

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

引用本文:

杨定清, 李霞, 周娅, 等. 秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1150–1158.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1137>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2155–2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

小麦秸秆还田量对土壤Cd有效性及水稻Cd亚细胞分布的影响

黄界颖, 武修远, 佟影影, 曹森, 高越, 杨卉艳

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1503–1511 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0051>

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨定清, 李霞, 周娅, 等. 秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1150–1158.

YANG Ding-qing, LI Xia, ZHOU Ya, et al. Effects of straw returning with different lime dosages on Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1150–1158.



开放科学 OSID

秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响

杨定清¹, 李霞¹, 周娅¹, 罗丽卉¹, 谢永红¹, 王棚¹, 李旭毅²

(1. 四川省农业科学院分析测试中心, 成都 610066; 2. 四川省农业科学院作物研究所, 成都 610066)

摘要: 秸秆还田是提升土壤肥力、增加作物产量的重要措施, 但存在增加水稻镉(Cd)含量的风险。为探索合理的秸秆资源利用方式, 以成都平原稻麦轮作土壤为对象, 设置秸秆不还田、秸秆还田及秸秆还田配施4个石灰施用水平(600、1 200、1 800、2 400 kg·hm⁻²)等6个处理, 研究秸秆还田配施不同量石灰对水稻Cd吸收累积的影响。结果表明, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田水稻Cd含量提高了18.1%, 土壤溶解性有机碳(DOC)含量、有效态Cd含量分别提高了28.5%~95.7%、7.7%~18.9%, 且DOC含量差异达显著水平($P<0.05$)。与秸秆还田相比, 秸秆还田配施石灰可通过有效提高土壤pH(0.15~0.85个单位)、降低土壤DOC(6.6%~29.3%)和有效态Cd含量(11.4%~38.6%)等来降低水稻Cd含量(11.2%~44.9%), 且水稻Cd含量随石灰用量的增加而降低直至平稳水平, 其中以秸秆还田配施石灰1 800 kg·hm⁻²和2 400 kg·hm⁻²处理表现最佳($P<0.05$), 低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)0.2 mg·kg⁻¹的标准限值。此外, 秸秆还田配施石灰水稻产量增加3.3%~6.2%($P>0.05$)。在本研究试验条件下, 秸秆还田配施石灰的最佳用量为1 800 kg·hm⁻², 既能兼顾水稻产量, 又能保障稻谷、土壤生态安全。

关键词: 秸秆还田; 石灰; 水稻; Cd; 产量

中图分类号: S141.4; X71; X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)06-1150-09 doi:10.11654/jaes.2020-1137

Effects of straw returning with different lime dosages on Cd accumulation in rice

YANG Ding-qing¹, LI Xia¹, ZHOU Ya¹, LUO Li-hui¹, XIE Yong-hong¹, WANG Peng¹, LI Xu-yi²

(1. Analysis and Testing Centre of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: Straw returning is an important measure to improve soil fertility and increase crop yield, but there is a risk of increasing rice cadmium (Cd) concentration. In order to study the rational utilization of straw resources, a field experiment on straw returning combined with lime was conducted to evaluate the effects of different lime-straw treatments on Cd uptake. Treatments included no-straw returning, straw returning, and straw returning with four lime dosages (600, 1 200, 1 800 kg·hm⁻², and 2 400 kg·hm⁻²). Compared with the no-straw returning treatment, the straw returning treatment increased rice Cd, soil dissolved organic carbon, and available Cd content by 18.1%, 28.5%~95.7%, and 7.7%~18.9%, respectively. Compared with straw returning treatment, straw returning with lime treatments reduced rice Cd contents by 11.2%~44.9% through increasing soil pH by 0.15~0.85 units, reducing soil DOC and available Cd contents by 6.6%~29.3% and 11.4%~38.6%, respectively. Straw returning with lime at 1 800 kg·hm⁻² and 2 400 kg·hm⁻² treatments significantly reduced rice Cd contents ($P<0.05$). With an increase in lime dosage, the rice Cd contents decreased to levels below 0.2 mg·kg⁻¹, as recommended by the *National Food Safety Standard—Limits of Contaminants in Food* (GB 2762—2017). Moreover, straw returning with lime treatments

