

长期不同耕作方式与秸秆还田对稻田镉生物有效性的影响

龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 孙耿, 李超, 肖小平

引用本文:

龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 等. 长期不同耕作方式与秸秆还田对稻田镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1888–1896.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0152>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响

杨定清, 李霞, 周娅, 罗丽卉, 谢永红, 王棚, 李旭毅

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1150–1158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1137>

陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价

赵佐平, 付静, 岳思羽, 王蒙, 宋凤敏, 刘智峰, 汤波, 同延安

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1983–1992 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0266>

秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响

张庆沛, 李冰, 王昌全, 杨兰, 肖瑞, 郑顺强, 郭勇

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2345–2352 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0553>

秸秆炭化物长期还田下农田镉风险研究

朱文彬, 王慎强, 赵旭, 汪玉

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 117–123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0032>

生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响

王义, 王勃然, 周文涛, 祝志娟, 刘莉, 祝博文, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1479–1485 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1408>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 等. 长期不同耕作方式与秸秆还田对稻田镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1888–1896.

LONG Z D, SUN M, LUO Z C, et al. Effects of different long-term tillage methods and straw returning on cadmium bioavailability in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1888–1896.



开放科学 OSID

长期不同耕作方式与秸秆还田 对稻田镉生物有效性的影响

龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 孙耿*, 李超, 肖小平

(湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 长沙 410125)

摘 要:以湖南省典型双季稻区的土壤-水稻系统为研究对象,通过长期田间连续定位试验,研究不同耕作方式和秸秆还田对土壤-水稻系统镉生物有效性的影响。试验采用随机区组设计,共设4个处理:翻耕+秸秆不还田(CT);翻耕+秸秆还田(CTS);旋耕+秸秆还田(RTS);免耕+秸秆还田(NTS)。结果表明:NTS处理增加了土壤阳离子交换量,降低了粉粒的比例。NTS处理土壤总镉和离子交换态镉含量分别为 $(0.48\pm0.01)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(0.39\pm0.01)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与CTS和RTS处理均无显著差异,但显著高于CT处理。NTS处理早稻和晚稻糙米总镉含量分别高达 $(0.30\pm0.04)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(0.60\pm0.07)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过 $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的国家食品安全标准(GB 2762—2017),且显著高于其他处理。水稻糙米中总镉含量和土壤总镉、碳酸盐结合态镉和铁锰氧化物结合态镉含量显著正相关。研究表明,耕作强度越弱土壤中镉的生物有效性越高,秸秆还田相对于不还田处理增加了镉的生物有效性。耕作方式和秸秆还田通过影响土壤镉生物有效性进而影响水稻镉含量,免耕秸秆还田增加了土壤和水稻糙米中的镉,带来了镉超标的安全问题。

关键词:耕作方式;秸秆还田;双季稻;镉;生物有效性

中图分类号:S154.4;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)09-1888-09 doi:10.11654/jaes.2021-0152

Effects of different long-term tillage methods and straw returning on cadmium bioavailability in paddy fields

LONG Zedong, SUN Mei, LUO Zunchang, SUN Geng*, LI Chao, XIAO Xiaoping

(Institute of Soil and Fertilizer, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, 410125 China)

Abstract: The effects of different tillage methods and straw returning on the bioavailability of cadmium in a soil-rice system in Hunan Province were studied with the aim to provide supporting data for improved soil quality and reduced rice cadmium content in these systems. The trial was randomized and a total of four treatment groups were designed: plow tillage with residue removed (CT); plow tillage with residue retention (CTS); rotary tillage with residue retention (RTS); no-tillage with residue retention (NTS). The study found that the NTS group increased the soil CEC content and reduced the proportion of powder particles. The total cadmium and ion-exchanged cadmium contents in NTS soil were $(0.48\pm0.01)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(0.39\pm0.01)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. These were not significantly different from the CTS and RTS treatments but were significantly higher than the CT treatments. The total cadmium content of brown rice from early and late rice in NTS were $(0.30\pm0.04)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(0.60\pm0.07)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which exceeded the national food safety standards ($0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and were significantly higher than in the other treatment groups. The total cadmium content in brown rice was positively correlated with total soil cadmium, carbonate bound cadmium, and iron-manganese bound cadmium. The weaker the tillage intensity, the higher the

收稿日期:2021-02-04 录用日期:2021-04-01

作者简介:龙泽东(1992—),男,湖南怀化人,博士研究生,助理研究员,从事土壤重金属污染和微量元素与土壤健康研究。E-mail:longzd313@hunaas.cn

*通信作者:孙耿 E-mail:sungeng@hunaas.cn

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2019JJ50338);区域创新发展联合基金项目(U19A2048);农业部与财政部科研专项(农办财函[2015]38号)

Project supported: The Natural Science Foundation of Hunan Province, China(2019JJ50338); Joint Regional Innovation and Development Fund(U19A2048); The Science Research Project Jointly Sponsored by the Ministry of Agriculture and the Ministry of Finance, PRC(Document[2015]No.38)

bioavailability of cadmium in soil, and the higher the bioavailability of cadmium in straw returning to the field compared with the non-return treatment. Tillage methods and straw returning affect the cadmium content in rice by affecting soil bioavailable cadmium. No-tillage with straw returning to the field increases the cadmium content in soil and brown rice, resulting in unsafe cadmium levels that exceed the national food safety standards.

Keywords: tillage methods; straw returning; double cropping rice; cadmium; bioavailability

农田重金属污染近年来受到人们的关注,特别是镉(Cd),影响到了农产品的质量和人类的健康^[1-2]。从2014年原环境保护部与原国土资源部联合开展的土壤污染调查结果来看,我国部分地区土壤污染严重,其中Cd是重金属污染元素中污染超标率最高的元素,点位超标率高达7%^[3]。水稻土中高浓度Cd及其在稻米和食物链中的易位和后续积累是一个全球性的环境问题^[4]。红壤是我国亚热带地区的主要土壤类型,其中水稻土与人类耕作活动密切相关。由于红壤pH较低,加上水稻耕作过程中施用化肥、农药等,造成土壤中Cd的生物可利用度较高,容易被植物吸收利用,进而通过食物链进入人体,影响人类健康^[1,5]。因此,如何解决水稻土中Cd污染问题显得极为重要且迫切。

