

土壤耕作方式对双季稻产量构成与穗镉积累的影响

帅泽宇, 谷子寒, 王元元, 陈基旺, 陈平平, 易镇邪

(湖南农业大学农学院, 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 为比较研究不同土壤耕作方式(翻耕、旋耕、免耕)对南方双季稻区水稻产量构成与稻穗镉积累分配特性的影响, 探讨镉污染稻田双季稻最优土壤耕作方式, 2015—2017年, 以“陵两优211”与“威优46”为早、晚稻供试品种, 在湖南省湘潭县易俗河镇中度镉污染稻田(全镉含量0.86 mg/kg)开展定位试验, 比较研究了双季免耕、双季翻耕、双季旋耕、早旋晚免、早翻晚免5种土壤耕作方式下土壤有效镉含量、双季稻的产量构成与穗镉积累分配情况。结果表明: (1) 双季稻产量以双季翻耕处理最高, 早翻晚免处理次之, 双季旋耕与早旋晚免处理再次之, 双季免耕处理最低; 翻耕处理产量最高的原因在于其有效穗数与每穗粒数较高。 (2) 齐穗期至成熟期, 穗镉含量一般呈增长趋势; 第1年早晚稻齐穗期穗镉含量以免耕处理最高, 但免耕能明显降低水稻齐穗至成熟期穗镉含量的增长速率; 早晚稻成熟期穗镉含量一般以翻耕处理较高, 免耕与旋耕处理较低, 免耕与旋耕处理有差异但在不同年份与季别间表现不尽相同。 (3) 成熟期稻穗各部位镉含量趋势表现为枝梗>谷壳>糙米; 第1年糙米镉含量以免耕处理较高, 但第2、3年呈现免耕处理低于翻耕与旋耕处理的趋势。 (4) 第1年早、晚稻穗镉累积量均以旋耕处理较低, 但第2、3年均以翻耕处理较低。 (5) 较其他处理而言, 双季免耕明显提高了土壤有效镉含量, 双季旋耕则降低了土壤有效镉含量。3年定位试验表明, 土壤耕作方式对镉污染稻田土壤有效镉含量、双季稻产量构成与稻穗镉积累分配有明显影响, 从保证双季稻产量、降低稻米镉含量与轻简省工的角度出发, 早翻晚免是中度镉污染双季稻田的最优土壤耕作方式。

关键词: 双季稻; 镉污染; 土壤耕作方式; 产量构成; 镉含量; 镉累积量; 土壤有效镉

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0348-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.051

Effects of Soil Tillage Methods on Yield Components and Cadmium Accumulation in Panicles of Double-cropping Rice

SHUAI Zeyu, GU Zihan, WANG Yuanyuan, CHEN Jiwang, CHEN Pingping, YI Zhenxie

(South Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China,
College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: To compare the effects of different soil tillage methods (ploughing, rotary tillage and no tillage) on rice yield composition and cadmium accumulation and distribution traits in rice panicles in southern double-cropping rice fields, and to explore the optimal soil tillage method for double-cropping rice in cadmium-contaminated rice fields, taking “Lingliangyou 211” and “Weiyu 46” as early and late rice varieties, the available cadmium content in soil, rice yield components and spike cadmium accumulation and distribution of double-cropping rice under five soil tillage methods (double-cropping no-tillage, double-cropping ploughing, double-cropping rotary tillage, ploughing in early rice and no-tillage in late rice, rotary tillage in early rice and no-tillage in late rice) were studied in Yisuhe Town, Xiangtan County, Hunan Province in 2015 to 2017. The experimental field was cadmium-contaminated rice fields, and the total cadmium content was 0.86 mg/kg. The results showed that the yield of double cropping rice was the highest in the treatment of double-cropping ploughing, followed by the treatments of ploughing in early rice and no-tillage in late rice, double-cropping rotary tillage and rotary tillage in early rice and no-tillage in late rice, and that of no-tillage in double cropping rice was the lowest. The highest yield of ploughing treatment was due to the higher number of effective

收稿日期: 2018-10-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301500, 2018YFD0301005); 农业部行业计划项目(201503123-05); 湖南省教育厅科研项目(17C0771)

第一作者: 帅泽宇(1994—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事作物高产高效栽培理论与技术研究。E-mail: 519271195@qq.com

通信作者: 易镇邪(1975—), 男, 湖南冷水江人, 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: yizhenxie@126.com

panicle and grains per panicle. (2) The cadmium content in panicle generally showed an increasing trend from full heading to maturity stage. In the first year of early and late rice, the cadmium content in panicle at full heading stage was the highest in no-tillage treatment, but no-tillage could significantly reduce the growth rate of cadmium content in panicle from full heading to maturity stage. The cadmium content in panicle at maturity stage was higher in ploughing treatment and lower in no-tillage and rotary tillage treatment, there were difference between no-tillage and rotary tillage treatment, but they were different among years and seasons. (3) Cadmium content in different parts of rice panicle at maturity stage followed the order of branches > husks > brown rice. The cadmium content in brown rice was higher in no-tillage treatment in the first year, but in the second and third years, that of no-tillage was lower than that of ploughing and rotary tillage. (4) The cadmium accumulation in panicle of early and late rice was lower in rotary tillage treatment in the first year, but it was lower in no-tillage treatment in the second and third years. (5) Compared with other treatments, double-cropping no-tillage significantly improved the soil available cadmium content, while double-cropping rotary tillage decreased the soil available cadmium content. The three-year locational test showed that soil tillage methods had a significant impact on available cadmium in soil, yield components and cadmium accumulation and distribution in rice panicles of double-cropping rice in cadmium-contaminated paddy field. From the perspective of ensuring the yield of double-cropping rice, reducing cadmium content in rice and saving labor, ploughing in early rice and no-tillage in late rice was the optimal soil tillage method for medium cadmium-contaminated double-cropping rice fields.