收稿日期: 2020-09-28 录用日期: 2021-01-11

作者简介: 杨定清(1964—), 女, 四川彭州人, 硕士, 研究员, 主要从事农产品重金属污染研究。E-mail: yangdq165@sohu.com

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP2019001); 四川省农业科学院青年基金项目(2018FXCSZX); 四川省科技计划项目(2017NZ0062, 2019YFS0506)

Project supported: The National Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Program (GJFP2019001); Sichuan Academy of Agricultural Sciences Youth Fund Program of Sichuan Province (2018FXCSZX); The Science and Technology Program of Sichuan Province (2017NZ0062, 2019YFS0506)

increased rice yields by 3.3%~6.2% ($P>0.05$). With a careful consideration of environmental impacts and economic benefits, the combination of straw returning with 1 800 kg·hm⁻² lime is a high-yielding and ecologically safe intervention for straw resource utilization.

Keywords: straw returning; lime; rice; Cd; yield

秸秆是一种重要的有机物料,秸秆还田是提高稻麦轮作系统农业资源利用效率的重要措施之一^[1-3]。在稻麦轮作系统中,秸秆还田后释放出一定量的碳、氮、磷、钾等营养元素,能有效提升土壤肥力,提高作物产量,减少环境污染,促进农业可持续发展^[4-8]。然而,研究表明,秸秆还田在增肥增产的同时会增加作物对镉(Cd)的吸收^[9]。如在Cd污染农田中,作物秸秆中的Cd含量大多高于作物籽粒,秸秆还田后其吸收富集的大部分Cd又重新归还到稻田土壤中,给稻米带来了潜在的Cd污染风险^[10]。此外,秸秆还田还可增加土壤溶解性有机碳(DOC)含量,其对稻田重金属污染与修复等方面有着重要影响^[11]。因此,通过探索合理秸秆资源利用方式来减少稻米Cd污染风险对保障我国粮食安全具有重要的意义。

施用土壤调理剂是一种广泛采用的农田重金属污染管控措施,其中,施用石灰作为常用的改良措施,可以通过改变土壤中重金属Cd的形态分布,有效降低其迁移性和生物有效性,进而抑制作物对Cd的吸收^[12-16]。如黄柏豪等^[17]报道在成都平原Cd轻度污染稻田,施用石灰1 500~3 000 kg·hm⁻²能有效提高土壤pH值,降低土壤有效态Cd和稻米Cd含量。此外,秸秆还田配施一定量的石灰可作为一种有效的秸秆资源利用措施^[18]。如倪中应等^[19]报道秸秆还田配施石灰750 kg·hm⁻²能略微降低轻度污染土壤有效态Cd和稻米Cd含量。但过量施用石灰会造成铵态氮挥发、磷酸钙盐沉淀,土壤中钾、钙、镁等营养元素平衡失调,阻碍作物对磷、钾等营养元素的吸收,导致作物减产^[20-22]。因此,在已有研究报道基础上,探索秸秆还田条件下合理的石灰用量尤为重要。

成都平原气候温和,土地肥沃,是我国重要商品粮产区之一,对维持区域粮食安全具有重要的作用。《四川省土壤污染状况调查公报》显示,四川省耕地土壤污染总的点位超标率为34.3%,轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为27.8%、3.9%、1.4%和1.2%,其中成都平原区土壤污染问题较突出,Cd为主要特征污染物,以轻度污染为主^[23]。因此,本试验在已有研究的基础上,针对成都平原Cd轻度污染的酸性稻田土壤,探讨秸秆还田配施不同用量的石灰