通常认为土壤的理化性质影响镉的生物可利用度^[6-7],与植株各部位镉含量密切相关。不同的耕作方式会改变土壤理化性质^[8],合理的土壤耕作方式可以改善土壤水热状态、土壤结构、化学养分、土壤微生物性状等,促进作物生长,提高作物产量^[9]。土壤耕作措施通常有翻耕、旋耕和少免耕等。其中,翻耕是传统的土壤耕作方式,对土壤含水量、总孔隙度、水稳性团聚体含量及团聚体结构稳定系数均有较大影响;旋耕耕作深度一般低于翻耕,为8~15 cm;免耕则是一种保护性耕作方式,但长期免耕会使得土壤耕作层变浅、土壤板结^[10-11]。李友军等^[12]发现免耕秸秆还田相对于传统耕作能提高土壤蓄水量、土壤有机质及氮、磷、钾含量。常同举等^[13]的研究结果表明,耕作方式主要通过影响土壤pH进而影响土壤重金属的有效量及水稻重金属的含量。汤文光等^[14]在比较不同耕作措施下双季稻田土壤结构、养分及重金属含量的变化规律时发现,长期免耕虽然降低了土壤镉含量,但同时也降低了土壤养分库容,长期翻(旋)耕虽然增加了土壤养分库容,但同时也增加了土壤镉含量。目前关于长期耕作方式与秸秆还田对土壤-水稻系统中镉生物有效性影响及迁移转运特征的研究较少,因此,本研究以湖南省典型双季稻区的土壤-水稻系统为研究对象,分析不同耕作方式与秸秆还田对土壤理化性质以及镉形态的影响,

并进一步了解不同耕作方式与秸秆还田下镉在湖南红壤区土壤-水稻系统中的迁移转运特征,为解决湖南双季稻区存在的镉污染治理问题提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

本长期保护性耕作定位试验开始于2006年,地点位于湖南省长沙市宁乡市回龙铺镇天鹅村(112°18'E, 28°07'N)。试验前采用冬闲-早稻-晚稻种植模式,由农户统一采取传统耕法进行耕种。该区域属于亚热带季风性湿润气候,年均气温约为16.8℃,年均降雨量约为1358 mm,年蒸散量约为1354 mm,年日照时数约为1738 h,年平均无霜期为274 d,光热雨水资源充足。试验区土壤为典型的红壤丘陵区水稻土^[15],试验前测得0~20 cm耕层土壤的理化性质为:土壤容重1.21 g·cm⁻³,有机质34.9 g·kg⁻¹,速效氮224.1 mg·kg⁻¹,有效磷4.38 mg·kg⁻¹,速效钾97.1 mg·kg⁻¹,全氮1.29 g·kg⁻¹,全磷1.23 g·kg⁻¹,全钾17.63 g·kg⁻¹,总镉0.35 mg·kg⁻¹,pH 6.30。

1.2 试验设计

试验采用早-晚稻生产体系,采用秧盘育苗和抛秧技术,早稻品种为湘早籼45号,抛秧前施用复合肥391 kg·hm⁻²(N 195.5 kg·hm⁻², P₂O₅ 34.14 kg·hm⁻², K₂O 97.33 kg·hm⁻²)作基肥,返青后追施尿素47 kg·hm⁻²(N 21.62 kg·hm⁻²)。晚稻品种为湘晚稻13号,抛秧前基肥施用复合肥469 kg·hm⁻²(N 234.50 kg·hm⁻², P₂O₅ 40.95 kg·hm⁻², K₂O 116.75 kg·hm⁻²),返青后追施尿素39 kg·hm⁻²(N 17.94 kg·hm⁻²)。两季土壤耕作前灌水深约2 cm,收获后留茬高度约25 cm,还田处理的秸秆年还田量约为12500 kg·hm⁻²。本试验共设4个处理:(1)翻耕秸秆不还田(CT):早、晚稻收获后秸秆不还田,全量移出稻田,抛秧前翻耕,耕深约20 cm;(2)翻耕秸秆还田(CTS):早、晚稻收获后秸秆全量还田,抛秧前翻耕,耕深约20 cm;(3)旋耕秸秆还田(RTS):早、晚稻收获后秸秆全量还田,抛秧前旋耕,耕深约8~15 cm;(4)免耕秸秆还田(NTS):早、晚稻收获后秸秆全量覆盖还田,土壤不翻耕,直接抛秧。每

个处理重复3次,共12个小区,每个小区面积为64 m²,小区中间田埂用塑料薄膜覆盖,高度30 cm,各小区分别排水和灌溉。

1.3 样品采集

采用“S”形多点取样法,分别在2019年7月和10月早、晚稻成熟时采集植株样品,晚稻收获后采集0~20 cm土层原状土壤样品。植株样品清洗根际土后烘干,分为根、茎叶和稻谷三部分保存。土壤样品在土壤田间持水量10%左右时,按其结构纹理剥离成直径10 mm左右的细小土块,去除有机残体和碎石后置于阴凉处自然风干,备用。

1.4 测定方法

镉的不同形态通过 Tessier 法进行提取^[16],采用原子吸收分光光度法测定(表1)。土壤pH用pH计(ST 2100,奥豪斯仪器常州有限公司)测定,水土比为2.5:1。阳离子交换量(CEC)使用BaCl₂-MgSO₄法测定^[17]。可溶性有机碳(DOC)含量采用重铬酸钾加热法测定。供试土样的机械组成(粗砂2~0.25 mm、细砂0.25~0.05 mm、粉粒0.05~0.001 mm和黏粒<0.001 mm)采用干筛法测定。

1.5 数据处理与分析

采用转运系数和富集系数分析镉在土壤-水稻系

统的迁移特性,公式如下:

$$TF_{S-R_0}=C_{R_0}/C_S\times 100\%$$

$$TF_{R_0-L_e}=C_{L_e}/C_{R_0}\times 100\%$$

$$TF_{L_e-R_i}=C_{R_i}/C_{L_e}\times 100\%$$

$$BCF=C_{R_i}/C_S\times 100\%$$

式中:TF为转运系数;BCF为富集系数; C_S 、 C_{R_0} 、 C_{L_e} 和 C_{R_i} 分别代表土壤、水稻根、水稻茎叶和水稻糙米中的镉含量,mg·kg⁻¹。