Keywords: double cropping rice; cadmium pollution; soil tillage methods; yield composition; cadmium content; cadmium accumulation; soil available cadmium

水稻是我国最重要的粮食作物之一,水稻生产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^[1]。然而,随着我国工业化进程的加速和社会经济的发展,稻田重金属污染问题日趋严峻,水稻生产受重金属污染的影响日益加剧,严重威胁着粮食生产安全^[2-3]。尤其是水稻的镉污染问题已成为一个备受社会关注的严重问题。因此,如何控制水稻重金属污染并实现其安全生产(主要是卫生品质安全)值得关注。

就水稻镉污染防控,前人^[4-7]已开展大量研究,从农艺调控措施角度,李鹏^[4]研究表明,淹水显著降低土壤有效态镉的含量,全生育期淹水显著降低水稻籽粒Cd的含量。沈欣等^[5]研究表明,pH是影响土壤中镉形态变化及水稻地上部分镉积累量降低的原因。目前,从耕作措施角度开展的研究较少,常同举等^[6]研究表明,水旱轮作降低了茎、叶中镉向糙米的转移。汤文光等^[7]研究表明,长期免耕相较于长期旋耕降低了糙米中的镉含量。为进一步探究土壤耕作方式对水稻产量构成与穗镉积累的影响,在湖南省湘潭县镉污染稻田上开展大田定位试验,通过研究不同土壤耕作方式对双季稻产量及穗镉积累分配特性的影响,以期明确镉污染稻田米镉积累阻控的适宜土壤耕作方式,为实现中度镉污染稻田水稻安全生产提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

早稻品种为“陵两优211”,晚稻品种为“威优46”。试验于2015—2017年在湖南省湘潭县易俗河镇樟树村进行,试验田常年种植制度为冬闲—稻—稻。试验地基础肥力:pH 6.12,有机质 30.82 g/kg,全氮 1.70 g/kg,全磷 0.77 g/kg,全钾 8.47 g/kg,碱解氮 163.4 mg/kg,有效磷 39.60 mg/kg,速效钾 298.60 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用大区设计,设5个处理:双季免耕(G1)、双季翻耕(G2)、双季旋耕(G3)、早稻旋耕晚稻免耕(G4)、早稻翻耕晚稻免耕(G5)。其中,翻耕以铧式犁实现,旋耕以小型手推式旋耕机实现,免耕即不进行任何耕作措施。旋耕耕深10 cm,翻耕耕深20 cm。各区面积为115 m²,大区之间起垄覆膜隔开,单灌单排,各处理田间管理措施一致。

早稻于3月23日左右播种,4月22日左右移栽,插秧密度16.7 cm×20.0 cm,7月5日左右收获。晚稻于6月15日左右播种,7月11日左右移栽,插秧密度20 cm×20 cm,10月18日左右收获。

施肥按照当地习惯进行,各处理施肥量一致。早稻基肥施用复混肥料600 kg/hm²,分蘖初期追施尿素150 kg/hm²。复混肥料N、P₂O₅、K₂O比例为22:6:12,尿素含氮46.4%。

1.3 测定项目与方法

实际测产: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^[8]。

理论测产:水稻成熟后每个大区数 80 蔸,记录有效穗数,计算单穴平均有效穗数,按照平均有效穗数取 15 蔸,带回室内考种(每 5 蔸作 1 次重复),考察穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重,计算理论产量^[8]。

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—10,10—20 cm 土样,自然风干后过 20 目筛备用,用 pH 计(哈希 HI160NP 便携式 pH 计)测定^[9],水土比 5:1,每处理重复 3 次。

土壤有效态镉含量:于早稻耕作施肥前,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—10,10—20 cm 土样,自然风干后过 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 25.00 mL DTPA 提取剂,(25±2)℃振荡 2 h,干过滤,最初 5~6 mL 滤液弃去,再滤下的滤液用原子吸收分光光度计测定有效态镉含量^[10],每处理重复 3 次。

水稻穗镉积累特性:将取回的齐穗期、灌浆中期、成熟期穗洗净,成熟期谷分为枝梗、空粒、糙米、谷壳放入烘箱 105℃杀青 0.5 h,80℃烘干至恒重。同时,每处理收稻谷 1 kg,晒干,储藏 3 个月后,碾米,分成谷壳、米糠、精米等 3 部分。以上材料烘干后,用不锈钢植物样品粉碎机粉碎,过 100 目筛备用。采用硝酸—高氯酸高温消解方法,每处理重复 3 次,使用石墨炉检测消化液中镉含量^[8]。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 2013 和 Sigma Plot 软件作图,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和相关分析,不同处理之间采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同土壤耕作方式对水稻产量及产量构成的影响

2.1.1 土壤耕作方式对双季稻产量的影响 由表 1 可知,2015 年早、晚稻产量均表现为 G2 处理(双季翻耕)最高,G5 处理(早翻晚免)居其次,处理间早稻实际产量表现为 G2>G5>G3>G4>G1 趋势,晚稻表现 G2>G5>G1>G3>G4 趋势。早稻各处理间,G2 处理产量显著高于 G1 处理,增幅为 13.37%;晚稻各处理间,G2 处理显著高于其他处理,分别比 G1、G3、G4 和 G5 处理增产 12.94%,19.48%,20.65%,12.08%;两季总产间,表现为 G2>G5>G1>G4>G3 趋势,G2 处理显著高于其他处理。2016 年,早稻实际产量表现为翻耕处理(G2、G5)高于旋耕与免耕处理,与 G1 处理差异显著,分别比 G1 处理高出 12.23%,12.63%;晚稻实

际产量表现为 G2>G5>G4>G1>G3。G2、G4、G5 处理与 G3 处理差异显著,分别比之高出 11.67%,7.73%,7.74%。两季总产表现为 G2>G5>G4>G3>G1。2017 早稻产量为 G2(双季翻耕)最高,其次依次为 G3>G4>G1>G5,但除 G2、G3 显著高于其他各处理外,其他 3 个处理间差异不显著。晚稻则以 G5 处理最高显著大于其他各处理,分别比 G1、G2、G3、G4 增产 14.46%,10.56%,7.45%,4.50%,其他各处理间无显著差异。计算 2017 两季总产,各处理排序为 G3>G2>G5>G4>G1。综合 3 年的试验结果,从提高水稻双季产量的角度来看,G2 翻耕处理最好,G5 早翻晚免处理次之,G1 双季免耕处理下降明显。

2.1.2 土壤耕作方式对双季稻产量构成的影响 不同耕作方式对水稻穗长影响不显著。从有效穗数上来看,2015 年早稻表现 G5>G2>G3>G4>G1 趋势,晚稻表现 G2>G3>G1>G5>G4 趋势。2016 年早稻表现 G2>G1>G4>G5>G3 趋势,晚稻表现为 G5>G2>G1>G4>G3 趋势。2017 年早稻呈现 G2>G3>G1>G5>G4 的趋势,晚稻呈现 G5>G3>G1>G2>G4 的趋势。综合 3 年数据表现的趋势来看,G2 翻耕处理、G5 早翻晚免处理对提高水稻有效穗数最明显,而 G3 旋耕处理和 G4 早旋晚免处理不利于有效穗数的增加。