对水稻Cd吸收累积和产量的影响,并探究该区域秸秆还田的最佳石灰施用量,以期为该区域酸性轻度Cd污染土壤稻米的安全生产和农业可持续发展提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于成都平原新市镇,该区属亚热带湿润季风气候区,年平均气温在16℃左右,年平均降水量800~1 000 mm,无霜期260 d以上。试验区土壤为灰棕色冲积物发育的潴育型水稻土,试验前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性状如下:土壤pH 5.52,容重1.14 g·cm⁻³,有机质31.85 g·kg⁻¹,全氮1.73 g·kg⁻¹,全磷1.02 g·kg⁻¹,全钾17.82 g·kg⁻¹,全Cd 0.58 mg·kg⁻¹,土壤有效态Cd 0.27 mg·kg⁻¹。试验区土壤全Cd含量接近现行《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险管控值(0.30 mg·kg⁻¹,5.5<pH≤6.5)2倍,为低风险区域。耕作制度为水稻小麦轮作。

1.2 供试材料

供试材料主要包括来自上一季的小麦秸秆、石灰、尿素、过磷酸钙和氯化钾,其Cd含量分别为:(1.12±0.01)、(0.004±<0.001)、(0.003±0.001)、(0.18±0.03)、(0.11±0.01)mg·kg⁻¹。水稻品种为当地常规品种宜香优2115。水稻于2018年4月2日在无污染土壤中育秧,5月24日移栽,株距×行距为15 cm×20 cm,每穴种植2株,收获日期为9月17日。插秧前5 d施入石灰。

1.3 试验设计

试验共设6个处理:CK(秸秆不还田)、CKL₀(秸秆还田)、L₆₀₀(秸秆还田+石灰600 kg·hm⁻²)、L₁₂₀₀(秸秆还田+石灰1 200 kg·hm⁻²)、L₁₈₀₀(秸秆还田+石灰1 800 kg·hm⁻²)和L₂₄₀₀(秸秆还田+石灰2 400 kg·hm⁻²)。

试验小区采用随机区组排列,每个处理重复3次,每个小区的面积为20 m²(4 m×5 m)。小区间筑土埂,并使用塑料薄膜包裹并牵至犁底层,各小区均设有相互独立的排灌系统,以防止各处理间水肥侧渗而相互污染,水稻栽培过程中的水肥管理、病虫害防治

等农艺操作参照当地栽培习惯进行。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤样品采集与测定

分别于水稻各生育期(分蘖期、拔节期、齐穗期、成熟期)采用5点混合取样法采集各小区0~20 cm耕作层土样。剔除植物根系和石砾后,将土样混合均匀分为两个部分:一部分新鲜土样置于冰箱中4℃保鲜保存,供测定土壤溶解性有机碳(DOC);另一部分土壤自然风干后过2 mm和0.25 mm尼龙筛供其他指标测定。土壤pH采用酸度计法(土水比1:2.5)测定;有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮采用H₂SO₄消煮-半微量开氏法测定;全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用NaOH熔融-火焰光度法测定;溶解性有机碳采用1 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提-重铬酸钾容量法外加热法测定;土壤全Cd采用HF-HClO₄-HNO₃(V:V:V=1:1:3)消解-石墨炉原子吸收光谱仪测定;土壤有效Cd采用DTPA浸提-石墨炉原子吸收光谱仪测定^[24-26]。样品分析过程中采用国家标准样品GBW07404(GSS-4)和GBW07460(ASA-9)进行质量控制。标样回收率范围为89%~112%。

1.4.2 植物样品采集与测定

分别于水稻各生育期采集植株各部位,每个小区随机取10株植物样,并将植株分为根、茎、叶、籽粒,于105℃杀青30 min,60℃烘干至恒质量后粉碎。水稻植株Cd含量采用HNO₃-HClO₄(V:V=1:1)消解-石墨炉原子吸收光谱仪测定^[26]。各小区水稻单打单收,分别统计水稻产量。标样回收率范围为87%~110%。

1.5 试验数据处理

采用Excel 2003和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、Pearson参数和LSD法进行方差分析、相关性分析和多重比较($P<0.05$)。用Origin 9.0软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田下不同石灰用量对土壤pH的影响

土壤pH是影响土壤Cd生物有效性的重要因素之一。由表1可知,秸秆还田可降低土壤pH,配施石灰则能提高土壤pH,且随着石灰用量的增加而提高。与CK相比,CKL₀处理土壤pH下降0.04~0.09个单位,差异不显著($P>0.05$)。秸秆还田配施石灰处理提升土壤pH效果显著,L₆₀₀、L₁₂₀₀、L₁₈₀₀和L₂₄₀₀处理土壤pH较CK处理分别提高0.11~0.20、0.24~0.46、0.50~0.69

