

钙镁水滑石对双季稻产量及稻米镉积累的影响

田琴琴¹, 张菲婷¹, 陈娜娜¹, 郑德超¹,
吴思¹, 邓骅¹, 吴小京², 喻鹏³, 易镇邪¹

(1.湖南农业大学农学院,长沙 410128;2.郴州市农作物种子储备和技术推广站,
湖南 郴州 423000;3.湖南农业大学化学与材料科学学院,长沙 410128)

摘要:为研究不同用量钙镁水滑石对镉污染稻田土壤特性、双季稻产量与稻米镉积累的影响,探讨镉污染双季稻田钙镁水滑石的最佳施用方式。2021 年,以早稻品种“湘早籼 45 号”和“陆两优 996”,晚稻品种“创两优 669”和“玉针香”为试验材料,在湖南省郴州市良田镇重度镉污染稻田(全镉含量 1.16 mg/kg)开展大田试验,比较研究钙镁水滑石(0,CK;早稻基施 3 000 kg/hm²,T1;早稻基施 1 500 kg/hm²,T2;早稻基施 750 kg/hm²+晚稻基施 750 kg/hm²,T3)4 个处理下土壤特性、双季稻产量构成与植株镉积累情况。结果表明:(1)钙镁水滑石可提高土壤 pH 与碱解氮、速效钾、速效磷含量,早稻成熟期分别提高 0~3.06%,4.30%~13.80%,6.67%~40.00%,25.53%~30.47%;晚稻成熟期分别提高 1.56%~4.07%,11.79%~14.50%,15.79%~31.58%,3.73%~17.17%;增幅表现为 T1>T2>T3。(2)施用钙镁水滑石可降低土壤有效镉含量,早、晚稻成熟期各降低 5.26%~42.86%,18.19%~36.84%;降幅表现为 T1>T2>T3。(3)糙米镉含量和成熟期植株地上部镉积累量以 T1 最低,T2、T3 次之,CK 最高,“湘早籼 45 号”分别降低 33.33%~44.44%,4.89%~20.76%;“陆两优 996”分别降低 30.00%~60.00%,6.00%~30.98%;“玉针香”分别降低 27.78%~50.00%,15.93%~34.07%;“创两优 669”分别降低 26.67%~60.00%,12.58%~28.56%。(4)钙镁水滑石使早、晚稻产量分别提高 4.11%~10.79%,1.69%~11.29%。“湘早籼 45 号”、“创两优 669”和“玉针香”产量以 T1 处理最高,陆两优 996 产量以 T2 处理最高,除玉针香外,各品种 T1 和 T2 处理产量差异不显著。可见,较大的钙镁水滑石施用量对水稻的增产、降镉效果较好,但综合考虑处理间水稻产量与镉含量差异的显著性及钙镁水滑石成本,以钙镁水滑石 1 500 kg/hm²较为适宜。

关键词: 双季稻; 钙镁水滑石; 产量构成; 镉含量; 镉积累量; 土壤有效镉

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0353-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.045

Effect of Calcium Magnesium Hydrotalcite on Yield and Cadmium Accumulation of Double Cropping Rice

TIAN Qinqin¹, ZHANG Feiting¹, CHEN Nana¹, ZHENG Dechao¹, WU Si¹,
DENG Hua¹, WU Xiaojing², YU Peng³, YI Zhenxie¹

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2.Chenzhou Crop Seed Storage and Technology Extension Station, Chenzhou, Hunan 423000;

3.College of Chemistry and Materials Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to study the effects of different amounts of calcium and magnesium hydrotalcite on the soil characteristics of cadmium-contaminated rice fields, the yield of double cropping rice and the cadmium accumulation in rice, and to explore the best application mode of calcium and magnesium hydrotalcite in cadmium contaminated double cropping rice fields, in 2021, field experiments were conducted in the heavy cadmium contaminated rice fields (total cadmium content 1.16 mg/kg) in Liangtian Town, Chenzhou City, Hunan Province, using early rice varieties Xiangzaoxian 45 and Luliangyou 996, late rice varieties Chuang Liangyou 669 and Yuzhenxiang as experimental materials, The soil characteristics, yield components and

收稿日期:2022-10-03

资助项目:青海省重点研发与转化计划项目(2021-GX-172)

第一作者:田琴琴(1994—),女,在读硕士生,主要从事作物高产高效栽培理论与技术研究。E-mail:2388355332qq.com

通信作者:喻鹏(1974—),男,博士,教授,主要从事农业污染重金属修复及其再利用研究。E-mail:pengy7505hunau.edu.cn

易镇邪(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事作物高产生理与资源高效利用研究。E-mail:yizhenxie126.com

cadmium accumulation of double cropping rice under four treatments of calcium magnesium hydrotalcite (0, CK; early rice basal application of 3 000 kg/hm², T1; early rice basal application of 1 500 kg/hm², T2; early rice basal application of 750 kg/hm²; late rice basal application of 750 kg/hm², T3) were compared. The results showed that: (1) The application of calcium magnesium hydrotalcite could increase the soil pH and the contents of alkali hydrolyzable nitrogen, available potassium, and available phosphorus, respectively by 0~3.06%, 4.30%~13.80%, 6.67%~40.00%, and 25.53%~30.47% at the maturity of early rice, respectively, and 1.56%~4.07%, 11.79%~14.50%, 15.79%~31.58%, 3.73%~17.17% at the maturity of late rice, showing a trend of T1 > T2 > T3. (2) Application of calcium and magnesium hydrotalcite could reduce the content of available cadmium in soil. The content of available cadmium in early and late rice ripening stages was reduced by 5.26%~42.86% and 18.19%~36.84% respectively, with a trend of T1 > T2 > T3. (3) The content of cadmium in brown rice and the accumulation of cadmium in the upper part of plant at maturity were the lowest in T1, the second in T2 and T3, and the highest in CK. The content of cadmium in Xiangzaoxian 45 decreased by 33.33%~44.44% and 4.89%~20.76% respectively, that in Luliangyou 996 decreased by 30.00%~60.00% and 6.00%~30.98% respectively, that in Yuzhixiang decreased by 27.78%~50.00% and 15.93%~34.07% respectively, and that in Chuang Liangyou 669 decreased by 26.67%~60.00% and 12.58%~28.56% respectively. (4) The yield of double cropping rice Xiangzaoxian 45, Chuang Liang You 669 and Yuzhen Xiang was the highest in T1, followed by T2 and T3, and the lowest was in CK; The yield of Luliangyou 996 was the highest in T2 treatment, the second in T1 and T3 treatment, and the lowest in CK treatment. Calcium magnesium hydrotalcite increased the yield of early and late rice by 4.11%~10.79% and 1.69%~11.29%, respectively. This experiment shows that the larger application amount of calcium magnesium hydrotalcite has a better effect on rice yield increase and cadmium reduction, but considering the significance of rice yield and cadmium content difference between treatments and the cost of calcium magnesium hydrotalcite, 1 500 kg/hm² calcium magnesium hydrotalcite is more appropriate under this experiment condition.