本试验使用R软件进行数据分析,不同组别之间的显著差异性分析通过单因素方差分析完成(One-way ANOVA),多重比较通过Duncan法检验,相关性分析通过Pearson方法完成,采用偏最小二乘路径模型(The partial least squares path mode, PLS-PM)解析耕作方式、秸秆还田、土壤理化性质、土壤镉生物有效性和水稻镉含量之间的相互关系,所有绘图均通过R软件和Origin 2020完成。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和镉形态

不同耕作方式与秸秆还田对土壤理化性质的影响如表2所示。各处理之间土壤粗砂、细砂和黏粒占比无显著差异($P>0.05$),但CTS(65.04%±2.06%)粉粒占比显著大于NTS(59.69%±3.86%, $P<0.05$)。NTS处理CEC含量为(11.20±0.20)cmol·kg⁻¹,显著高于CT和CTS处理($P<0.05$)。各处理的土壤pH和DOC均无显著差异($P>0.05$)。试验小区土壤均呈弱酸性,各处理pH平均值为5.70~5.93。

如图1所示,不同耕作方式与秸秆还田对土壤中镉形态分布特征产生了显著影响。CTS和NTS处理离子交换态镉含量分别为(0.35±0.01)mg·kg⁻¹和(0.35±0.02)mg·kg⁻¹,均显著高于CT处理的(0.29±0.04)mg·kg⁻¹($P<0.05$)。NTS处理碳酸盐结合态镉含

表1 Tessier 五步法提取土壤不同形态的镉

Table 1 Tessier five-step method for extracting different forms of Cd from different forms in soil

提取顺序 Extraction sequence	提取形态 Extraction morphology	提取试剂 Extraction reagent
1	离子交换态	1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂
2	碳酸盐结合态	1 mol·L ⁻¹ NaAc
3	铁锰氧化物结合态	0.04 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl
4	强有机结合态	0.01 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 和30% H ₂ O ₂
5	残渣态	HNO ₃ 、HF、HClO ₄

表2 不同处理土壤的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils under different treatments

处理 Treatment	粗砂 Coarse/%	细砂 Fine/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)	土壤pH Soil pH	可溶性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)
CT(n=3)	15.82±0.63a	19.42±1.83a	63.01±1.94ab	1.75±0.12a	10.03±0.15c	5.73±0.23a	74.13±7.43a
CTS(n=3)	14.73±2.36a	18.15±2.27a	65.04±2.06a	2.08±0.51a	10.50±0.27bc	5.90±0.10a	75.67±2.78a
RTS(n=3)	15.69±1.94a	19.86±0.18a	62.71±1.75ab	1.74±0.26a	10.97±0.35ab	5.77±0.15a	79.93±4.00a
NTS(n=3)	16.25±0.74a	22.01±3.66a	59.69±3.86b	2.05±0.64a	11.20±0.20a	5.70±0.10a	80.09±1.34a

注:CT=翻耕秸秆不还田,CTS=翻耕秸秆还田,RTS=旋耕秸秆还田,NTS=免耕秸秆还田。不同小写字母代表不同组之间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: CT is plow tillage with residue removed, CTS is plow tillage with residue retention, RTS is rotary tillage with residue retention NTS is no-tillage with residue retention. Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

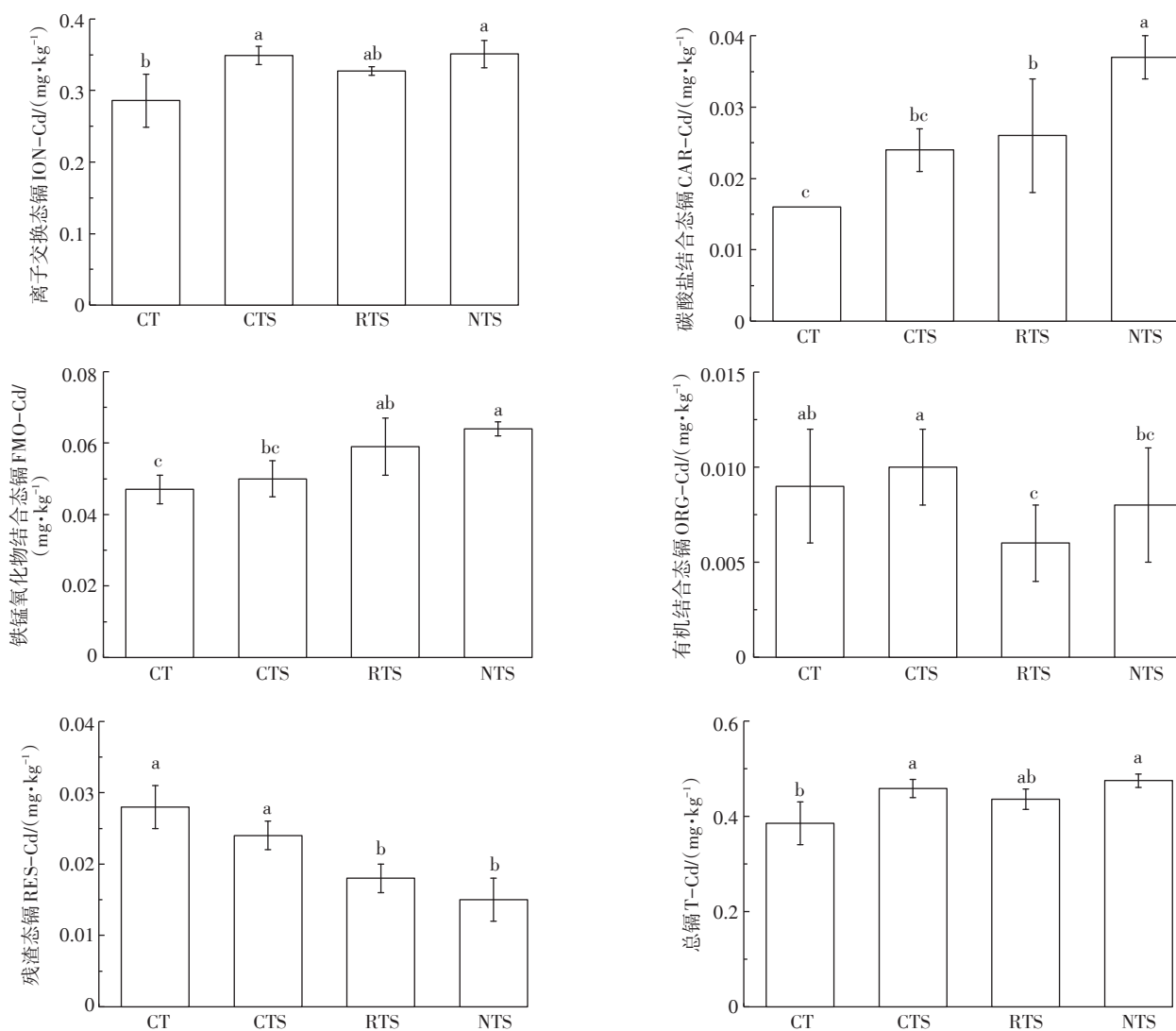
量显著高于其他处理,CT处理最低($P<0.05$)。土壤铁锰氧化物结合态镉含量CTS处理显著低于NTS处理($P<0.05$),CT处理显著低于NTS和RTS处理($P<0.05$),但与CTS无显著差异($P>0.05$)。此外,CT处理土壤总镉含量为 $(0.39\pm0.05)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于CTS处理的 $(0.46\pm0.02)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和NTS处理的 $(0.48\pm0.01)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)。