从每穗粒数上来看,2015 年早稻以 G1、G2 处理最高但与 G4、G5 处理差异不显著,G3 处理最低且差异显著。晚稻处理以 G2 最高且差异显著,以 G3 最低且差异显著。2016 年早晚稻均以 G1 处理最低且差异显著,其他处理间趋势不明显。2017 年穗数相较于往年差异巨大,这主要是因为齐穗后湘潭地区连续特大暴雨导致。以 G1、G5 处理最低且与 G3、G4 处理差异显著。晚稻以 G4 处理最高且差异显著,但其他各处理间差异不显著,G1 处理最低。综合 3 年趋势来看,G2 翻耕处理有利于提高每穗粒数,G1 免耕处理不利于每穗粒数的形成。

从结实率上来看,2015 年早稻以 G2、G3 最高且差异显著,晚稻以 G1 处理最低且与 G2 处理差异显著。2016 年早稻由于湘潭雨水天气对结实率造成了较大影响,比 2015 年差异巨大,但各处理之间没有显著差异。晚稻以 G3 处理显著低于其他各处理。2017 年早稻同样由于暴雨天气导致结实率减少,以 G1、G2 处理显著高于其他各处理。晚稻各处理间没有显著差异。3 年试验结果趋势仍不明显,有待进一步研究。

从千粒重上来看,2015 年和 2016 年的试验结果表明免耕能提高水稻千粒重,但 2017 年的试验结果却显示免耕处理的千粒重有所下降。可能是免耕处

理短期内能提高千粒重,但由于长期免耕使土壤酸化严重,从而降低了千粒重。

2.2 土壤耕作方式对水稻穗镉含量的影响

由表 2 可知,2015 年早、晚稻齐穗期至灌浆中期穗部镉含量逐渐增加。早稻齐穗期 G1 处理最高,为 0.084 8 mg/kg,显著高于其他处理。灌浆中期,G2

和 G5 处理增幅最大,G1 最小;晚稻灌浆中期 G1 穗镉含量最高,为 0.151 4 mg/kg,显著高于 G2 和 G3 处理,较 G2 和 G3 分别高出 41.36%和 26.17%。早稻成熟期 G2、G5 最高且显著高于其他各处理。晚稻以 G2 最高,且与其他各处理差异显著,以 G3 最低,且与其他各处理差异显著。

表 1 土壤耕作方式对水稻产量及产量构成的影响

年份	季别	处理	穗长/ cm	有效穗数/ (10 ⁴ · hm ⁻²)	每穗 粒数	结实率/ %	千粒重/ g	理论产量/ (t · hm ⁻²)	实际产量/ (t · hm ⁻²)
2015	早稻	G1	19.13a	286.89b	102a	74.12b	26.68a	5.80b	5.31b
		G2	19.18a	305.29a	101a	81.02a	25.83b	6.44a	6.02a
		G3	18.06b	303.93a	89b	83.20a	26.21ab	5.92ab	5.41ab
		G4	18.60ab	299.90ab	98a	74.90b	26.61a	5.89ab	5.34ab
		G5	19.04a	313.56a	99a	77.02b	26.12ab	6.24ab	5.52ab
	晚稻	G1	22.26a	319.79b	91b	76.58b	32.59a	7.24b	6.57b
		G2	22.25a	339.94a	96a	78.28a	31.87b	8.11a	7.42a
		G3	21.49a	324.86b	87c	77.65ab	31.01b	6.85c	6.21c
		G4	21.94a	315.50b	91b	77.02ab	31.62b	7.02bc	6.15bc
		G5	21.57a	316.33b	93ab	76.98ab	31.88b	7.25b	6.62b
2016	早稻	G1	18.85a	384.91a	77b	56.59a	26.63a	4.72b	4.60b
		G2	19.47a	393.46a	87a	59.11a	26.53a	5.18a	5.16a
		G3	19.41a	353.95b	92a	57.75a	26.17a	5.12a	5.12ab
		G4	19.70a	360.61b	93a	58.05a	26.26a	5.11a	5.04ab
		G5	19.79a	358.19b	93a	58.27a	26.27a	5.22a	5.18a
	晚稻	G1	22.93a	257.66b	108c	86.94a	30.42a	7.33bc	6.61bc
		G2	23.79a	265.76a	122a	84.38b	29.47a	8.07a	7.26a
		G3	23.83a	242.68c	124a	82.45c	29.10b	7.21c	6.51c
		G4	23.71a	255.59b	118ab	86.22ab	29.53a	7.70ab	7.01ab
		G5	24.08a	268.43a	114bc	85.41ab	29.85a	7.78ab	7.01ab
2017	早稻	G1	19.00a	400.19b	69b	77.08a	27.08a	4.93b	4.71b
		G2	17.72a	439.49a	72ab	71.67a	27.83a	6.24a	5.71a
		G3	17.88a	405.16b	81a	67.66b	27.49a	6.08a	5.73a
		G4	16.95a	342.75c	80a	68.67b	28.07a	5.07b	4.81b
		G5	17.92a	397.31b	67b	65.67c	27.47a	4.83b	4.66b
	晚稻	G1	22.28a	258.85a	105b	78.70a	28.99a	6.21b	5.67b
		G2	22.25a	250.56a	113b	80.53a	28.84a	6.56b	5.87b
		G3	23.20a	263.16b	109b	79.40a	29.35a	6.67b	6.04ab
		G4	23.65a	228.99b	128a	80.59a	29.25a	6.88a	6.21ab
		G5	22.65a	264.11a	112b	80.54a	29.25a	6.99a	6.49a

注:方差分析分年度、季别进行;同列数据不同小写字母表示同年度同季别水稻不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2016 年早稻齐穗期至灌浆中期各处理穗部镉含量逐渐增加,晚稻则相反。早稻齐穗期与灌浆中期均以 G1 处理最高,并在齐穗期显著高于其他处理,早稻成熟期以 G5 最高,G1 和 G4 最低,且差异显著。晚稻齐穗期和灌浆中期 G4 和 G5 处理显著高于 G1、G2 和 G3 处理,灌浆中期 G4 处理比 G1、G2 和 G3 处理分别高出 147.62%,131.83%,104.26%。晚稻成熟期以 G1 最低,且与其他各处理之间差异显著。

2017 年早稻齐穗至灌浆期穗部镉含量逐渐增加,晚稻 G2、G5 处理逐渐减少。早稻以 G5 处理灌

浆中期显著高于其他各处理,早稻成熟期穗部镉含量明显下降,这可能是由于暴雨所致,以 G5 处理最高,G2、G3 处理最低,且差异显著。晚稻齐穗期至灌浆中期 G3、G4 处理显著高于其他各处理,以 G5 处理最低,晚稻成熟期穗部镉含量以 G2 处理显著低于其他各处理,其他各处理之间差异不显著。