Keywords: double cropping of rice; calcium magnesium hydrotalcite; yield composition; cadmium content; cadmium accumulation; available cadmium in soil

近年来,大量化肥农药的使用导致土壤酸化、肥力下降;工业废物、生活垃圾等造成土壤重金属含量超标^[1],其中,湖南省最为严重,土壤平均 Cd 含量达 0.73 mg/kg^[2]。稻田土壤中重金属通过土壤—作物系统在植株体内积累、迁移和转化进入食物链,对人畜健康构成威胁^[3]。因此,镉污染稻田修复问题值得关注。

目前,水稻控镉技术已成为农业领域的研究热点,国内外学者在土壤调理剂降低土壤镉有效性等方面已开展较多研究。钙镁水滑石是最新开发的一种以氧化钙、氧化镁等天然矿物为原料,富含丰富钙、钾、镁等有效养分的新颖土壤调理剂,其在镉污染稻田的应用效果尚无报道。但已有硅钙镁、牡蛎壳粉等类似产品施用效果的报道^[4-6]发现,此类物质的主要作用是提高土壤 pH,降低土壤有效镉含量;增加土壤养分含量,提高水稻产量;降低稻米镉含量和镉积累量^[7-9]。

我国是世界最大的稻米生产国和消费国,水稻在保障我国粮食安全中担当第一重任,对确保世界粮食安全也具有举足轻重的作用^[10]。湖南作为我国水稻

主产区之一,若施用钙镁水滑石能够降低镉污染稻田土壤有效镉的同时,还能够使水稻增产,将有利于农业的绿色可持续发展。然而,钙镁水滑石作为一种新型的土壤调理剂,尚无相关研究报道。以镉污染稻田为研究对象,通过研究钙镁水滑石不同施用量对双季稻产量及镉积累的影响,明确钙镁水滑石的应用效果及其最佳施用量,旨在为南方镉污染稻田的安全利用提供科学支撑,为构建镉污染稻田“高产、高效、低镉”生产技术奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

早稻品种为“湘早籼 45 号”“陆两优 996”;晚稻品种为“玉针香”“创两优 669”。试验于 2021 年 4—11 月在湖南省郴州市苏仙区良田镇进行。试验地土壤 pH 为 6.05,有机质、全氮、全磷分别为 55.86,1.95,1.08 g/kg,全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、全镉和有效镉含量分别为 13.40,189.35,56.52,190.00,1.16,0.35 mg/kg。

供试土壤调理剂为江苏隆昌化工公司研制生产的

钙镁水滑石,白色粉末状,高分子化合物材料,能吸附土壤中重金属镉。养分含量为 $\text{CaO} \geq 28.0\%$, $\text{Ca} \geq 18.0\%$, 水分 $\leq 10.0\%$, pH 为 10.5~12.5; 有害金属物质的含量均在标准范围内: $\text{Hg} \leq 5 \text{ mg/kg}$, $\text{As} \leq 10 \text{ mg/kg}$, $\text{Pb} \leq 50 \text{ mg/kg}$, $\text{Cd} \leq 10 \text{ mg/kg}$, $\text{Cr} \leq 50 \text{ mg/kg}$ 。

1.2 试验设计

采用随机区组设计开展双季稻田田间试验,设置4个处理,不施用钙镁水滑石(CK),早稻季一次性基施钙镁水滑石 $3\,000 \text{ kg/hm}^2$ (T1),早稻季一次性基施钙镁水滑石 $1\,500 \text{ kg/hm}^2$ (T2),早晚稻季一次性基施钙镁水滑石 750 kg/hm^2 (T3)。每个处理3次重复,共12个小区,每个小区2个品种,小区面积 20 m^2 。试验田四周设 1.5 m 宽保护行,小区之间做田埂,用薄膜包裹压至犁底层。

早稻品种于2021年3月20日播种,4月27日移栽,晚稻品种于6月24日播种,7月20日移栽,插秧密度均为 $16.7 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。杂交稻每穴2根苗,常规稻每穴3根苗。钙镁水滑石于插秧前一周施入土壤并翻耕至犁底层,施肥方案按照当地施肥习惯,基肥施复合肥(N:P₂O₅:K₂O 比例为 15:15:15) 600 kg/hm^2 ,分蘖盛期追施尿素(含氮 46.4%) 150 kg/hm^2 。所有小区水分管理一致,单灌单排。分蘖期保持浅水层,分蘖末期晒田,孕穗期以后保持 3~5 cm 水层,收获期 10 天左右断水。早晚稻均于破口抽穗期亩施 5%阿维菌素 $1\,000 \text{ mL}$ 防治钻心虫,在分蘖期和孕穗期喷 450 kg/hm^2 50%吡蚜酮和杀虫双防治稻飞虱和稻纵卷叶螟。其他管理措施与一般大田相同。

1.3 测定项目与方法

实际产量:水稻成熟后取3点测实际产量,每个点割80蔸,脱粒后去除稻草及空粒,称量谷重,用烘干法测含水率^[11]。

产量构成因素:水稻成熟后各小区数80蔸水稻的有效穗数,计算单穴平均有效穗数,每小区按单穴平均有效穗数取5蔸,带回室内考种,考察每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重,计算理论产量^[11]。

水稻植株镉含量和积累量:在早晚稻成熟期采用5点取样法对各小区进行水稻样品的采集,将收获的稻米,用去离子水冲洗,在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min,然后在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒质量,将植物样品粉碎备用,稻米 Cd 含量用微波消解—原子吸收分光光度法测定,分析过程中以食品安全国家标准食品中镉的测定(GB/T 5009.15—2014)^[12],检出限为 0.001 mg/kg ,Cd 的回收率在 97%~106%,同时做空白试验,每个处理重复3次。

