37%,丰优9号根表Fe(III)质量分数比T优272分别增加6.40%、5.74%、4.62%和5.88%。2个水稻品种间根表Fe(III)质量分数的差异不明显,而根表Fe(II)质量分数差异显著。说明水稻品种的根系输氧、氧化能力不同,显然丰优9号品种的根系氧化能力较T优272品种强。

由表4可见,土壤添加坡缕石钝化修复后,水稻根表Fe(II)质量分数显著增加,而根表Fe(III)质量分数并无明显变化。相关分析表明,水稻根表Fe(II)和根表和根系Cd质量分数呈显著负相关关系。试验结果

显示,CK和PL1、PL2及PL3处理下,丰优9号根表Cd质量分数比T优272分别降低28.57%、33.93%、48.48%和58.59%,丰优9号根系Cd质量分数比T优272则分别降低20.39%、18.69%、13.78%和23.90%,而水稻根部Cd质量分数与稻米Cd质量分数呈显著正相关关系。由此导致丰优9号稻米Cd质量分数明显低于T优272。

表4 坡缕石钝化处理下不同基因型水稻品种根表铁和镉及根系镉质量分数 mg/kg

品种	处理	根表Fe(II)质量分数	根表Fe(III)质量分数	根表Cd质量分数	根系Cd质量分数
丰优9号	CK	668±7.51 c	1761±89.5 a	1.89±0.09a	3.58±0.34 a
	PL1F	801±28.90 b	1788±107.56 a	1.68±0.12 a	3.21±0.21 ab
	PL2F	958±17.35 a	1766±102.83 a	1.32±0.08 b	2.83±0.43 b
	PL3F	995±12.17 a	1801±84.30 a	1.28±0.12 b	2.51±0.42 b
T优272	CK	561±6.35 c	1655±55.41 a	2.43±0.14 a	4.31±0.22 a
	PL1T	668±12.10 b	1691±75.18 a	2.25±0.11 ab	3.81±0.31 ab
	PL2T	833±11.26 a	1688±61.15 a	1.96±0.12 b	3.22±0.34 b
	PL3T	855±13.72 a	1701±57.72 a	2.03±0.11 b	3.11±0.13 b

分析试验结果可以发现,低Cd吸收水稻品种丰优9号根表Fe(II)质量分数明显高于T优272,水稻根表Fe(II)与根表Cd质量分数显著负相关,糙米Cd和根表Cd质量分数同样显著正相关。研究认为^[22],水稻根表Fe(II)膜的形成对根系吸收土壤重金属Cd起到重要阻碍作用,可能是因为Cd²⁺与Fe²⁺在根表的竞争吸附作用导致了根表Cd质量分数的下降,由此导致通过根表进入水稻地上部的Cd质量分数随之下下降。此外,Kuo等^[23]认为,重金属Cd与根表Fe(II)膜共沉淀或被其吸附是土壤重金属Cd有效性降低的重要原因之一。

2.5 不同处理对土壤酶活性的影响

表5所示为2个水稻品种种植下坡缕石钝化处理土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性及碱解氮与有效磷有效性。由表5可见,重金属Cd污染土壤经坡缕石钝化修复后,土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶的活性都有不同程度的升高,总体上看,土壤酶活性随着坡缕石添加量的增加而逐步升高。而且种植T优272品种的土壤酶活性整体上高于丰优9号,可能因不同水稻品种根系分泌物对土壤理化性质的不同影响所致。与CK相比,PL1F、PL2F和PL3F处理的脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性分别增加45.45%~63.64%、40.97%~80.97%和12.03%~63.39%;PL1T、PL2T和PL3T处理的脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性分别增加30.77%~46.15%、39.10%~75.52%和12.72%~61.59%。说明土壤酶活性受添加坡缕石钝化修复影响显著,而种植的水稻品种对土壤酶活性影响无明显差异。

表5 不同处理土壤酶活性和土壤氮磷有效性 mg/g

品种	处理	脲酶质量分数	酸性磷酸酶质量分数	蔗糖酶质量分数	碱解氮质量分数	有效磷质量分数
丰优9号	CK	0.11±0.006 c	3.10±0.19 d	11.80±0.90 c	196.03±9.30 c	11.30±0.67 b
	PL1F	0.16±0.010 b	4.37±0.22 c	13.22±0.80 b	187.92±7.90 c	10.52±0.49 bc
	PL2F	0.18±0.011 a	5.36±0.27 a	19.28±1.02 a	201.10±13.06 bc	9.53±0.60 c
	PL3F	0.18±0.012 a	5.61±0.34 a	18.80±1.10 ca	195.31±10.30 c	9.26±0.72 d
T优272	CK	0.13±0.006 c	3.35±0.23 c	13.12±0.90 c	212.06±8.06 bc	12.20±0.56 b
	PL1T	0.17±0.08 b	4.66±0.25 b	14.79±0.78 b	200.87±12.30 c	11.10±0.80 c
	PL2T	0.19±0.012 a	5.41±0.30 a	21.20±1.83 a	223.06±9.14 b	9.86±0.58 d
	PL3T	0.19±0.010 a	5.88±0.31 a	20.33±1.53 a	208.91±15.03 bc	9.81±0.46 d