表1 秸秆还田下不同石灰用量对土壤pH值的影响

Table 1 Effects of straw returning with different lime dosage on soil pH value

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturation stage
CK	5.55±0.03d	5.54±0.03cd	5.51±0.03d	5.53±0.05cd
CKL ₀	5.47±0.04d	5.45±0.03d	5.44±0.03d	5.49±0.04d
L ₆₀₀	5.73±0.03c	5.70±0.05c	5.71±0.03c	5.64±0.05cd
L ₁₂₀₀	5.96±0.06b	5.95±0.10b	5.97±0.06b	5.77±0.06bc
L ₁₈₀₀	6.23±0.05a	6.11±0.02a	6.11±0.09ab	6.03±0.15ab
L ₂₄₀₀	6.32±0.06a	6.20±0.07a	6.15±0.09a	6.07±0.16a

注:数字后小写字母表示同一生育期不同处理间 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

Note: Different letters after the numbers indicate that there are significant differences at the $P<0.05$ level among different treatments in the same growth period. The same below.

和0.54~0.77个单位,较CKL₀处理分别提高0.15~0.27、0.28~0.53、0.54~0.76和0.58~0.85个单位,差异均达显著水平($P<0.05$),但L₁₈₀₀与L₂₄₀₀处理间差异不显著($P>0.05$)。这是因为秸秆还田后在分解过程中易释放有机酸、CO₂等,在一定程度上会降低土壤pH,而配施石灰则能有效提高土壤pH。

2.2 秸秆还田下不同石灰用量对土壤DOC含量的影响

由表2可知,从水稻分蘖到成熟期,整体上所有处理土壤DOC含量的变化趋势一致,即先增加后减少并趋于稳定,其中最高含量出现在拔节期或齐穗期,在46.28~70.08 mg·kg⁻¹。方差分析显示,所有秸秆还田处理土壤DOC含量均显著提高,提高幅度随配施石灰用量的增加而减少,以秸秆还田不施石灰(CKL₀)处理最高。相较于CK,CKL₀处理使得土壤DOC含量提高幅度为28.5%~95.7%,各生育期差异均达到显著水平($P<0.05$),L₆₀₀、L₁₂₀₀、L₁₈₀₀和L₂₄₀₀处理土

表2 秸秆还田下不同石灰用量对土壤DOC含量的影响
(mg·kg⁻¹)

Table 2 Effects of straw returning with different lime dosages on soil DOC concentration(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Elongating stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturation stage
CK	34.65±1.09d	39.88±5.63c	46.28±6.24b	33.15±2.87b
CKL ₀	67.80±4.40a	70.08±4.35a	59.47±2.86a	46.22±5.70a
L ₆₀₀	59.75±4.29ab	65.46±10.77ab	53.19±3.21ab	39.88±2.27ab
L ₁₂₀₀	56.32±2.75bc	59.25±2.64ab	52.09±4.78ab	40.19±1.09ab
L ₁₈₀₀	49.33±5.99bc	52.80±6.43abc	47.80±3.04ab	39.90±4.44ab
L ₂₄₀₀	47.94±3.45c	49.79±6.95bc	45.75±5.93b	38.17±2.03ab

壤 DOC 含量分别增加 14.9%~72.4%、12.6%~62.5%、3.3%~42.4% 和 -1.1%~38.4%, L_{1800} 和 L_{2400} 处理部分生育期差异达显著水平 ($P<0.05$)。与 CKL_0 处理相比, L_{600} 、 L_{1200} 、 L_{1800} 和 L_{2400} 处理土壤 DOC 含量分别减少 6.6%~13.7%、12.4%~16.9%、13.7%~27.2% 和 17.4%~29.3%, L_{1800} 和 L_{2400} 处理部分生育期差异均达到显著水平 ($P<0.05$), 但 L_{1800} 与 L_{2400} 处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3 秸秆还田下不同石灰用量对土壤 Cd 及其有效态含量的影响