综合 3 年试验结果来看,早稻齐穗期穗镉含量均以 G1 处理最高,且差异显著。但齐穗期至成熟期 G1 处理增幅较小。G2、G5 处理齐穗期镉含量较低,至成熟期穗镉含量增幅最为明显。晚稻齐穗期至灌浆中期穗镉含

量较早稻含量高,但增幅较小,甚至出现降低的趋势,灌浆中期至成熟期增长迅速,以 G2 处理增幅最大。G2、G5 处理在 2016 年和 2017 年齐穗期至灌浆中期均表现为下降的趋势,灌浆中期至成熟期增长迅速,且含量处于最高水平,与其他各处理间有差异。G1 处理晚稻相较于其他处理增幅较小,2016 年镉含量最低,且差异显

著,2017 年低于 G3、G4、G5 处理,且差异显著。2 年晚稻灌浆中期穗镉含量均以 G4 处理最高,且与其他处理差异显著,成熟期以 G5 处理镉含量始终处于较高水平。由此可见,免耕处理能降低齐穗期至成熟期穗镉含量的积累速率及含量;翻耕处理能促进穗镉含量的积累速率及含量,且在灌浆中后期作用明显。

表 2 土壤耕作方式对水稻穗镉含量的影响

单位:mg/kg

年份	季别	时期	G1	G2	G3	G4	G5
2015	早稻	齐穗期	0.0848a	0.0612b	0.0584b	0.0597b	0.0632b
		灌浆中期	0.0975b	0.1634a	0.1331ab	0.1389ab	0.1632a
		成熟期	0.1992c	0.2184a	0.1971c	0.2039b	0.2250a
	晚稻	齐穗期	0.1192a	0.0848a	0.0954a	0.0950a	0.0815a
		灌浆中期	0.1514a	0.1071b	0.1200b	0.1282ab	0.1276ab
		成熟期	0.2144b	0.2259a	0.1985c	0.2170ab	0.2191ab
2016	早稻	齐穗期	0.1739a	0.0791b	0.0781b	0.0633b	0.0771b
		灌浆中期	0.1886a	0.1626a	0.1291a	0.1344a	0.1431a
		成熟期	0.2655c	0.3065b	0.3255b	0.2693c	0.3559a
	晚稻	齐穗期	0.2939c	0.4816b	0.2341c	0.6309ab	0.6893a
		灌浆中期	0.2747c	0.2934bc	0.3330b	0.6802a	0.4313a
		成熟期	0.5712c	0.8252a	0.7997a	0.6984b	0.6825b
2017	早稻	齐穗期	0.1480a	0.1251b	0.1309b	0.1483a	0.1458a
		灌浆中期	0.1645b	0.1588b	0.1508b	0.1735b	0.3123a
		成熟期	0.1099d	0.1317c	0.1456b	0.1402b	0.2057a
	晚稻	齐穗期	0.3240d	0.6091ab	0.6495a	0.5431bc	0.4907c
		灌浆中期	0.6430c	0.4923d	1.0146b	1.1820a	0.4032d
		成熟期	0.8314a	0.8213a	0.7889b	0.8472a	0.8521a

2.3 土壤耕作方式对水稻成熟期稻穗各部位镉含量的影响

由表 3 可知,2015 年早稻成熟期穗与籽粒各部位镉含量趋势为枝梗>空粒>谷壳、糙米。其中,枝梗镉含量表现为 G1>G5>G2>G4>G3,G1 处理显著高于 G3 和 G4 处理。空粒镉含量以 G1 处理最高且显著高于 G3 和 G4 处理;谷壳镉含量以 G2、G5>G1>G3、G4,G3 处理显著高于 G5 处理。糙米镉含量 G1 处理最高、G2 处理最低。

2015 年晚稻穗与籽粒各部位镉含量趋势表现为枝梗>空粒>谷壳>糠层>精米。枝梗镉含量 G5 处理最高且差异显著。空粒镉含量 G1 处理最高,为 0.445 9 mg/kg,显著高于 G4 处理;谷壳镉含量各处理间差异不显著;糠层镉含量以 G5 处理最高且比 G1、G2、G3 处理差异显著。精米镉含量表现为 G4>G5>G3>G1>G2。

2016 年早稻穗与籽粒各部位镉含量趋势表现为枝梗、糠层>空粒、谷壳>糙米>精米。枝梗镉含量 G3 处理最高且与其他各处理差异显著;空粒镉含量呈现 G2>G3>G1>G5>G4,G2 处理显著高于 G4 和 G5 处理;谷壳镉含量趋势为 G5>G3>G4>G2>G1;糙米镉含量高于国标的 0.2 mg/kg^[11],表现为

G3>G2>G1>G5>G4;糠层镉含量以 G4 处理最高,与 G1 和 G5 处理差异显著;晚稻免耕处理后 G4、G5 相比 G2、G3 糠层镉含量有下降的趋势。

2016 年晚稻穗与籽粒各部位镉含量趋势表现为枝梗>空粒>糠层>谷壳、糙米、精米。2016 年晚稻穗与籽粒各部位镉含量与 2015 年晚稻差异巨大,可能的原因是当地化工厂排放大气污染物沉降所致。枝梗镉含量晚稻表现为 G3>G2>G1>G4>G5,各处理间差异不显著;空粒镉含量以 G3 处理最高且比其他处理差异显著;谷壳镉含量 G1 处理显著高于 G4 与 G5 处理;糙米镉含量各处理的均超出国家标准,且 G2 和 G3 处理显著高于 G1、G4 和 G5 处理。晚季免耕 G4 和 G5 处理糙米镉含量显著高于 G1 处理。糠层镉含量以 G3 处理最高,与其他各处理差异显著;精米镉含量 G1、G4、G5 处理低于 G2、G3 处理。

2017 年早稻镉含量趋势表现为枝梗>空粒>谷壳>糠层>糙米>精米。枝梗、空粒镉含量以 G5 最高且显著大于其他各处理。谷壳镉含量各处理没有差异。糙米镉含量以 G4>G5>G3>G2>G1 且 G4、G5 显著高于其他各处理,精米镉含量以 G4>G5>G2>G3>G1 且 G4、G5 显著高于其他各处理,糠层镉含