土壤有效镉含量:于水稻耕作施肥前、分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆中期、成熟期按5点取样法取 0—20 cm 土样,自然风干磨碎过 10 目筛备用,以 DTPA 为提取剂,称取 5.00 g 风干土样,置于 150 mL 三角瓶中,保鲜膜封口,准确加入 25 mL DTPA 提取剂, $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 振荡 2 h,干过滤,最初 5~6 mL 滤液弃去,滤液用原子吸收分光光度计测定有效态镉含量,每处理重复3次^[12]。

土壤全镉含量:称取成熟期土样 $0.100\,0 \text{ g}$ (过 100 目筛)于坩埚中,加入 5 mL 硝酸, 2 mL 高氯酸盖过夜。第2天开石墨炉前加氢氟酸 4 mL ,开炉,设定温度 $160 \text{ }^\circ\text{C}$,加热 40~60 min(从开始加热计算),调节温度至 $190 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热 3~4 h,开盖除硅, 20~30 min 摇动 1 次,加热 2 h 左右至剩余少量液体,盖盖,关风机。升温至 $220 \text{ }^\circ\text{C}$,加热 4~5 h(在此过程中需摇动 1 次,效果较好,但不能漏气)。开盖,摇动煮至黏稠状,取下稍冷,用超纯水溶解,洗入 50 mL 容量瓶中,盖子和坩埚均清洗 3 次以上,定容,摇匀。用微孔滤膜过滤到 10 mL 离心管中,最初滤液 5~6 mL 弃去,待上机检测(无须稀释,所采用药品均为优级纯)^[12]。

土壤 pH:于早、晚稻的分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆中期、成熟期用五点取样法取 0—20 cm 土样,自然风干后过 20 目筛备用,用 pH 计(雷磁 PHS-25 便携式 pH 计)测定,水土比 5:1,每处理重复3次^[13]。

土壤基础地力指标:大田早稻耕作施肥前所取土样增加土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾等含量的测定,测定方法采用《土壤农化分析》^[14] 相关方法,每处理重复3次。

1.4 数据统计分析

所有的试验数据均采用 Excel 2010 软件进行数据整理和图表的绘制,采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,采用 Origin 2021 软件的 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 钙镁水滑石对土壤特性的影响

2.1.1 钙镁水滑石对土壤 pH 的影响 由图 1 可知,随生育时期推进,早、晚稻土壤 pH 一般呈先升后降趋势。早稻季土壤 pH 因钙镁水滑石施用而明显提高,且随钙镁水滑石施用量的增大而增大,即呈现 $\text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{CK}$ 的趋势。孕穗期土壤 pH 增幅最大, T1 、 T2 处理土壤 pH 分别为 6.56, 6.52, 显著大于 CK ($p < 0.05$), T3 为 6.45 高于 CK, 但差异性并不显著,成熟期 T1 、 T2 处理分别为 6.40, 6.32, 显著高于 CK 和 T3 处理,但 CK 和 T3 均为 6.21, 没有差异性 ($p < 0.05$)。晚稻季,各时期各

钙镁水滑石处理土壤 pH 均高于对照,成熟期 T1、T2、T3 处理 pH 分别为6.65,6.60,6.49,分别较 CK(6.39)提高 4.07%,3.29%,1.56%。由此可知,钙镁水滑石可提高镉污染稻田土壤 pH,对酸化土壤具有较好的改良效果,且施用量越大效果越好。

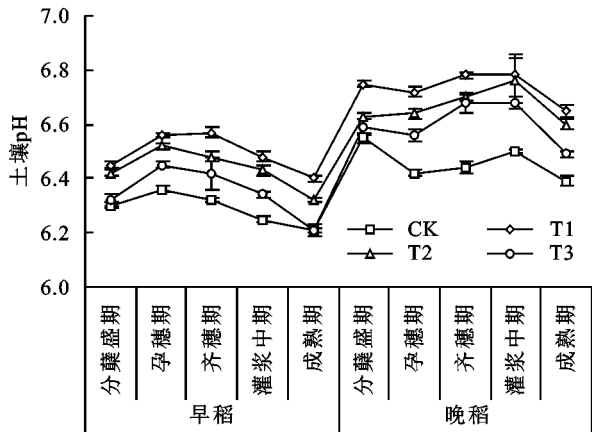


图 1 各处理土壤 pH

2.1.2 钙镁水滑石对土壤特性影响 由表 1 可知,施用钙镁水滑石显著提高双季稻田土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量。土壤碱解氮,早稻季灌浆中期含量

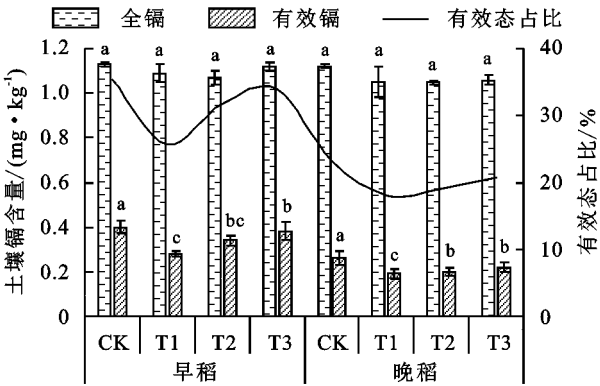
逐渐升高,成熟期有所下降,但各处理碱解氮含量均大于 CK($p<0.05$),其中,成熟期碱解氮含量 T1、T2、T3 分别为 178.97,177.80,164.03 mg/kg,较 CK 提高 4.30%~13.80%,晚稻季分蘖盛期、齐穗期高于其他时期,其中,成熟期碱解氮含量 T1、T2、T3 分别为 167.77,165.20,163.80 mg/kg,各处理较 CK 提高 11.79%~14.50%,增幅高于早稻季但含量低于早稻季。速效钾,齐穗期后含量有所下降,成熟期 T1 含量为 140.00 mg/kg,显著高于 CK,T2、T3 处理分别为 113.33,106.67 mg/kg,略高于 CK($p<0.05$),但差异并不显著。晚稻季,成熟期 CK、T1、T2、T3 速效钾含量分别为 126.67,166.67,153.33,146.67 mg/kg,各处理均显著大于 CK。速效磷,早晚稻变化规律基本一致,其含量变化规律为 T1>T2>T3>CK,成熟期早稻 T1、T2、T3 处理分别为 79.43,77.63,76.42 mg/kg,显著高于 CK,但 T1 与 T2、T2 与 T3 间差异不显著。晚稻季各处理间差异显著,T1 处理为 84.84 mg/kg,显著高于其他处理,T2 为 77.27 mg/kg,显著高于 CK,T3 为 75.11 mg/kg,与 CK 没有显著差异性($p<0.05$)。