2.2 植株镉含量和转运系数

如图2所示,各处理早稻、晚稻的根和茎叶中镉含量没有显著差异($P>0.05$)。但NTS处理早稻糙米镉含量为 $(0.30\pm0.04)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CT处理的 $(0.10\pm0.02)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)和CTS处理的 $(0.16\pm$

$0.04)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)。NTS处理晚稻糙米镉含量高达 $(0.60\pm0.07)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CT、CTS和RTS处理的 (0.36 ± 0.01) 、 (0.40 ± 0.01) 、 $(0.46\pm0.04)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$)。NTS处理晚稻糙米总镉含量高于早稻,且均超过 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的国家食品安全标准(GB 2762—2017)。CT和CTS处理早、晚稻糙米镉含量均无显著差异($P>0.05$)。

镉在土壤-水稻系统中的转运系数和富集系数如表3所示,NTS处理早稻 $\text{TF}_{\text{S-Ro}}$ 为 12.18 ± 1.75 ,显著高于CT处理的 5.11 ± 0.99 ($P<0.05$),但各处理之间 $\text{TF}_{\text{Ro-Le}}$ 和 $\text{TF}_{\text{Le-Rt}}$ 均无显著差异($P>0.05$)。不同于早稻,晚稻CT处理 $\text{TF}_{\text{S-Ro}}$ 最高为 10.04 ± 0.70 ,显著高于其他处理



CT: 翻耕秸秆不还田, CTS: 翻耕秸秆还田, RTS: 旋耕秸秆还田, NTS: 免耕秸秆还田。不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
CT: Plow tillage with residue removed, CTS: Plow tillage with residue retention, RTS: Rotary tillage with residue retention, NTS: No-tillage with residue retention. Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同处理土壤镉形态分布特征

Figure 1 Distribution characteristics of different cadmium forms in soil under different treatments

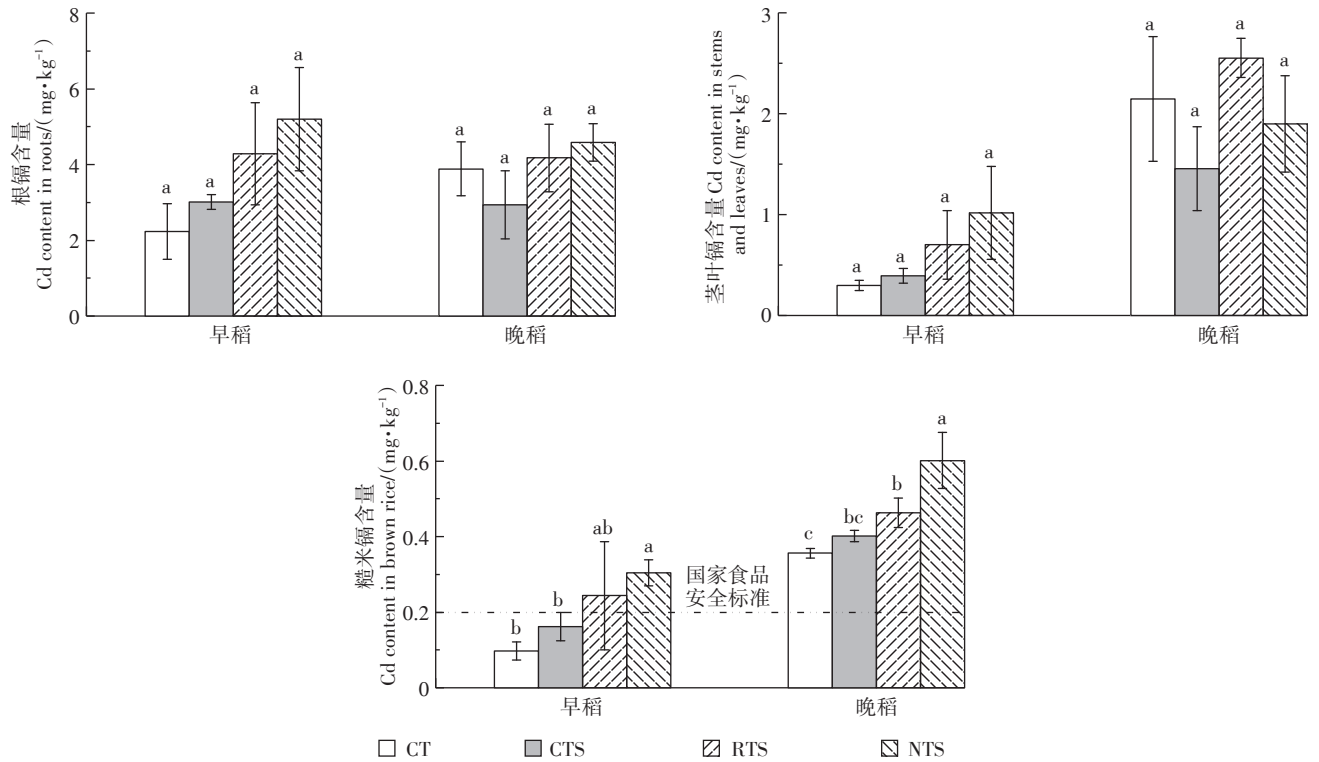


图2 不同处理水稻各部位镉含量特征

Figure 2 Characteristics of cadmium content in various parts of rice under different treatments