2.3.1 对土壤 Cd 含量的影响

表 3 为秸秆还田下不同石灰用量对土壤 Cd 含量的影响。与 CK 相比, 秸秆还田各处理在一定程度上能提高土壤 Cd 含量, 但未达到显著水平 ($P>0.05$)。方差分析显示, 不同石灰施用量处理间差异也不显著 ($P>0.05$)。这说明, 向 Cd 污染农田添加 Cd 含量高的秸秆有利于土壤 Cd 积累, 但其数量变化在短期内并不显著。

2.3.2 对土壤有效态 Cd 含量的影响

土壤有效态 Cd 是水稻植株可直接吸收利用的主要形态。由表 4 可知, 秸秆还田可提高土壤有效态 Cd 含量, 与 CK 相比, 从水稻分蘖到成熟期, CKL_0 处理的土壤有效态 Cd 含量提高 7.7%~18.9%, 差异均达显著水平 ($P<0.05$)。秸秆还田配施石灰能降低土壤有效态 Cd 含量, 与 CKL_0 相比, L_{600} 、 L_{1200} 、 L_{1800} 和 L_{2400} 处理土壤有效态 Cd 含量分别降低 11.4%~13.6%、19.0%~22.7%、26.2%~34.1% 和 29.5%~38.6%, 其中 L_{1800} 和 L_{2400} 处理差异达显著水平 ($P<0.05$)。与 CK 相比, 秸秆还田配施石灰处理中除 L_{600} 处理部分生育期土壤有效态 Cd 含量略增加外, L_{1200} 、 L_{1800} 和 L_{2400} 处理土壤有效 Cd 含量分别降低 5.4%~12.8%、15.8%~21.6% 和

表 4 秸秆还田下不同石灰用量对土壤有效态

Cd 含量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Effects of straw returning with different lime dosages on soil available Cd concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Elongating stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturation stage
CK	0.37±0.06ab	0.39±0.04ab	0.38±0.03ab	0.39±0.04ab
CKL_0	0.44±0.05a	0.42±0.04a	0.44±0.05a	0.45±0.03a
L_{600}	0.39±0.06ab	0.37±0.05ab	0.38±0.03ab	0.39±0.02ab
L_{1200}	0.35±0.03ab	0.34±0.05ab	0.34±0.04ab	0.35±0.04ab
L_{1800}	0.29±0.04b	0.31±0.05b	0.32±0.07b	0.33±0.04b
L_{2400}	0.27±0.03b	0.29±0.03b	0.31±0.02b	0.30±0.06b

18.4%~27.0%。

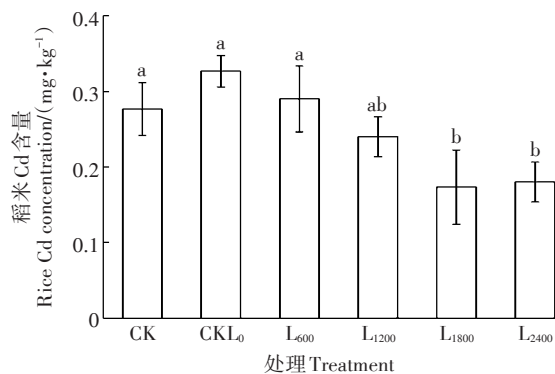
2.4 秸秆还田下不同石灰用量对稻米 Cd 含量的影响

如图 1 所示, 秸秆还田可能导致稻米中 Cd 含量增加。与 CK 相比, CKL_0 处理的稻米 Cd 含量提高 18.1%, 差异不显著 ($P>0.05$)。与 CKL_0 处理相比, L_{600} 、 L_{1200} 、 L_{1800} 和 L_{2400} 处理稻米 Cd 含量分别降低 11.2%、26.5%、46.9% 和 44.9%, 其中 L_{1800} 和 L_{2400} 处理降 Cd 效果显著 ($P<0.05$), 稻米 Cd 含量低于我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762—2017) 中 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准限值, 但两个石灰施用量水平间差异不显著 ($P>0.05$)。与 CK 相比, 秸秆还田配施石灰处理中除 L_{600} 处理稻米 Cd 含量轻微增加外, L_{1200} 、 L_{1800} 和 L_{2400} 处理稻米 Cd 含量分别降低 13.3%、37.3% 和 34.9%。表明秸秆还田配施石灰处理降 Cd 的效果随石灰施用量的提高而减小, 直至平稳水平。