量以 G4 最高且显著高于其他各处理。糙米镉含量所有处理均未超过国家食品镉含量标准。

2017 年晚稻镉含量较早稻差异巨大,与 2016 年原因相一致。枝梗镉含量各处理之间没有差异。空

粒镉含量以 $G3>G1>G2>G5>G4$,且 G1、G2、G3 处理显著高于 G4、G5 处理。谷壳镉含量各处理之间差异不大。糙米镉含量各处理之间差异不显著。精米镉含量以 G5 最低且达到显著水平。

表 3 土壤耕作方式对水稻成熟期穗与籽粒各部位镉含量的影响 单位:mg/kg

年份	季别	处理	枝梗	空粒	谷壳	糙米	糠层	精米
2015	早稻	G1	0.5684a	0.3743a	0.1773ab	0.1998a		
		G2	0.4701ab	0.3202ab	0.1860ab	0.1527a		
		G3	0.4016b	0.2582b	0.1601b	0.1686a		
		G4	0.4163b	0.2674b	0.1688ab	0.1564a		
		G5	0.4915ab	0.3181ab	0.2204a	0.1690a		
	晚稻	G1	0.4920bc	0.4459a	0.2688a		0.1990b	0.1763bc
		G2	0.4914bc	0.4042a	0.2778a		0.1831b	0.1577c
		G3	0.5317b	0.3486ab	0.2689a		0.1954b	0.1721bc
		G4	0.4301c	0.2930b	0.2902a		0.2264ab	0.2107a
		G5	0.6264a	0.4125a	0.2770a		0.2765a	0.1948ab
2016	早稻	G1	0.6004cd	0.3662abc	0.3292b	0.2399b	0.5299c	0.1921ab
		G2	0.6713b	0.4845a	0.3466b	0.2626ab	0.6672ab	0.1883ab
		G3	0.7834a	0.4451ab	0.3812a	0.2727a	0.6718ab	0.2059a
		G4	0.6099bc	0.2885c	0.3546ab	0.2091b	0.7234a	0.1713b
		G5	0.5364d	0.3293bc	0.3833a	0.2167b	0.6119c	0.1600b
	晚稻	G1	2.5173a	1.0853b	0.6362a	0.4482c	0.6422c	0.4258b
		G2	2.5620a	1.2560b	0.6043ab	0.6978a	0.8411b	0.6381a
		G3	2.9607a	1.7213a	0.6057ab	0.6993a	1.0449a	0.6394a
		G4	2.2913a	1.2773b	0.5249b	0.5999b	0.8445b	0.5741a
		G5	2.2567a	1.2713b	0.5097b	0.5809b	0.6481c	0.5706a
2017	早稻	G1	0.1679c	0.1249c	0.1172a	0.0880d	0.0849d	0.0608c
		G2	0.2309b	0.1633b	0.1211a	0.1085c	0.1271c	0.0867b
		G3	0.1332c	0.1720b	0.1321a	0.1265b	0.1050cd	0.0771cb
		G4	0.0640c	0.1202c	0.1121a	0.1831a	0.2314a	0.1420a
		G5	0.4335a	0.2994a	0.1231a	0.1702a	0.1693b	0.1380a
	晚稻	G1	3.0867a	1.7920a	0.9286a	0.7253a	1.4853c	0.6640a
		G2	3.2480a	1.7526ab	1.0027a	0.7513a	1.6627c	0.6813a
		G3	3.0560a	1.9820a	1.0387a	0.7847a	2.1427b	0.6653a
		G4	2.8901a	1.3920c	0.9327a	0.7547a	0.9380d	0.6687a
		G5	3.0433a	1.5120bc	0.9013a	0.7311a	2.7467a	0.5407b

综合 3 年试验结果来看,2015 年早晚稻糙米镉含量均表现免耕高于翻耕与旋耕处理的趋势,但 2016 和 2017 年免耕早晚稻糙米镉含量均保持较低水平,且 2016 年晚稻和 2017 年早稻均显著低于其他各处理。可见,随年限延长,免耕处理降低糙米镉含量的效应逐渐显现。

2.4 土壤耕作方式对水稻穗镉积累量的影响

由表 4 可知,2015 年早稻齐穗期穗镉积累量以 G1 处理最高,为 0.114 5 g/hm²,且显著高于其他各处理。至灌浆中期,以 G2、G5 处理增幅最高,穗镉积累量表现为 G2>G4>G5>G3>G1,成熟期以 G1、G2、G5 处理显著大于 G2、G3 处理,。晚稻齐穗期至灌浆期均以 G1 处理最高且显著大于其他各处理,灌浆中期穗镉积累量表现为 G1>G2>G4>G3>G5,

成熟期以 G3 处理且与其他各处理间差异显著。

2016 年早稻,齐穗期、灌浆中期穗镉积累量均以 G1 最高且显著高于其他各处理,齐穗期至灌浆中期以 G2 增幅最大。灌浆中期穗镉积累量表现为 G1>G2>G5>G3>G4。G1 处理分别比 G2、G3、G4、G5 处理高出 14.14%,43.52%,43.21%,31.15%,成熟期以 G1、G2、G3 处理显著高于 G4、G5 处理。晚稻齐穗期穗镉含量以 G4 处理和 G5 处理显著高于 G2 处理, G2 处理显著高于 G1、G3 处理。齐穗期至灌浆中期以 G4 处理增幅最大。灌浆中期以 G4 处理显著高于 G2 和 G5 处理,以 G1 处理最低,成熟期以 G2、G3>G4、G5>G1,且差异显著。

2017 年早稻齐穗期穗镉含量以 G3 显著高于其他各处理,以 G5 处理最低。齐穗期至灌浆中期以

G2 处理增幅最大。灌浆中期以 G2 处理显著高于其他各处理,以 G4 处理最低,成熟期以 G5 处理显著高于其他各处理,以 G1 处理显著低于其他各处理。晚稻齐穗期、灌浆中期均以 G3 处理最高且显著大于其他各处理。齐穗期、灌浆中期趋势为 G3>G4>G2>G1>G5,成熟期以 G4、G5 处理显著高于 G1、

G2、G3 处理。
综合 3 年试验结果来看,早稻 G3、G4 处理穗镉累积量在 2016 年和 2017 年最低,G2 处理穗镉累积量 3 年一直处于较高水平;晚稻穗镉累积量在 2016 年和 2017 年 G1 处理均处于较低水平,说明翻耕利于镉在穗中累积,而免耕相反。