表 1 早晚稻土壤碱解氮、速效钾、速效磷含量 单位:mg/kg

季别	指标	处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	成熟期
早稻	碱解氮	CK	163.72±1.71d	156.80±1.85c	165.20±1.85c	174.30±2.52d	157.27±1.46c
		T1	220.03±0.40a	200.20±2.42a	178.03±1.07a	200.67±1.07a	178.97±1.07a
		T2	191.80±0.70b	193.67±1.07b	177.57±1.07ab	193.90±0.70b	177.80±1.40a
		T3	178.50±2.10c	159.60±0.70c	173.83±2.91b	183.17±1.76c	164.03±1.62b
	速效钾	CK	173.33±11.55b	160.00±12.00b	160.00±16.00b	133.33±11.55c	100.00±21.00b
		T1	220.00±20.00a	220.00±20.00a	220.00±11.50a	173.33±11.55a	140.00±17.30a
		T2	180.00±13.80b	173.33±11.55b	160.00±10.40b	160.00±17.50ab	113.33±11.55b
		T3	180.00±16.00b	173.33±11.55b	166.67±11.55b	146.67±11.55bc	106.67±11.55b
	速效磷	CK	58.72±1.23c	52.41±1.10a	61.60±1.28c	58.72±1.22c	60.88±1.27c
		T1	82.14±1.70a	78.53±1.62a	74.21±1.54a	77.09±1.59a	79.43±1.64a
		T2	72.77±1.51b	61.06±1.27b	73.31±1.52a	74.03±1.53ab	77.63±1.61ab
		T3	59.44±1.24c	56.92±1.19c	65.02±1.35b	73.15±2.00b	76.42±1.07b
晚稻	碱解氮	CK	190.40±3.70c	163.10±3.26d	191.10±0.70d	163.80±1.85c	146.53±2.25b
		T1	206.50±3.05a	205.80±4.12a	218.63±1.07a	181.07±1.07a	167.77±1.07a
		T2	201.60±1.40ab	188.07±3.31b	208.13±1.62b	179.20±1.21ab	165.20±3.30a
		T3	197.40±4.59b	171.03±2.83c	200.90±2.10c	176.40±3.64b	163.80±0.70a
	速效钾	CK	93.33±11.55b	100.00±14.32b	133.33±11.55c	146.67±11.55d	126.67±11.55b
		T1	126.67±11.55a	126.67±11.55a	213.33±11.55a	266.67±11.55a	166.67±11.55a
		T2	113.33±11.55ab	106.67±11.55ab	180.00±15.00b	220.00±20.00b	153.33±11.55a
		T3	113.33±11.55ab	106.67±11.55ab	166.67±11.55b	180.00±20.00c	146.67±11.55ab
	速效磷	CK	65.20±1.35c	60.70±1.26c	68.63±1.42c	67.00±1.39c	72.41±1.50c
		T1	81.96±1.69a	84.48±1.74a	85.20±1.75a	88.08±1.81a	84.84±1.75a
		T2	75.75±0.86b	83.40±1.72a	77.63±1.60b	78.35±1.62b	77.27±1.60b
		T3	76.55±1.58b	71.69±1.48b	75.30±1.79b	70.07±1.45c	75.11±1.55bc

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.3 钙镁水滑石对土壤有效镉含量的影响 由图 2 可知,早、晚稻各生育时期各处理间土壤有效 Cd 含量均表现为 CK>T3>T2>T1,其中,成熟期土壤有效镉,早稻 T1、T2、T3 处理分别为 0.28,0.34,0.38 mg/kg,分别较 CK(0.40 mg/kg)降低 42.86%,17.65%,5.26%;晚季稻 T1、T2、T3 处理分别为 0.19,0.20,0.22 mg/kg,分别较 CK(0.26 mg/kg)降低 36.84%,30.00%,18.19%。施用钙镁水滑石对土壤总 Cd 含量无显著影响。各处理土壤有效 Cd 占全 Cd 的比例,早稻季随着钙镁水滑石用量增加呈降低趋势,总体趋势为 CK<T3<T2<T1,其中,T1 和 T2 处理分别为 25.69%,31.78%,较 CK(35.40 mg/kg)下降显著($p<0.05$),晚稻季,T1、T2、T3 分别为 18.10%,19.05%,20.75%,显著高于 CK(23.21 mg/kg)($p<0.05$),但 T2、T3 处理间差异性不显著。可见,早稻季基施钙镁水滑石具有很好的降低土壤有效 Cd 含量的效果,且施用量越大降低效果越好。



注:图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 各处理土壤镉含量

2.2 钙镁水滑石对双季稻镉累积的影响

2.2.1 钙镁水滑石对双季稻糙米镉含量的影响 由图 3 可知,钙镁水滑石对糙米的降 Cd 效果显著,各品种糙米镉含量随钙镁水滑石施用量增加而降低,表现为 CK>T3>T2>T1,但其降低程度存在品种间差异。糙米镉含量,“陆两优 996”T1、T2、T3 分别为 0.04,0.05,0.07 mg/kg,显著低于 CK(0.10 mg/kg) ($p<0.05$),但 T2、T3 处理间差异不显著,各处理降幅为 30.00%~60.00%。“湘早籼 45 号”T1、T2、T3 分别为 0.05,0.05,0.06 mg/kg,显著低于 CK(0.09 mg/kg),降幅为 33.33%~44.44%。“创两优 669”各处理差异显著,CK、T1、T2、T3 分别为 0.15,0.06,0.07,0.11 mg/kg,其中,T1 处理降镉效果最显著($p<0.05$),T2、T3 处理次之,CK 镉含量最高,降幅为 26.67%~60.00%。“玉针香”T1、T2 处理均为 0.09 mg/kg,显著低于其他处理,T3 处理为 0.13 mg/kg,显著低于 CK,CK 处理最高为