($P<0.05$), NTS 处理(0.33 ± 0.06) TF_{Le-Ri} 显著大于 CT 处理的 0.18 ± 0.05 ($P<0.05$) 和 RTS 处理的 0.18 ± 0.02 ($P<0.05$)。NTS 处理早稻和晚稻的 BCF 分别为 0.66 ± 0.10 和 1.27 ± 0.17 , 均高于其他处理, 说明 NTS 处理下镉更容易在水稻糙米中富集。

2.3 相关性分析

如图 3 所示, 通过相关性热图分析土壤理化性质、土壤镉形态和水稻植株镉含量之间的关系。早稻和晚稻糙米镉含量与土壤中碳酸盐结合态镉、铁锰氧化物结合态镉和总镉含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与土壤残渣态镉含量呈显著负相关关系 ($P<$

0.05)。土壤 CEC 与早稻根镉含量、茎叶镉含量、糙米镉含量和富集系数均呈显著正相关 ($P<0.05$), 与晚稻根镉含量和糙米镉含量也呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。土壤中粉粒比例与晚稻根镉含量和糙米镉含量存在显著负相关关系 ($P<0.05$), 土壤 pH 与土壤不同形态镉含量和水稻各部位镉含量之间没有显著相关性。

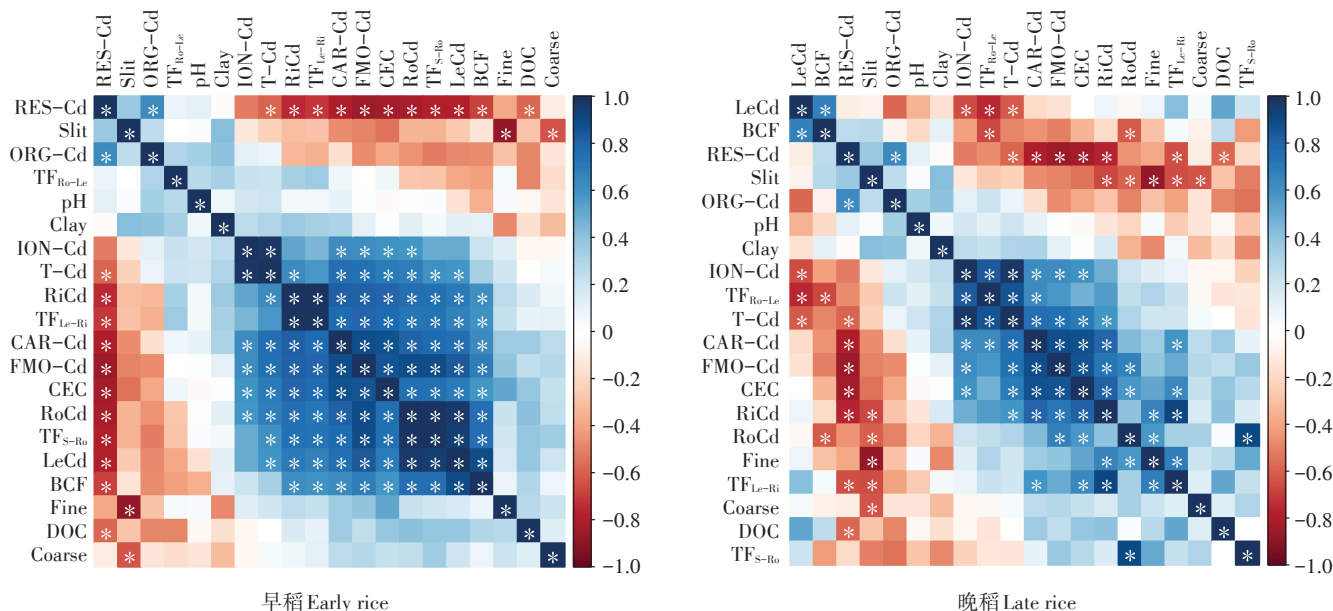
2.4 路径分析

通过 PLS-PM 分析, 耕作方式、秸秆还田、土壤理化性质、土壤镉生物有效性和水稻镉含量之间的相关关系如图 4 所示。不同强度耕作方式直接影响土壤理

表 3 不同处理早稻和晚稻的转运系数和富集系数

Table 3 Transport and enrichment coefficients of early and late rice under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	TF_{S-Ri}	TF_{Ro-Le}	TF_{Le-Ri}	BCF
早稻 Early rice	CT	$5.11\pm0.99b$	$0.15\pm0.02a$	$0.35\pm0.08a$	$0.26\pm0.07b$
	CTS	$6.70\pm0.41ab$	$0.12\pm0.01a$	$0.45\pm0.08a$	$0.36\pm0.11ab$
	RTS	$9.94\pm3.58ab$	$0.16\pm0.03a$	$0.35\pm0.17a$	$0.56\pm0.33ab$
	NTS	$12.18\pm1.75a$	$0.21\pm0.02a$	$0.27\pm0.10a$	$0.66\pm0.10a$
晚稻 Late rice	CT	$10.04\pm0.70a$	$0.54\pm0.06a$	$0.18\pm0.05b$	$0.93\pm0.09b$
	CTS	$6.42\pm2.00b$	$0.52\pm0.14a$	$0.28\pm0.04a$	$0.88\pm0.03b$
	RTS	$9.53\pm1.59b$	$0.65\pm0.24a$	$0.18\pm0.02b$	$1.07\pm0.12ab$
	NTS	$9.63\pm0.78b$	$0.42\pm0.15a$	$0.33\pm0.06a$	$1.27\pm0.17a$



T-Cd:总镉, ION-Cd:离子交换态镉, CAR-Cd:碳酸盐结合态镉, FMO-Cd:铁锰氧化物结合态镉, ORG-Cd:有机结合态镉, RES-Cd:残渣态镉, Coarse:粗砂, Fine:细砂, Slit:粉粒, Clay:黏粒, DOC:可溶性有机碳, CEC:阳离子交换量, RoCd:根镉含量, LeCd:茎叶镉含量, RiCd:糙米镉含量, TF_{S-Ro} 、 TF_{Ro-Le} 和 TF_{Le-Ri} 分别为镉在土-根、根-茎叶和茎叶-糙米的转运系数, BCF:富集系数。*表示相关性显著, $P < 0.05$