表 4 土壤耕作方式对水稻穗镉累积量的影响 单位:g/hm²

年份	季别	时期	G1	G2	G3	G4	G5
2015	早稻	齐穗期	0.1145a	0.0626c	0.0632c	0.0812b	0.0759b
		灌浆中期	0.3696c	0.6351a	0.5075b	0.6272a	0.5786a
		成熟期	1.4813a	1.3105a	1.1827b	1.2238b	1.3503a
	晚稻	齐穗期	0.3899a	0.2774c	0.3120b	0.3107b	0.2665c
		灌浆中期	0.8169a	0.6552b	0.5690c	0.6275b	0.5135c
		成熟期	1.5309a	1.6135a	1.4178b	1.5499a	1.5648a
2016	早稻	齐穗期	0.3713a	0.1347b	0.1393b	0.1193b	0.1172b
		灌浆中期	0.8039a	0.7043b	0.5601c	0.5616c	0.6130c
		成熟期	1.3543b	1.5636a	1.6605a	1.3738b	1.3883b
	晚稻	齐穗期	0.5410c	0.9902b	0.5326c	1.3299a	1.3663a
		灌浆中期	1.5651c	2.3771b	1.8256c	5.0840a	2.6575b
		成熟期	4.0790c	5.8923a	5.7100a	4.9866b	4.8735b
2017	早稻	齐穗期	0.1910b	0.1939b	0.2926a	0.1805b	0.1632b
		灌浆中期	0.6963b	0.6723c	0.6384c	0.7344b	1.3221a
		成熟期	0.8426d	1.0344b	1.1566b	0.9437b	1.5557a
	晚稻	齐穗期	0.9118c	0.9883c	1.7328a	1.5290b	0.8526c
		灌浆中期	2.9608bc	3.4386b	6.5788a	6.2120a	2.2441c
		成熟期	7.4425b	7.6127b	7.4729b	8.6781a	7.9732a

2.5 土壤耕作方式对土壤有效镉含量的影响

由表 5 可知,土壤有效镉含量随生育期推进,大体呈现出先增加后减少的趋势。2015 年早稻除灌浆中期以外,G1 处理高于其他各处理,G2 处理次之。孕穗期 G1 处理显著高于 G3、G5 处理。齐穗期 G1 处理显著高于其他各处理。成熟期 G1 处理显著高于 G3、G4、G5 处理。灌浆中期 G4 处理最高,G1 处理最低,且差异显著。

2015 年晚稻,G1 处理土壤有效镉除齐穗期次于 G2 处理以外,其他各生育期均最高。其中分蘖盛期最高为 0.435 4 mg/kg,显著高于其他各处理。孕穗期为 0.540 4 mg/kg,分别比 G2、G3、G4、G5 处理高 146.75%,163.6%,143.09%,389.49%。齐穗期以 G2 处理显著高于 G1 处理,G1 处理显著高于其他各处理。灌浆中期 G1、G2 差异不显著,且两者显著高于其他 3 个处理。成熟期 G4 处理最高为 0.350 7 mg/kg,G1 处理次之,为 0.342 7 mg/kg。

2016 年早稻土壤有效镉全生育期均以 G1 处理最高,分蘖盛器以 G1、G2 处理显著高于 G3、G4、G5 处理。孕穗期 G1、G2 处理显著高于 G4、G5 处理,G3 处理最低且与 G4、G5 处理差异显著。齐穗期 G1

处理为 0.613 7 mg/kg,且显著大于其他各处理。灌浆中期 G1 处理增至季度最高为 0.649 4 mg/kg,比其他各处理分别高出 10.63%,56.70%,60.86%,27.15%。成熟期 G1、G5 处理显著高于其他各处理。2016 年晚稻土壤有效镉分蘖盛期、孕穗期均以 G5 处理最高,且与其他各处理差异达到显著水平。齐穗期以 G1 处理最高。灌浆中期以 G1 处理最高且显著高于 G3、G4 处理。晚稻成熟期以 G1、G2 处理高于其他各处理,以 G5 处理最低且差异显著。

2017 年土壤分为 0—10,10—20 cm 上下 2 层,分别测量有效镉含量。随土层深度增加,有效镉含量明显降低,且以 G1 处理的下降幅度最大。除晚稻孕穗期、灌浆中期下层土壤 G1 处理稍次于其他处理外,全年份上下 2 层土壤均以 G1 处理最高,且 G1 处理 0—10 cm 土层早晚期均显著高于其他各处理。此外,G5 处理在晚季 0—10 cm 土层有效镉含量明显提高,成熟期达到了 0.739 9 mg/kg,仅次于 G1 处理。

早稻灌浆中期至成熟期有效镉明显降低,这与当年此时节连续暴雨淹水有关。早稻 10—20 cm 土层成熟期无显著差异。晚稻 10—20 cm 土层成熟期 G1、G3、G5 处理间无差异,且显著高于 G2、G4 处理。

综合 3 年的试验结果来看,耕作方式明显改变了土壤的有效镉含量。各生育期之间处理呈现出一定幅度的变化,这可能是由于灌溉水、外界空气污染,气候条件等因素对土壤理化性质如 pH、*Eh*、有机质等产生了影响。相较于其他处理,双季免耕处理明显提高了土壤有效镉含量,双季旋耕处理则降低了有效镉含量,其他各处理对土壤有效镉的影响及机理有待进一步研究。