表 3 秸秆还田下不同石灰用量对土壤 Cd 含量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Effects of straw returning with different lime dosages on soil Cd concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Elongating stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturation stage
CK	0.59±0.07a	0.57±0.05a	0.59±0.07a	0.58±0.04a
CKL_0	0.61±0.03a	0.60±0.04a	0.61±0.08a	0.63±0.09a
L_{600}	0.61±0.03a	0.62±0.09a	0.62±0.04a	0.62±0.04a
L_{1200}	0.60±0.10a	0.61±0.02a	0.60±0.03a	0.59±0.10a
L_{1800}	0.61±0.04a	0.59±0.03a	0.59±0.10a	0.61±0.08a
L_{2400}	0.62±0.08a	0.60±0.04a	0.62±0.09a	0.63±0.03a



不同字母代表处理间差异显著 ($P<0.05$)
Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图 1 秸秆还田下不同石灰用量对稻米 Cd 含量的影响 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Figure 1 Effect of straw returning with different lime dosages on rice Cd concentration ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

2.5 秸秆还田下不同石灰用量对水稻产量及其构成因素的影响

由表5可知,秸秆还田可增加水稻产量,与CK相比,CKL₀、L₆₀₀、L₁₂₀₀、L₁₈₀₀和L₂₄₀₀处理的产量分别提高3.3%、4.6%、5.1%、6.2%和5.1%,差异不显著($P>0.05$)。方差分析显示,在配施石灰梯度范围内,随着石灰施用量的增加,水稻产量呈先增加后降低的趋势,以L₁₈₀₀处理最高。与秸秆还田不施石灰CKL₀处理相比,L₆₀₀、L₁₂₀₀、L₁₈₀₀和L₂₄₀₀处理的产量分别提高1.2%、1.6%、2.8%和1.7%,差异均不显著($P>0.05$)。有效穗数综合表现为CK>L₁₈₀₀>L₂₄₀₀>L₁₂₀₀>L₆₀₀>CKL₀处理。所有秸秆还田处理穗粒数、结实率和千粒重均高于秸秆未还田CK处理,差异均不显著($P>0.05$)。上述结果表明,秸秆还田配施石灰有利于水稻产量增加,但其数量变化在短期内并不显著。

2.6 秸秆还田与不同用量石灰配施下土壤因子和稻米相关性分析

秸秆还田与不同用量石灰配施下土壤因子与稻米Cd相关性分析见表6。总体上看,土壤因子中,土壤全Cd含量与稻米Cd含量没有相关性,而土壤pH、DOC含量、有效态Cd含量与稻米Cd含量存在较好的相关性。其中,土壤pH与稻米Cd含量显著负相关($P<0.05$),土壤有效态Cd含量与稻米Cd含量存在显

著正相关($P<0.05$)。此外,土壤有效态Cd与pH显著负相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 对土壤pH、DOC、全Cd及其有效态含量的影响

还田后秸秆在微生物的作用下通过转化与分配影响了土壤pH、DOC含量和重金属Cd及其化学形态分布^[27-28]。已有研究认为秸秆还田和石灰均提高了土壤pH。如贾乐等^[29]研究表明玉米和菜豆秸秆还田可明显提高土壤pH,培养4周后土壤pH提高了0.3~0.9个单位,与本试验秸秆还田可降低土壤pH、配施石灰提高土壤pH,且随着石灰用量的增加而提高的结果有所差异。原因可能和秸秆的类型有关,本试验采用的小麦秸秆含碳量高达40%以上,有机成分以纤维素、半纤维素为主,还田后在腐解过程中会产生大量的小分子有机酸类物质^[30]。此外,报道指出,Cd胁迫会刺激根系分泌有机酸,虽然对根系分泌有机酸的种类影响较小,但对分泌量变化影响显著,这些酸类物质均能降低土壤pH^[31]。石灰是碱性物质,配施可提高土壤pH,且土壤pH随石灰施用量的提高而增加,直至平稳水平。