0.18 mg/kg,“玉针香”糙米 Cd 含量降低 27.78%~50.00%。晚稻糙米镉含量高于早稻,但其降镉规律与早稻基本一致。

2.2.2 钙镁水滑石对双季稻地上部镉积累量的影响 由图 4 可知,施用钙镁水滑石后双季稻地上部镉积累量显著下降,即积累量表现为 CK>T3>T2>T1。对于“湘早籼 45 号”来说,各处理茎、叶、穗镉积累量 CK 分别为 1 470.23,835.74,541.16 mg/kg,T1 分别为 1 242.88,665.72,462.51 mg/kg,T2 分别为 1 318.07,684.47,474.26 mg/kg,T3 分别为 1 432.19,779.57,502.66 mg/kg,各部位镉积累量以 T1 最低,其次是 T2、T3 处理,CK 最高。“陆两优 996”表现规律与“湘早籼 45 号”基本一致,与之不同的是,“陆两优 996”的茎高于湘早籼 45 号,各处理茎、叶、穗 CK 分别为 3 432.02,744.91,502.66 mg/kg,T1 分别为 2 568.52,658.67,472.27 mg/kg,T2 分别为 3 062.68,709.85,562.51 mg/kg,T3 分别为 3 298.76,709.85,562.51 mg/kg。晚稻镉积累量高于早稻品种,“玉针香”茎、叶、穗 CK 显著高于其他处理,T1 处理最低分别为 5 740.16,1 242.28,408.311 mg/kg,其次是 T2、T3 处理。“创两优 669”镉积累量略低于玉针香,但其积累量变化规律与“玉针香”基本一致,都是 T1 处理降低最显著,T1 处理茎、叶、穗分别为 4 127.32,1 181.94,405.12 mg/kg。施用钙镁水滑石,成熟期水稻全株“湘早籼 45”“陆两优 996”“玉针香”和“创两优 669”均以 T1 处理镉积累量最低分别为 2 371.11,3 699.46,7 390.75,5 714.38 mg/kg,分别较 CK 降低 4.89%~20.76%,6.00%~30.98%,15.93%~34.07%,12.58%~28.56%。可见,钙镁水滑石能够降低水稻地上部植株镉积累量,从而实现水稻穗镉积累量的减少,达到水稻籽粒降镉的效果。

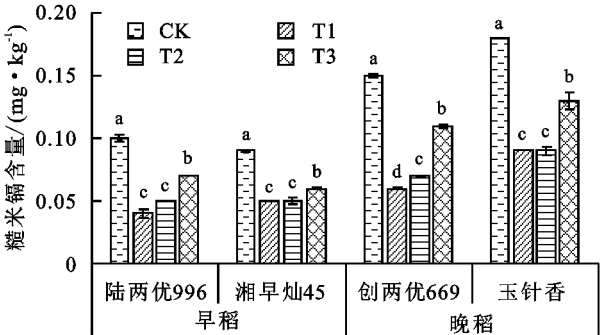


图 3 各处理糙米镉含量

2.3 钙镁水滑石对双季稻产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,施用钙镁水滑石对产量影响显著。“湘早籼 45 号”各处理较对照增产 4.11%~9.82%,4 个处理产量表现 T1>T2>T3>CK 趋势,其中,T1、T2 产量分别为 4.81,4.66 t/hm²,显著高于 CK ($p<0.05$),T1 显著高于 T3,其他处理间无显著差异。有效穗数,T1、

T2、T3 分别为 296.41,294.41,286.43 万穗/hm²,分别比比 CK 增加 14.97,12.97,4.99 万穗/hm²;结实率,T1 处理为 73.05%,显著高于 CK,T2、T3 处理分别为 71.83%,71.45%,提高不显著,处理间千粒重无显著差异。“陆两优 996”各处理较 CK 增产 5.94%~10.79%,4 个处理产量表现为 T2>T3>T1>CK 趋势,其中,T1、T2、T3 处理产量分别为5.89,6.16,6.02 t/hm²,且 3 个处理并没有显著差异性,但均显著高于 CK;有效穗数,T1、T2、T3 处理分别为 253.49,258.49,253.49 万穗/hm²,均高于 CK,其中,T2 处理增加显著;结实率 T1、T2、T3 处理分别为 71.75%,75.40%,74.45%,均显著高于 CK;每穗实粒数增加 2.41~4.55 粒,处理间千粒重无显著差异。

“玉针香”各钙镁水滑石处理较 CK 增产 1.69%~8.13%,各处理产量表现 T1>T3>T2>CK,T1 产量为 7.05 t/hm²,显著高于 T2 和 CK,T1 与 T3、T2 与 T3 和 CK 差异不显著;有效穗数,T2 处理为 285.43 万穗/hm²,显著高于 CK,其他处理间无显著差异;每穗实粒数、结实率均有所提高,但仅 T1 处理提高显著;处理间千粒重无显著差异。“创两优 669”各钙镁水滑石处理较 CK 增产 4.63%~11.29%,各处理产量规律与早稻基本一致,T1 处理为 7.69 t/hm²,显著高于 T3 和 CK,T2 处理为 7.52 t/hm²,显著高于 CK;有效穗数,T1、T2 处理显著高于 CK;各处理结实率显著高于 CK;处理间每穗实粒数、千粒重无显著差异。

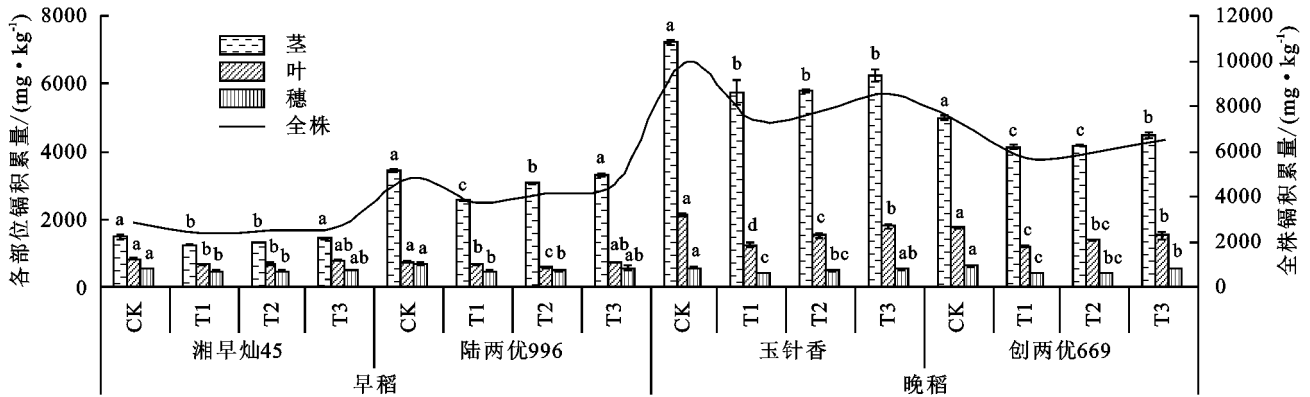


图 4 各处理水稻地上部铜积累量

综合早、晚稻数据发现,钙镁水滑石可使双季稻增产,且早稻季基施 3 000 kg/hm²能够获得双季稻最高产量,综合考虑处理间产量差异显著性与钙镁水滑石成本,本试验条件下以钙镁水滑石 1 500 kg/hm²较为适宜。