注 样品溶液培养24 h以后测定。

2.6 不同处理对土壤氮磷有效性的影响

由表5可见,在PL1、PL2和PL3处理下,土壤碱解氮无显著差异。与CK相比,随着土壤坡缕石添加量的增加,土壤有效磷质量分数呈逐渐降低趋势,PL1F、PL2F和PL3F处理土壤有效磷质量分数分别降低7.08%、15.66%和18.08%,PL1T、PL2T和PL3T处理土壤有效磷质量分数分别降低9.02%、19.18%和19.59%。说明添加坡缕石在一定程度上可以降低土壤有效磷质量分数,特别是PL2和PL3处理与CK差异显著,但2个水稻品种间并无显著性差异。

3 结论与讨论

试验表明Cd污染酸性水稻土添加坡缕石钝化修复后,可以改善土壤环境质量,有利于水稻的生长。其中,常规水稻品种T优272稻草干物质量显著高于低Cd吸收品种丰优9号,而稻谷干物质量2个品种间差异并不显著。土壤添加不同量的坡缕石钝化修复后,稻米、稻壳和稻草Cd质量分数均呈现不同程度的降低。与常规水稻品种T优272相比,土壤坡缕石钝化修复下,低Cd吸收品种丰优9号稻米Cd质量分数显著低于T优272。这与李坤全等^[2]及LIU等^[15]研究结果一致。然而,与CK相比,钝化修复丰优9号稻米Cd质量分数降幅要高于T优272,这与韩君等^[13]研究结果相似。其中在试验土壤总Cd质量分数1.10 mg/kg下,PL3F处理稻米Cd质量分数由0.39 mg/kg降低到0.19 mg/kg,低于食品安全国家标准规定的稻米Cd最大限量值(0.20 mg/kg);而PL3T处理的稻米Cd质量分数则由0.56 mg/kg降低到0.35 mg/kg。说明添加坡缕石钝化修复时,种植低Cd吸收水稻品种可以更好地降低水稻糙米中的Cd累积量。试验发现低Cd吸收水稻品种丰优9号根表Fe(II)质量分数明显高于T优272,水稻根表Fe(II)与根表Cd质量分数显著负相关,糙米Cd和根表Cd质量分数同样显著正相关,这可能是导致低Cd吸收水稻品种稻米Cd低于常规水稻品种T优272的原因之一,与刘敏超等^[24]研究结果一致。主要原因是水稻根表Fe(II)膜质量分数的增加,阻碍了根系对Cd的吸收,同时Cd²⁺与Fe²⁺在根表的竞争吸附作用,导致水稻地上部对Cd吸收能力的下降。土壤添加坡缕石钝化修复后,2种水稻根表Fe(II)质量分数显著增加,而根表Fe(III)质量分数并无明显变化,这主要是因为坡缕石呈碱性,添加后土壤pH值升高,造成土壤还原性增强,导致水稻根表Fe(II)质量分数增加。

添加坡缕石钝化修复后,土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶的活性都有不同程度的升高。土壤酶活性受添加坡缕石钝化修复影响显著,而种植的水稻品种对土壤酶活性无明显影响。此外,坡缕石钝化修复对土壤碱解氮质量分数无明显影响,但在一定程度上可以降低土壤有效磷质量分数,特别是在添加中高量坡缕石钝化修复时,土壤有效磷质量分数与CK相比降低显著,但2个水稻品种间并无显著差异。这与韩君等^[13]和袁东海等^[25]研究结果一致。其主要原因是添加坡缕石可以吸附土壤溶液中的磷元素,其吸附的磷元素大部分转化为Ca₈-P、Ca₁₀-P、Fe-P和Al-P等难溶的磷酸盐,从而会减少有效态磷质量分数。

综上所述,重金属Cd污染酸性土壤添加坡缕石后有利于土壤环境质量的恢复,能够有效地降低土壤重金属Cd活性,提高水稻根表铁膜量,抑制重金属Cd从水稻根系向地上部的运移,降低稻米Cd累积量。同时有利于土壤酶活性的恢复,对土壤有效氮质量分数无明显影响,但对有效磷质量分数有降低作用。因此,在Cd污染酸性水稻土添加坡缕石钝化修复时,适当配施一定量磷肥,补充因钝化修复造成的土壤有效磷减少,可以更好地保障农作物的正常生长。

参考文献:

- [1] 李正文,张艳玲,潘根兴,等.不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄入风险[J].环境科学,2003,24(3):112-115.
- [2] 李坤全,刘建国,陆小龙,等.水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J].农业环境科学学报,2003,22(5):529-532.
- [3] LIANG X Y, HAN J, XU Y M, et al. Insitu field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite[J]. Geoderma, 2014, 235-236: 9-18.
- [4] 梁学峰,韩君,徐应明,等.海泡石及其复配原位修复镉污染稻田[J].环境工程学报,2015(9):4 571-4 577.
- [5] BEESLEY L, MARMIROLI M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 474-480.
- [6] SUN Y B, SUN G H, XU Y M, et al. Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium contaminated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166: 204-210.
- [7] 孙国红,李剑春,徐应明,等.不同水分管理下镉污染红壤钝化修复稳定性及其对氮磷有效性的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2 105-2 113.
- [8] SUN Y B, SUN G H, XU Y M, et al. Assessment of natural sepiolite on cadmium stabilization, microbial communities, and enzyme activities in acidic soil[J]. Environment Science Pollution Resource, 2013, 20: 3 290-3 299.
- [9] 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.
- [10] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-850.
- [11] 龚琦.盐酸羟胺-柠檬酸体系提取土壤中的游离氧化铁[J].岩矿测试,1998,17(4):299-302.
- [12] 杨兰芳,曾巧,李海波,等.紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J].土壤通报,2011,42(1):202-210.
- [13] 韩君,梁学峰,徐应明,等.黏土矿物原位修复镉污染稻田及其对土壤氮磷和酶活性的影响[J].环境科学学报,2014,34(11):2 853-2 860.

- [14] BENZARTI S, MOHRI S, ONO Y. Plant response to heavy metal toxicity: comparative study between the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (ecotype ganges) and nonaccumulator plants: lettuce, radish, and alfalfa[J]. *Environmental Toxicology*, 2008, 23: 607-616.
- [15] LIU J G, LIANG J S, LI K Q, et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1 467-1 473.
- [16] 程旺大. 水稻籽粒有毒重金属含量的基因型和环境效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [17] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 等. 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(4): 1 994-2 006.
- [18] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻镉吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44(3): 360-365.
- [19] 蒋彬, 张慧萍. 水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J]. *云南师范大学学报*, 2002, 22(3): 37-40.
- [20] 龚伟群, 李恋卿, 潘根兴. 杂交水稻对镉的吸收与籽粒积累: 土壤和品种的交互影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1 647-1 653.
- [21] 殷敬峰, 李华兴, 卢维盛, 等. 不同品种水稻糙米对Cd Cu Zn积累特性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 844-850.
- [22] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3 930-3 939.
- [23] KUO S. Concurrent sorption of phosphate and zinc, cadmium or calcium by a hydrous ferric oxide[J]. *Soil Science of American Progress*, 1986, 35: 722-725.
- [23] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 等. 不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(5): 592-596.
- [23] 袁东海, 张孟群, 高士祥, 等. 几种粘土矿物和粘粒土壤吸附净化磷素的性能和机理[J]. *环境化学*, 2005, 24(1): 7-11.

Effects of Immobilization Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Soil on Cadmium Accumulation and Soil Properties in Different Rice Varieties

SUN Guohong¹, LI Jianrui^{2,3}, LIANG Xuefeng³, HUANG Qingqing³, XU Yingming³

(1. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;
2. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 3. Innovative Team of Remediation for Heavy Metal Contaminated Farmland, Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to study the difference of the accumulation of Cd in different rice varieties under palygorskite immobilization remediation of cadmium contaminated paddy soil, pot experiments were conducted to investigate the effect of palygorskite immobilization remediation of cadmium contaminated paddy soil on Cd accumulation in different rice varieties, and soil enzyme activity and nitrogen and phosphorus availability. The results showed that T You 272 rice biomass was 7.91% higher than the Feng You 9 rice, but there was no statistically significant difference. Under palygorskite immobilization remediation, the soil pH values of planting T You 272 and Feng You 9 were increased by 0.33~0.46 and 0.40~0.53, respectively. Under PL1F, PL2F and PL3F treatment, the maximum decrease of soil available Cd was 13.59%, and the Cd of brown rice was decreased by 20.51%~50.28%, and the Cd content of brown rice under PL3F treatment was 0.19 mg/kg. In addition, the maximum decrease of soil available Cd was 25.08%, and the maximum reduced of brown rice Cd was 37.50% under PL1T, PL2T and PL3T treatment, and the Cd content of brown rice under PL3T treatment was 0.35 mg/kg. The soil enzyme activity was increased gradually with the increase of the amount of palygorskite added, and the soil enzyme activity of T You 272 was higher than that of Feng You 9. With the increase of the amount of palygorskite added, the soil alkali solution nitrogen had no significant difference in different treatments, but the content of available phosphorus in soil decreased gradually. Compared with CK, the contents of soil available phosphorus under PLF and PLT treatments could be decreased by 7.08%~18.08% and 9.02%~19.59%, respectively. The research results could provide the scientific basis for immobilization remediation of cadmium contaminated paddy soil combined with low Cd accumulation of rice varieties.

Key words: palygorskite; cadmium; soil; immobilization remediation; rice; genotype difference.

责任编辑: 陆红飞