T-Cd:total cadmium, ION-Cd:ion-exchange cadmium, CAR-Cd:carbonate-bound cadmium, FMO-Cd:iron-manganese bound cadmium, ORG-Cd:organic-bound cadmium, RES-Cd:residual cadmium, Coarse:coarse sand, Fine:fine sand, Slit:silt, Clay:clay, DOC:dissolved organic carbon, CEC:cation exchange capacity, RoCd:cadmium content in root, LeCd:cadmium content in stems and leaves, RiCd:cadmium content in brown rice, TF_{S-Ro} , TF_{Ro-Le} and TF_{Le-Ri} are transport coefficient cadmium in soil-root, root-leaf and leaf-brown rice, respectively, BCF:enrichment coefficient. * indicates significant correlation, $P < 0.05$

图3 双季稻植株镉含量特征与土壤理化性质、不同形态镉分布特征的相关性热图

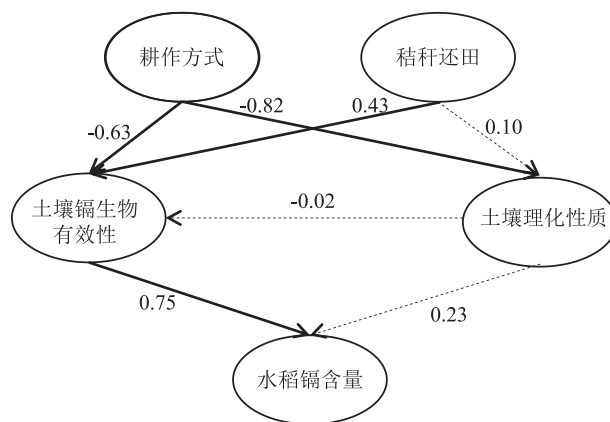
Figure 3 Heat map of the correlation between cadmium content characteristics and soil physical and chemical properties and distribution characteristics of cadmium in rice

化性质(路径系数为-0.82)和土壤镉生物有效性(路径系数为-0.63),且影响均达显著水平($P < 0.05$),而秸秆还田仅对土壤镉生物有效性产生显著影响(路径系数为0.43, $P < 0.05$)。进一步分析发现,土壤镉生物有效性显著影响水稻植株镉含量(路径系数为0.75, $P < 0.05$),土壤镉生物有效性越高,水稻镉含量越高;而土壤理化性质未对土壤镉生物有效性和水稻镉含量产生显著影响($P > 0.05$)。这表明耕作强度越弱土壤中镉的生物有效性越高,秸秆还田相对于不还田处理增加了镉的生物有效性,土壤耕作方式和秸秆还田通过影响土壤镉生物有效性进而影响水稻镉含量。

3 讨论

3.1 不同耕作方式和秸秆还田对土壤理化性质的影响

不同耕作方式会改变土壤的理化性质,影响作物的生长。本研究中,不同强度的耕作方式改变了土壤机械组成情况,翻耕还田处理的土壤粉粒比例显著高于免耕还田处理,前人的研究也有类似结果。李彤等^[18]发现保护性耕作(免耕)相对于翻耕,提高了土壤黏粒和砂粒比例,降低了粉粒比例。一项关于长期保



实线表示影响显著,虚线表示影响不显著,显著水平为0.05,模型拟合度0.67

The solid line indicates that the effect is significant, the dashed line indicates that the effect is not significant, level of significance is 0.05.

Goodness of fit is 0.67

图4 基于偏最小二乘路径模型的耕作方式、秸秆还田、土壤镉生物有效性、土壤理化性质和水稻镉含量之间的相关关系

Figure 4 Correlation between tillage methods, straw returning, bioavailable cadmium in soil, physical and chemical properties of soil and cadmium content in rice based on the partial least squares path mode

护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性的研究中,王兴等^[15]发现大团聚体含量随着耕作强度的减弱而提高。本文研究结果中,不同处理之间土壤的机械组成出现显著差异可能是因为不同强度的耕作方式对土壤物理结构的破坏程度不同,长期保护性耕作会使土壤团聚体朝大团聚体演变,从而使粉粒和黏粒含量降低,砂粒含量增加。汤文光等^[19]发现秸秆还田显著增加土壤有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾、CEC和耕作层深度,伍佳等^[20]和李录久等^[21]也发现秸秆还田有利于提高土壤肥力。此外,本研究中免耕秸秆还田处理CEC含量最高,而翻耕秸秆还田处理的CEC和有机质含量与翻耕秸秆不还田处理差异未达到显著水平。对于DOC和pH,各处理之间均无显著差异,可能是因为田间条件下气候、田间持水量和其他外源输入等复杂因素的干扰所致。

3.2 不同耕作方式和秸秆还田对镉生物有效性的影响

水稻对镉的吸收和积累不仅与土壤中的总镉含量相关,更受到土壤中镉的生物有效性的影响。结合相关性热图和路径分析结果可知,不同耕作方式和秸秆还田影响土壤中镉的形态分布,秸秆还田增加了土壤中总镉和离子交换态镉含量(CT<CTS)。在秸秆还田条件下,不同强度的耕作方式对土壤总镉和离子交换态镉影响较小,但各处理碳酸盐结合态镉和铁锰氧化物结合态镉含量差异显著,其中免耕秸秆还田处理高于其他处理。土壤中碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态镉通常不能被植物直接吸收利用,但在土壤环境发生特定变化时也会释放而被植物吸收利用,而有机结合态和残渣态镉很稳定,基本不会被植物吸收^[22-23]。前人的研究也发现了不同耕作方式对土壤镉形态分布的影响。与本研究结果不同,帅泽宇等^[24]发现双季免耕明显提高了土壤有效态镉含量,而双季旋耕则相反。DÜRING等^[25]发现免耕条件下土壤各层镉含量高于常规翻耕。在湖南醴陵双季稻田的5种不同耕作方式定位试验研究中(长期免耕、长期旋耕、长期翻耕、翻免轮耕和旋免轮耕),汤文光等^[14]也发现,长期不同耕作模式下,0~5 cm土层中土壤总镉和有效态镉含量表现为长期免耕显著高于其他耕作处理,且随着耕作频率减少,耕层土壤总镉和有效态镉含量逐渐降低。本研究中不同强度的耕作方式对耕层土壤总镉和有效态镉含量没有产生这种差异,原因是本研究的试验处理中设置了翻耕秸秆不还田处理,秸秆中的镉可能是造成不同试验处理土壤镉含量差异的主要原因,其大于不同强度耕作方式带来的影