表 2 双季稻产量及产量构成因素

季别	品种	处理	有效穗/ (万穗·hm ⁻²)	每穗实粒 数/粒	结实率/ %	千粒重/ g	理论产量/ (t·hm ⁻²)	实际产量/ (t·hm ⁻²)
早稻	“湘早籼 45 号”	CK	281.44±2.40b	72.44±0.40a	70.21±1.63b	25.70±0.06a	4.61±0.14c	4.38±0.07c
		T1	296.41±5.18a	74.48±2.21a	73.05±1.21a	25.65±0.52a	4.99±0.26a	4.81±0.08a
		T2	294.41±3.46a	72.79±0.92a	71.83±1.03ab	25.84±0.31a	4.88±0.06ab	4.66±0.14ab
		T3	286.43±2.73ab	73.31±0.44a	71.45±0.63ab	25.47±0.20a	4.71±0.14bc	4.56±0.09bc
	“陆两优 996”	CK	247.50±1.54b	85.13±0.38b	68.44±0.50c	27.46±0.07a	5.79±0.13b	5.56±0.06b
		T1	253.49±4.73ab	87.54±0.31ab	71.75±0.38b	27.47±0.05a	6.10±0.22a	5.89±0.13a
		T2	258.49±2.86a	89.68±0.52a	75.40±0.40a	27.57±0.09a	6.39±0.13a	6.16±0.13a
		T3	253.49±3.75ab	89.34±0.57a	74.45±0.19ab	27.56±0.14a	6.24±0.21a	6.02±0.11a
晚稻	“玉针香”	CK	274.45±2.13b	86.15±1.63b	80.34±1.25b	28.55±0.11a	6.75±0.10c	6.52±0.13c
		T1	276.45±1.93ab	90.68±1.62a	83.44±0.65a	28.55±0.12a	7.39±0.14a	7.05±0.11a
		T2	285.43±3.46a	87.90±0.71b	81.08±0.06b	28.54±0.12a	6.96±0.22bc	6.63±0.09bc
		T3	278.44±3.00ab	88.49±0.36ab	81.73±0.73b	28.56±0.12a	7.04±0.13abc	6.77±0.13abc
	“创两优 669”	CK	243.51±6.91c	122.29±1.41a	80.35±0.23b	24.26±0.06a	7.22±0.11c	6.91±0.10c
		T1	265.47±3.46a	124.92±0.74a	84.67±0.22a	24.34±0.13a	8.07±0.15a	7.69±0.10a
		T2	260.48±5.19ab	124.35±1.85a	84.35±0.36a	24.38±0.07a	7.89±0.15ab	7.52±0.10ab
		T3	251.50±5.99bc	123.30±2.32a	83.83±0.38a	24.32±0.11a	7.54±0.13bc	7.23±0.16bc