表 5 土壤耕作方式对稻田土壤有效镉含量的影响 单位:mg/kg

年份	土层深度/cm	季别	处理	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	灌浆中期	成熟期
2015		早稻	G1		0.3652a	0.6425a	0.2968b	0.4373a
			G2		0.2858ab	0.4095b	0.3622ab	0.3889ab
			G3		0.2806b	0.3151b	0.3832ab	0.2986c
			G4		0.2937ab	0.3213b	0.4384a	0.3344bc
			G5		0.2680b	0.3957b	0.3334ab	0.3524bc
		晚稻	G1	0.4354a	0.5404a	0.4297b	0.4851a	0.3427a
			G2	0.3338b	0.2190b	0.5347a	0.4729a	0.2559b
			G3	0.2643cd	0.2050b	0.2191c	0.2484b	0.3181ab
			G4	0.2531d	0.2223b	0.2305c	0.2820b	0.3507a
			G5	0.2966c	0.1114c	0.2167c	0.3136b	0.2545b
2016		早稻	G1	0.5886a	0.6049a	0.6137a	0.6494a	0.5112a
			G2	0.5638a	0.5929a	0.4788b	0.5870ab	0.3376b
			G3	0.4339b	0.3438c	0.5111b	0.4144c	0.2665c
			G4	0.3826b	0.4780b	0.4936b	0.4037c	0.2881c
			G5	0.4076b	0.4442b	0.4225c	0.5107b	0.4835a
		晚稻	G1	0.3724b	0.1432b	0.7791a	0.2938a	0.3309a
			G2	0.4208ab	0.1315b	0.4002b	0.2265ab	0.3260a
			G3	0.3924b	0.1140b	0.2846c	0.1586b	0.2586b
			G4	0.2482c	0.1399b	0.2144c	0.1906b	0.2008c
			G5	0.4525a	0.2132a	0.2463c	0.2255ab	0.1854c
2017	0—10	早稻	G1	0.7480a	0.8537a	0.8301a	0.4920a	0.5645a
			G2	0.5323b	0.2270c	0.5112b	0.1338c	0.3747b
			G3	0.3940c	0.3358c	0.3968c	0.1312c	0.3920b
			G4	0.3657c	0.4807b	0.5367b	0.1151c	0.3123b
			G5	0.3557c	0.2773c	0.5727b	0.2112b	0.4018b
	10—20	早稻	G1	0.4155a	0.3458a	0.4608a	0.1767a	0.1020a
			G2	0.3730b	0.2972a	0.2075c	0.0473b	0.0697a
			G3	0.2743c	0.1633b	0.1623c	0.0790b	0.0512a
			G4	0.1915d	0.2068b	0.2075c	0.0465b	0.0945a
			G5	0.1780d	0.0985c	0.3462b	0.0571b	0.0712a
	0—10	晚稻	G1	0.7647a	0.8059a	0.8608a	0.9525a	0.9721a
			G2	0.3811b	0.5457b	0.2959d	0.6138c	0.6249c
			G3	0.3740b	0.4748c	0.6719b	0.6237c	0.6148c
			G4	0.3198bc	0.5714b	0.4205c	0.4305d	0.2997d
			G5	0.2180c	0.5281b	0.3683cd	0.7043b	0.7399b
	10—20	晚稻	G1	0.1982a	0.2608ab	0.4075a	0.2708ab	0.4058a
			G2	0.0748c	0.1855d	0.1917d	0.2828a	0.2962b
			G3	0.0913c	0.2368bc	0.2497c	0.2632b	0.3771a
			G4	0.1258b	0.2222c	0.1734d	0.1789d	0.2436b
			G5	0.0709c	0.2757a	0.2766b	0.2431c	0.3548a

2.6 土壤耕作方式对土壤 pH 的影响

2017 年增加了土壤 pH 的测定,分为上(0—10 cm)、下(10—20 cm)2 层。由图 1 可知,早稻上层土壤 pH 均明显低于下层土壤。随生育期的推进,下层土壤表现出略微上升的趋势,上层土壤则表现为不稳定且略微

下降的趋势。各处理与试验开始时(pH 6.12)相比,下降明显,且以 G1 免耕处理下降最为明显。由图 2 可知,2017 年晚稻土壤 pH 除 G3 处理上层土壤外,随生育期变化均表现出下降的趋势,以 G1 处理酸化最为明显。下层土壤 pH 同样稍高于上层土壤。