响,使得不同强度耕作方式下土壤总镉和有效态镉含量的差异未达到显著水平。本研究没有发现土壤pH与有效态镉存在显著相关性,易亚科等^[26]的盆栽研究结果也发现移栽前土壤有效态镉含量与pH的相关性不显著,而文炯等^[7]发现通过施用石灰增加土壤pH可降低土壤镉活性。本研究中土壤pH与有效态镉相关性不显著,可能是因为不同强度的耕作方式对土壤pH的影响较小,另外大田试验中存在较多的不可控因素会弱化pH与有效态镉之间的相关性。

3.3 不同耕作方式和秸秆还田对水稻镉迁移转运特征的影响

重金属在土壤中的迁移性取决于其赋存形态,如交换态和碳酸盐结合态极易迁移,铁锰氧化物结合态和有机物结合态迁移性相对较弱,而残渣态则不易迁移^[22-23]。本研究中,由偏最小二乘路径模型结果可知,虽然秸秆还田条件下的翻耕、旋耕和免耕处理土壤总镉和离子交换态镉含量没有显著差异,但免耕秸秆还田处理土壤中潜在的生物可利用镉含量,即碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态镉含量高于翻耕秸秆还田和旋耕秸秆还田处理,这可能是导致免耕还田处理早稻和晚稻糙米中总镉含量均显著高于翻耕还田处理的原因之一,说明保护性耕作方式使土壤中的镉更容易被水稻吸收利用。相关性分析结果表明糙米中的镉与土壤总镉含量均呈显著正相关,与残渣态镉含量呈显著负相关。镉在早稻植株中的转运系数与耕作方式无相关性,但在晚稻糙米-茎叶中发现免耕还田处理的转运系数显著高于旋耕还田和翻耕不还田处理。镉在水稻植株体内迁移转运受多种因素的影响,如土壤性质、土壤镉的含量及形态、水稻品种等。常同举等^[13]的研究发现土壤耕作方式对重金属在水稻根-茎叶中转运系数有影响,其主要通过影响土壤pH进而影响土壤重金属的有效量及水稻重金属的含量。也有研究表明^[27-28],作物的吸镉能力主要由自身性质决定,外部环境条件影响较小。本研究发现免耕还田处理镉在早稻和晚稻的富集系数分别为 0.66 ± 0.10 和 1.27 ± 0.17 ,高于其他处理组,这可能是因为不同耕作强度下,水稻生长发育情况不同,从而影响了镉在水稻茎叶-糙米中的转运系数,这进一步导致免耕还田处理糙米镉含量高于其他处理,也可能是由于耕作方式引起的水稻根际微生物的变化而导致的。在之后的研究中,需进一步探究不同耕作方式对土壤微生物环境及水稻生长的影响。

本研究发现所有处理下晚稻糙米中的镉含量和

富集系数均高于早稻,这可能是由早稻和晚稻生长过程中的气候条件差异导致的。研究区域属于亚热带季风气候,早稻生长季节降水相对较大,使得水稻根系附近土壤有效态镉含量降低,同时水稻的蒸腾作用降低,减少了镉向旗叶和穗部的转运,相反晚稻生长季节气候相对干燥^[29-31]。前人的研究中也有类似结果^[32-33]。韩潇潇等^[32]通过叶面喷施不同浓度的 ZnSO_4 ,研究其对水稻各器官中镉含量的影响,结果表明不同处理间各器官镉含量均表现出晚稻高于早稻的特征。罗芬等^[33]也发现衡阳地区和岳阳地区晚稻籽粒镉含量高于早稻。本研究中晚稻镉在根-茎叶中的转运系数均大于早稻,可能是早、晚稻生长期间蒸腾作用的差异影响了镉在水稻植株中的转运。晚稻镉在茎叶-糙米的转运系数均小于早稻。由于本研究缺少水稻生理状态及蒸腾作用等相关指标,尚不能解释土壤-水稻系统中早、晚稻镉转运系数差异的原因,今后研究可进一步从水稻植株本身角度出发,研究水稻镉的吸收转运机理。

4 结论

(1)不同耕作方式与秸秆还田处理,对土壤pH和DOC无显著影响,但免耕秸秆还田处理增加了土壤CEC含量,降低了土壤粉粒的比例。

(2)耕作方式和秸秆还田均对土壤镉生物有效性产生显著影响,从而影响水稻镉含量。免耕秸秆还田处理下,土壤离子交换态镉、碳酸盐结合态镉、铁锰氧化物结合态镉和总镉含量增加,显著高于翻耕秸秆不还田处理。

(3)耕作强度越弱,土壤中镉的生物有效性越高,秸秆还田相对于不还田处理增加了镉的生物有效性,土壤耕作方式和秸秆还田通过影响土壤镉生物有效性进而影响水稻镉含量。免耕秸秆还田处理早稻和晚稻糙米中的镉含量分别高达 $(0.30 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.60 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的国家食品安全标准,显著高于其他处理,存在镉超标的安全风险。在推广对耕地进行保护性耕作的同时,不能忽视可能带来的粮食镉超标问题。

参考文献:

[1] 陈盾,王小兵,汪晓丽,等. 镉污染红壤的钝化剂筛选及钝化效果[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 115-120. CHEN D, WANG X B, WANG X L, et al. Screening of passivators for cadmium-contaminated red soil and their effects on soil remediation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 115-120.

[2] 王丽,邹茸,王秀斌,等. 适量施磷有效提高苋菜对镉污染土壤的修复能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 354-361. WANG L, ZOU R, WANG X B, et al. Effective stimulation of phytoremediation of *Amaranthus mangostanus* L. in cadmium contaminated soils through reasonable phosphorous fertilizer rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(2): 354-361.

[3] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部,国土资源部, 2014. Ministry of Environmental Protection of P. R. China, Ministry of Land Resources of P. R. China. National survey of soil pollution bulletin[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of P. R. China, Ministry of Land Resources of P. R. China, 2014.