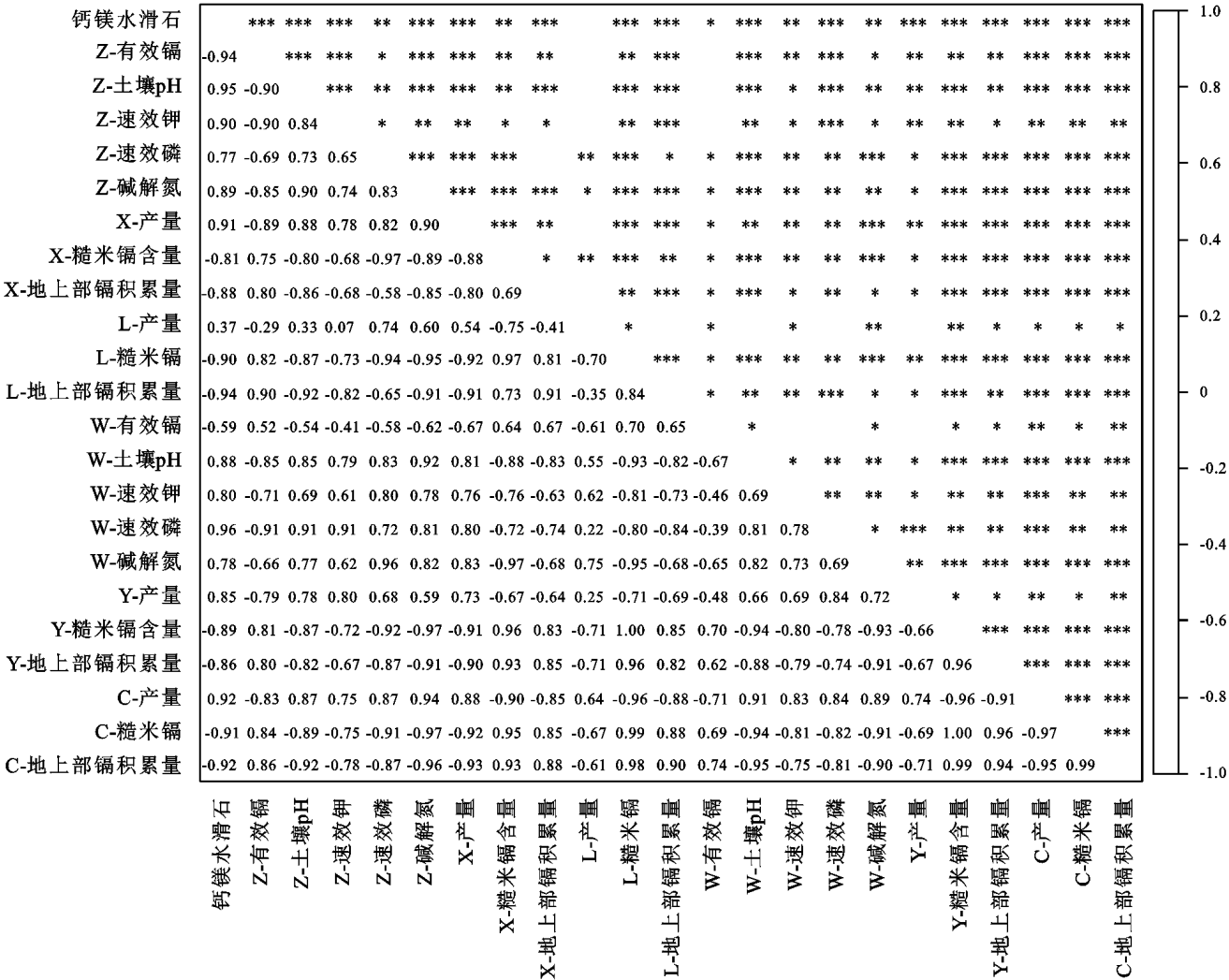
2.4 钙镁水滑石施用量与双季稻产量、土壤特性、各部位镉含量的相关性分析

将双季稻产量、糙米 Cd 含量、土壤有效 Cd 含量、pH、地上部镉积累量与钙镁水滑石施用量进行相关性分析发现,土壤 pH、有效 Cd 含量与糙米 Cd 含量具有显著相关性。

由图 5 可知,早稻季,钙镁水滑石施用量与土壤有效Cd 呈显著负相关(−0.94***),与土壤 pH、速效钾、速效磷、碱解氮呈显著正相关(0.95***, 0.90***, 0.89***, 0.77**),土壤 pH 和土壤有效 Cd 含量呈显著负相关(−0.90***);与早稻产量呈正相关(相关系数“湘早籼 45 号”为 0.91***;“陆两优 996”为 0.37*),因此,钙镁水滑石能够使水稻增产,但增产程度存在品种间差异,与糙米镉含量和地上部镉积累量呈显著负相关(相关系数“湘早籼 45 号”分别为−0.81***, −0.88**;“陆两优 996”分别为−0.90***, −0.94***)。土壤有效镉含量与糙米镉含

量、地上部镉积累量呈正相关(相关系数“湘早籼 45 号”分别为 0.75**, 0.80**;“陆两优 996”分别为 0.82**, 0.90***)。晚稻季,钙镁水滑石施用量与土壤有效 Cd 呈负相关(−0.59*),与土壤 pH、速效钾、速效磷、碱解氮呈显著正相关(0.88***, 0.80**, 0.96***, 0.78**),土壤 pH 和土壤有效 Cd 含量呈显著负相关(−0.67*),与晚稻产量呈正相关(相关系数“玉针香”为 0.85***, “创两优 669”分别为0.92***),因此,钙镁水滑石能够使晚稻增产,与糙米镉含量和地上部镉积累量呈显著负相关(相关系数“玉针香”分别为−0.89***, −0.86***; “创两优 669”分别为−0.91***, −0.92***)。土壤有效镉含量与糙米镉含量、地上部镉积累量呈正相关(相关系数“玉针香”分别为 0.70*, 0.62*; “创两优 669”分别为 0.69*, 0.74**)。

综上所述,施用钙镁水滑石,提高双季稻产量和稻田土壤 pH,使土壤有效镉含量下降,最终实现双季稻糙米镉含量和植株镉积累量下降。



注:Z、W、X、L、Y、C 分别为早稻、晚稻、“湘早籼 45”“陆两优 996”“玉针香”“创两优 669”; * 表示 $p \leq 0.05$; * * 表示 $p \leq 0.01$; * * * 表示 $p \leq 0.001$ 。

图 5 钙镁水滑石施用量与双季稻产量、土壤特性、各部位镉含量的相关性

3 讨论

3.1 钙镁水滑石对土壤特性与有效镉含量的影响

土壤 pH 是衡量土壤酸碱度的指标。有研究^[15]表明,含有钙、镁等物质的土壤调理剂提供速效养分的同时,降低土壤中交换性酸含量,达到提高土壤 pH 的效果。且土壤 pH 随着土壤调理剂用量的增加而升高^[16],施用硅钙钾镁土壤调理剂,可提高土壤有效硅、钙、钾和镁等营养元素^[17]。本研究表明,从提高土壤养分、土壤 pH 及降低土壤有效镉含量的角度出发,钙镁水滑石早稻一次性基施 3 000 kg/hm² 效果最好,早稻一次性基施 1 500 kg/hm²、早晚稻各施 750 kg/hm² 次之,不施效果最差,因为施用钙镁水滑石可有效调节双季稻田土壤理化性状。钙镁水滑石呈碱性,含有丰富的氧化钙、氧化镁等,施用钙镁水滑石可明显提高稻田土壤 pH,而土壤的 pH 越高,土壤对重金属阳离子的“固定”作用增强,使其溶解度变小活性降低^[18]。通过增加土壤 OH⁻ 浓度的方法,可以减弱 H⁺ 对重金属离子的竞争作用,使土壤中有有机质对 Cd 的吸附固定作用增强^[19],且丰富的 Ca²⁺、Mg²⁺ 等离子能够竞争 Cd²⁺ 与根的结合位点,使离子交换、沉淀作用增强^[20],从而降低 Cd 在土壤中的移动性,最终导致土壤有效镉含量下降。本试验结果表明,钙镁水滑石对土壤 pH 及土壤速效钾、碱解氮、速效磷有一定提升作用,且土壤中有效镉含量显著下降。

3.2 钙镁水滑石对水稻植株镉含量的影响

施用土壤调理剂实现水稻降镉是一条有效途径。稻田土壤缓冲能力强,体系复杂多变,钙镁水滑石作为一种新型土壤调理剂,首先,必须明确其对稻米镉含量的作用效果。在本试验中,随着钙镁水滑石的添加,与 CK 相比,水稻糙米镉含量、成熟期茎、叶、穗镉积累量显著下降,特别是当用量为 3 000 kg/hm² 时效果最明显,因为钙镁水滑石降低土壤有效镉含量,再加上 Ca²⁺、Mg²⁺ 等离子抑制镉从根部向地上部的运输,从而减少稻米对镉的吸收积累^[21],相比于 CK,在施用钙镁水滑石后,水稻植株整体镉积累量显著下降,说明钙镁水滑石可降低土壤有效镉活性,土壤中镉主要以游离态和水溶态形式通过根系被植株吸收转运,通过土壤调理剂的固化作用^[22],可显著降低水稻植株中镉积累量。本试验还发现,各处理下,4 个品种糙米镉含量均未超标,但相同用量钙镁水滑石处理下,“陆两优 996”和“创两优 669”水稻糙米镉含量和积累量降幅大于“湘早籼 45 号”和“玉针香”。可能与水稻对镉吸收积累存在品种差异有关^[23],至于钙镁水滑石的降镉效果是否存在品种差异,有待