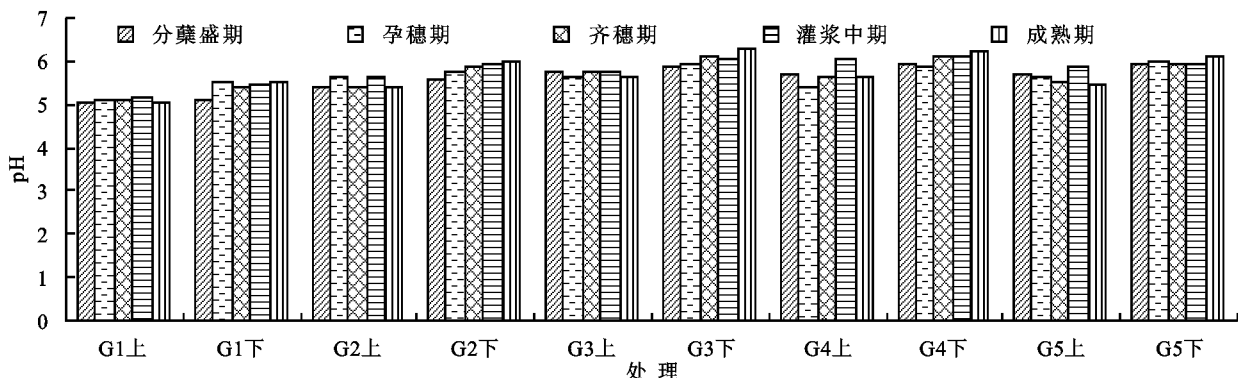


图 1 2017 年早稻土壤 pH

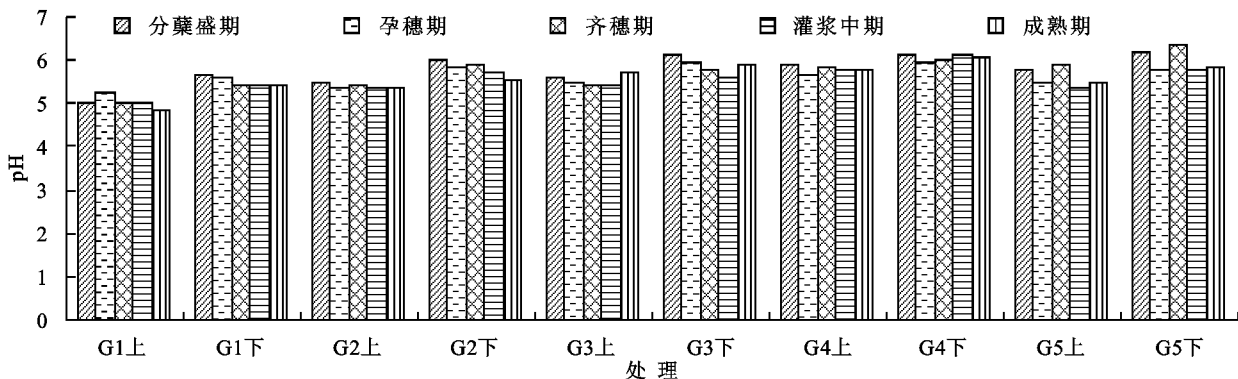


图 2 2017 年晚稻土壤 pH

3 讨论与结论

3.1 土壤耕作方式对水稻产量及产量构成的影响

土壤耕作方式对水稻产量有直接的影响。本研究从提高双季总产的角度出发,双季翻耕最好,早翻晚免次之,双季免耕、双季旋耕下降明显。有研究^[12-14]表明,深翻耕能增加土壤贮水量,改善土壤结构,使作物根系发达从而提升产量。免耕技术作为一种轻简栽培方式,已经在国内外有较大规模的应用。但关于免耕能否带来高产尚有争议。兰全美等^[15]研究表明,与翻耕相比,免耕处理有效穗数、结实率有明显下降,这与本试验结果相同。钱银飞等^[16]研究发现,翻耕能提高产量,旋耕和半免耕处理(早稻免耕、晚稻旋耕)次之,免耕处理最低,原因是免耕使有效穗数、每穗粒数、结实率下降。也有研究认为免耕可使作物增产。姚珍等^[17]研究表明,免耕能提高水稻有效穗数,增加水稻产量。有研究^[18]认为,稻田免耕一年两季,有利于土壤物理性状的改善和提高表土的养分含量,随着免耕时间的延长(4 季以上),土壤开始板结,从而降低了免耕产量。本试验也发现,连续免耕条件下水稻产量下降越来越明显。可见,各地水稻生产必须因地

制宜合理选择土壤耕作方式。

3.2 土壤耕作方式对水稻穗镉含量及累积量的影响

本试验深入探究了成熟期穗各部位及糙米的镉含量及累积量,发现镉含量表现枝梗>空粒>谷壳,糠层>糙米>精米的趋势,这与前人^[19]研究结果一致。

2016 年及 2017 年晚稻穗镉含量相对于 2015 年有明显的提升,可能是当地工厂下半年开工排放的污染物通过灌溉、大气沉降的方式被植株吸收所致。2017 年早稻穗镉含量及累积量都有所下降,可能是早季水稻灌浆时期连续暴雨使稻田处于长期淹水的环境,而淹水条件能显著减少植株对镉的吸收^[5]。本试验结果发现,免耕处理降低了双季稻穗镉积累速率、糙米镉含量、镉累积总量;翻耕处理利于穗镉的累积,提高了糙米中的镉含量。从保证双季稻产量、降低稻米镉含量与轻简省工的角度出发,早翻晚免是中度镉污染稻田双季稻的最优土壤耕作方式。

重金属镉在水稻植株体内的吸收转运受多种因素的影响,如水稻品种、土壤理化性质、大气沉降、耕作栽培措施等。常同举等^[6]研究表明,土壤耕作方式对重金属在水稻根—茎叶间的迁移能力有影响。汤

文光等^[7]研究发现,耕作措施主要影响 0—10 cm 耕层土壤性状,长期免耕使得水稻植株地上部分富集镉能力较强,但长期免耕的穗镉含量低于长期旋耕,这与本试验结果一致。但他认为,长期免耕秸秆不还田会使土壤镉含量降低,长期旋耕和翻耕会使土壤镉含量增加。本试验认为,长期免耕秸秆不还田会使土壤有效镉含量显著上升,长期翻耕和旋耕土壤有效镉变化不明显。原因可能是汤文光等^[7]未测量有效镉含量,只从全镉含量进行分析,且其试验处理和本试验有所区别。崔孝强等^[20]研究发现,土壤有机质对镉有明显活化作用,有机质含量与土壤有效镉含量呈极显著正相关关系,垄作免耕使土壤有机质含量提高是其导致土壤有效镉含量提高的重要因素。前人对 pH 与土壤有效镉的关系已做了大量的研究,一般认为 pH 与土壤有效镉呈显著负相关关系。本试验中,免耕处理土壤酸化严重,这或是免耕处理土壤有效镉含量较高的原因之一。综上,本试验认为,长期免耕处理相较于翻耕、旋耕处理显著增加了土壤 0—10 cm 耕层镉的有效性,但免耕同时阻碍了镉向穗迁移的能力,而翻耕、旋耕处理则促进了镉向穗中迁移。

参考文献:

- [1] 唐绍清. 稻米蒸煮和营养品质性状的 QTL 定位[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [2] 赵雄,李福燕,张冬明,等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2236-2240.
- [3] 肖相芬,张经廷,周丽丽,等. 中国水稻重金属镉与铅污染 GAP 栽培控制关键点分析[J]. 中国农学通报,2009,25(21):130-136.
- [4] 李鹏. 水分管理对不同积累特性水稻镉吸收转运的影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [5] 沈欣,朱奇宏,朱捍华,等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8):1449-1454.
- [6] 常同举,崔孝强,阮震,等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学,2014,35(6):2381-2391.
- [7] 汤文光,肖小平,唐海明,等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):168-176.
- [8] 谷子寒. 土壤耕作和灌水方式对镉污染稻田水稻镉积累与分配的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2017.
- [9] 李强,赵秀兰,胡彩荣. ISO 10390:2005 土壤质量 pH 的测定[J]. 污染防治技术,2006(1):53-55.
- [10] 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.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. GB 2762—2017 食品安全国家标准:食品中污染物限量[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- [12] 吴建富. 不同耕作方式对水稻产量及其源库特性的影响[C]//中国作物学会. 福建农林大学. 2008 中国作物学会学术年会论文摘要集. 北京:中国作物学会,2008:1.
- [13] 褚鹏飞,于振文,王东,等. 耕作方式对小麦开花后旗叶水势与叶绿素荧光参数日变化和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2012,38(6):1051-1061.
- [14] 郭金瑞,边秀芝,闫孝贡,等. 吉林省玉米高产高效生产土壤调控技术研究[J]. 玉米科学,2008,16(4):140-142.
- [15] 兰全美,张锡洲,李廷轩. 水旱轮作条件下免耕土壤主要理化特性研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):145-149.
- [16] 钱银飞,刘白银,彭春瑞,等. 不同耕作方式对南方红壤区双季稻周年产量及土壤性状的影响[C]//中国作物学会. 2014 年全国青年作物栽培与生理学术研讨会论文集. 北京:中国作物学会,2014:2.
- [17] 姚珍,黄国勤,张兆飞,等. 稻田保护性耕作研究:Ⅱ. 不同耕作方式对水稻产量及生理生态的影响[J]. 江西农业大学学报,2007,29(2):182-186.
- [18] 吴建富,潘晓华,石庆华,等. 不同耕作方式对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3):496-502.
- [19] 袁珍贵,陈平平,郭莉莉,等. 土壤镉含量影响水稻产量与稻穗镉累积分配的品种间差异[J]. 作物杂志,2018(1):107-112.
- [20] 崔孝强,阮震,刘丹,等. 耕作方式对稻—油轮作系统土壤理化性质及重金属有效性的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(5):73-77.