[4] HUSSAIN B, UMER M J, LI J M, et al. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125557.

[5] 郭碧林,陈效民,景峰,等. 外源Cd胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1850-1855. GUO B L, CHEN X M, JING F, et al. Effects of exogenous cadmium on microbial biomass and enzyme activity in red paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1850-1855.

[6] PARK J H, LAMB D, PANEERSELVAM P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2): 549-574.

[7] 文炯,李祖胜,许望龙,等. 生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2496-2502. WEN J, LI Z S, XU W L, et al. Effects of quicklime and calcium magnesium phosphate application on late-season rice growth and grain cadmium uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2496-2502.

[8] 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63-70. ZHENG H B, ZHENG J Y, LUO Y, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 63-70.

[9] 汤军,黄山,谭雪明,等. 不同耕作方式对机插双季水稻产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(5): 996-1001. TANG J, HUANG S, TAN X M, et al. Effect of different tillage regimes on rice yield under mechanical transplanting in a double rice cropping system[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, 36(5): 996-1001.

[10] 江泽普,黄绍民,韦广波,等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 362-365. JIANG Z P, HUANG S M, WEI G P, et al. Effects of different no-tillage modes on rice yield and properties of paddy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 362-365.

[11] 潘孝晨,唐海明,肖小平,等. 不同耕作方式及泥浆沉实时间对机插晚稻干物质积累及产量的影响[J]. 作物研究, 2018, 32(5): 359-364, 384. PAN X C, TANG H M, XIAO X P, et al. Effects of different tillage methods and mud settling time on dry matter accumulation and yield of machine-transplanted late rice[J]. *Crop Research*, 2018, 32(5): 359-364, 384.

[12] 李友军,黄明,吴金芝,等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 42-45. LI Y

- J, HUANG M, WU J Z, et al. Effects of different tillage on utilization and run-off of water and nutrient in sloping farmland of Yuxi dryland area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):42-45.
- [13] 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. CHANG T J, CUI X Q, RUAN Z, et al. Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6):2381-2391.
- [14] 汤文光, 肖小平, 张海林, 等. 轮耕对双季稻田耕层土壤养分库容及Cd含量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(1):105-114. TANG W G, XIAO X P, ZHANG H L, et al. Effects of rotational tillage on nutrient storage capacity and Cd content in till soil of double-cropping rice region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(1):105-114.
- [15] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24):113-120. WANG X, QI J Y, JING Z H, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24):113-120.
- [16] 邓晓霞, 米艳华, 黎其万, 等. 利用改进的BCR法和Tessier法提取稻田土壤中Pb、Cd的对比研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(9):64-68. DENG X X, MI Y H, LI Q W, et al. Comparative study on extraction of Pb and Cd from paddy soils by modified BCR method and Tessier method[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(9):64-68.
- [17] 柳瑞, ABDUL Hafeez, 李恩琳, 等. 减氮配施稻秆生物炭对稻田土壤养分及植株氮素吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7):2381-2389. LIU R, HAFEZ A, LI E L, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction and biochar application on paddy soil nutrient and nitrogen uptake of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7):2381-2389.
- [18] 李彤, 王梓廷, 刘露, 等. 保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(5):859-870. LI T, WANG Z T, LIU L, et al. Effect of conservation tillage practices on soil microbial spatial distribution and soil physico-chemical properties of the northwest dry land[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(5):859-870.
- [19] 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. TANG W G, XIAO X P, TANG H M, et al. Effects of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):168-176.
- [20] 伍佳, 王忍, 吕广动, 等. 不同秸秆还田方式对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6):177-183. WU J, WANG R, LÜ G D, et al. Effects of different straw returning ways on rice yield and soil nutrients[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(6):177-183.
- [21] 李录久, 吴萍萍, 王家嘉, 等. 不同秸秆还田量对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(10):43-45. LI L J, WU P P, WANG J J, et al. Effect of different rate of straw returned to field on rice yield and soil physico-chemical properties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(10):43-45.
- [22] 裘高扬. 改良剂对稻田土壤中镉形态及有效性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. QIU G Y. Effect of modifier on cadmium morphology and availability in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [23] 孙凯, 孙彬彬, 周国华, 等. 福建龙海土壤重金属含量特征及影响因素研究[J]. 现代地质, 2018, 32(6):1302-1310. SUN K, SUN B B, ZHOU G H, et al. Study on concentration characteristics and influencing factors of heavy metals in soils in Longhai, Fujian Province[J]. *Geoscience*, 2018, 32(6):1302-1310.
- [24] 帅泽宇, 谷子寒, 王元元, 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. SHUAI Z Y, GU Z H, WANG Y Y, et al. Effects of soil tillage methods on yield components and cadmium accumulation in panicles of double-cropping rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3):348-357.
- [25] DÜRING R A, HOß T, GÄTH S. Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2):183-195.
- [26] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):428-436. YI Y K, ZHOU L B, CHEN G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):428-436.
- [27] 高茜蕾, 许军锋. 不同品种油菜取样对镉的吸收累积差异分析[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(6):479-482. GAO Q L, XU J F. Investigations of the difference of cadmium accumulated in various kinds of rapeseeds[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2015, 35(6):479-482.
- [28] 张儒德, 李军, 秦利, 等. 辽宁省5种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):842-849. ZHANG R D, LI J, QIN L, et al. Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):842-849.
- [29] SHIMOJIMA E, TAMAGAWA I, HORIUCHI M, et al. Observation of water and solute movement in a saline, bare soil, groundwater seepage area, Western Australia. Part 2. Annual water and solute balances[J]. *Soil Research*, 2016, 54(1):78-93.
- [30] XIAO Y, HUANG Z Y, YANG F, et al. Dynamics of soil moisture and salt content after infiltration of saline ice meltwater in saline-sodic soil columns[J]. *Pedosphere*, 2017, 6(27):128-136.
- [31] WIELAND F. The significance of water co-transport for sustaining transpirational water flow in plants: A quantitative approach[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015(3):3.
- [32] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1809-1817. HAN X X, REN X H, WANG P P, et al. Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1809-1817.
- [33] 罗芬, 张玉盛, 周亮, 等. 种植制度对水稻籽粒铅、镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1470-1478. LUO F, ZHANG Y S, ZHOU L, et al. Effect of cropping system on Cd and Pb content in rice grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1470-1478.