进一步研究。

3.3 钙镁水滑石对水稻产量及产量构成的影响

本试验结果表明,施用钙镁水滑石对双季稻产量有一定的提升作用,除陆两优 996 以 1 500 kg/hm² 产量最高外,其他品种均以 3 000 kg/hm² 处理产量最高。是因为施用钙镁水滑石携带的有效养分提高土壤中速效钾、有效磷、碱解氮含量,给水稻生长发育提供养分^[24],最终提高有效穗、结实率、每穗实粒数等产量构成因素^[25],使得水稻产量明显提升。不同钙镁水滑石施用量下,水稻增产幅度不同,“湘早籼 45 号”和“创两优 669”产量以 T1、T2 处理较高,“陆两优 996”产量以 T2、T3 处理较高,“玉针香”产量以 T1、T3 处理较高;品种间增产幅度也有一定差异,其中,“湘早籼 45 号”增产 4.11%~9.82%,“陆两优 996”增产 5.94%~10.79%,“玉针香”增产 1.69%~8.13%,“创两优 669”增产 4.63%~11.29%。同时,产量构成因素对产量的影响存在品种间差异,“湘早籼 45 号”和“创两优 669”主要通过增加有效穗和结实率实现增产,而“陆两优 996”和“玉针香”主要通过增加有效穗、结实率及每穗实粒数实现增产。可见,施用钙镁水滑石能够显著提高水稻产量,但不同品种应合理确定其施用量,并采取其他措施以更好地协调提高各产量构成因素,方可实现最佳增产效应。

3.4 钙镁水滑石一次性基施与分次施用对双季稻镉含量及产量的影响

T2 与 T3 处理的钙镁水滑石施用量一致,均为 1 500 kg/hm²,但 T2 为早稻季一次性基施,而 T3 为早稻与晚稻各基施 750 kg/hm²。比较 2 个处理对水稻产量与稻米镉含量的差异发现,各品种糙米镉含量均表现为 T3>T2,而 2 个处理对水稻产量影响表现有品种间差异,“湘早籼 45 号”“陆两优 996”和“创两优 669”表现为 T2>T3,而“玉针香”表现为 T3>T2,但均差异不显著。因此,一次性施用更有利于降低稻米镉含量,还节省劳力。可见,钙镁水滑石是早稻季一次性基施还是早稻与晚稻各基施 1/2,在水稻产量与镉含量上表现出差异,对此现象还有待进一步研究证实,其原因尚有待深入分析。

4 结论

钙镁水滑石可提高土壤 pH,显著降低土壤中 Cd 的活性与有效镉占全镉的比例,提高双季稻有效穗数、结实率和产量,显著降低水稻籽粒 Cd 含量和积累量,且随施用量增加效果越明显。但综合考虑处理间水稻产量与镉含量差异的显著性及钙镁水滑石成本,以钙镁水滑石 1 500 kg/hm² 较为适宜。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.
- [2] Liu X J, Tian G J, Jiang D, et al. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national scale[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(18):1-12.
- [3] 董克,赵颖.污染农田土壤—作物体系复合污染及人体健康风险研究[J].环境与可持续发展,2018,43(5):91-93.
- [4] Luo Q H, Bai B, Xie Y H, et al. Effects of Cd uptake, translocation and redistribution in different hybrid rice varieties on grain Cd concentration[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 240: e113683.
- [5] 曹胜,周卫军,周雨舟,等.硅钙镁土壤调理剂对酸性镉污染土壤及稻米的降镉效果[J].河南农业科学,2017,46(12):54-58.
- [6] He L Z, Meng J, Wang Y, et al. Attapulgit and processed oyster shell powder effectively reduce cadmium accumulation in grains of rice growing in a contaminated acidic paddy field[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 209: e111840.
- [7] Liu C, Wang L, Yin J, et al. Combined amendments of nano-hydroxyapatite immobilized cadmium in contaminated soil-potato (*Solanum tuberosum* L.) system[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 100(4):581-587.
- [8] 黄卫,庄荣浩,喻鹏,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.
- [9] LI P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(4):449-455.
- [10] 石刚,庞巧莲,李文燕,等.土壤调理剂的应用现状及前景[J].现代农业科技,2021(24):138-139.
- [11] 帅泽宇,谷子寒,陈基旺,等.土壤耕作方式对双季稻产量构成与穗镉积累的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):348-357.
- [12] 国家标准化管理委员会,国家质量监督检验检疫总局. GBT 23739—2009,土壤质量—有效态铅和镉的测定—原子吸收法[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [13] 李强,赵秀兰,胡彩荣,等.ISO 10390:2005 土壤质量 pH 的测定[J].污染防治技术,2006(1):19.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 江棋.土壤调理剂对镉污染稻田土壤质量和稻米品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [16] 林小兵,武琳,王惠明,等.不同用量土壤调理剂对镉污染农田土壤环境的影响[J].长江流域资源与环境, 2021, 30(7):1734-1745.
- [17] 解秋,吴锡林,李小燕,等.硅钙钾镁土壤调理剂对五常水稻长势及产量的影响[J].北方水稻,2020,50(1):18-21.
- [18] Hong C O, Lee D K, Chung D Y, et al. Liming effects on cadmium stabilization in upland soil affected by gold mining activity[J]. Archives of Environmental Contamination Toxicology, 2007, 52:496-502.
- [19] 丁凌云,蓝崇钰,林建平,等.不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J].生态环境,2006(6):1204-1208.
- [20] He Y B, Huang D Y, Zhu Q H, et al. A three-season field study on the in-situ remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 136:135-141.
- [21] 辜娇峰,周航,杨文弢,等.复合改良剂对镉砷化学形态及在水稻中累积转运的调控[J].土壤学报,2016,53(6):1576-1585.
- [22] 李欣阳.土壤—水稻系统 Cd 形态变化、活化特征与 Cd 迁移阻控研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [23] 严勋,唐杰,李冰,等.不同水稻品种对镉积累的差异及其与镉亚细胞分布的关系[J].生态毒理学报,2019,14(5):244-256.
- [24] 沙乐乐.水稻镉污染防控钝化剂和叶面阻控剂的研究与应用[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [25] 李耀奇,谷雨,李明德,等.4 种土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J].湖南农业科学,2019(11):65-68.