本试验表明秸秆还田可增加土壤DOC含量,增加幅度随配施石灰用量的增加而减少,这与大部分研

表5 秸秆还田下不同石灰用量对水稻产量及其构成的影响

Table 5 Effects of straw returning with different lime dosages on rice yield and its components

处理 Treatments	有效穗 Effective spikes per area/(10 ⁻⁵ ·hm ⁻²)	每穗总粒数 Grain number per ear	结实率 Percentage of productive spike/%	千粒重 1 000-grain weight/g	实际产量 Actual yield/(kg·hm ⁻²)
CK	225.69±6.39a	174.00±5.00a	79.9±0.96a	29.48±1.19a	8 299.12±276.07a
CKL ₀	218.72±9.14a	175.67±1.53a	81.32±1.03a	30.35±0.44a	8 576.92±380.53a
L ₆₀₀	219.35±0.88a	176.33±1.53a	80.98±2.39a	30.75±0.48a	8 678.53±320.44a
L ₁₂₀₀	221.39±3.83a	178.33±4.16a	80.95±2.44a	30.56±0.51a	8 718.33±343.14a
L ₁₈₀₀	224.94±9.39a	179.67±2.08a	82.23±0.21a	30.53±0.77a	8 813.20±433.29a
L ₂₄₀₀	222.91±6.08a	177.00±8.72a	82.09±2.42a	30.27±0.65a	8 720.40±136.44a

表6 土壤因子和稻米Cd含量相关性分析

Table 6 Correlation analysis between soil factors and rice Cd concentration

项目 Items	土壤pH Soil pH	土壤DOC Soil DOC	土壤全Cd Soil total Cd	土壤有效态Cd Soil available Cd	稻米Cd Rice Cd
土壤pH Soil pH	1				
土壤DOC Soil DOC	-0.16	1			
土壤全Cd Soil total Cd	0.27	0.31	1		
土壤有效态Cd Soil available Cd	-0.67*	0.39	-0.24	1	
稻米镉含量 Rice Cd	-0.88*	0.38	-0.19	0.71*	1

注:*为显著相关性($P<0.05$)。
Note:* indicate significant correlations at the 0.05 level($P<0.05$).

究结果一致^[32-33]。这是因为外源有机物是土壤 DOC 的主要来源之一,秸秆作为一种外源性有机物质,含有大量的可利用性碳氮,施入土壤后,在腐解过程中氮元素被微生物分解,一部分形成 N_2O 释放到大气中,另一部分碳元素则残留在土壤内,与原土有机质重组,形成新的有机质分子^[34]。其次,秸秆还田后激发效应显著促进了土壤有机质转化生成 DOC^[35]。秸秆还田配施石灰能降低土壤 DOC 含量是因为石灰施入土壤后可增加土壤微生物的数量和活性,进而加快微生物对 DOC 的利用速率^[36-37]。

土壤中重金属 Cd 及其有效态含量与外源添加物、土壤环境条件(如 pH 和 DOC 含量等)有关^[38-39]。本试验结果表明,向 Cd 污染农田添加 Cd 含量高的秸秆有利于土壤全量和有效态 Cd 积累,配施石灰则有效降低土壤有效态 Cd 含量,且效果随着石灰用量的增加而显著增强,尤其以 L_{1800} 和 L_{2400} 处理降 Cd 效果显著。这与张庆沛等^[40]在成都平原德阳市旌阳区 Cd 污染稻田开展的小区试验秸秆还田可降低土壤有效态 Cd 含量结果不同,可能是因为本试验还田的小麦秸秆 Cd 含量高达 $1.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,将这些秸秆还田能使秸秆中富集的 Cd 重新归还到稻田土壤中,从而使土壤 Cd 及其有效态含量提高;其次,秸秆还田后在腐解过程中释放的有机酸类物质在一定程度上降低土壤 pH,导致土壤中有效态 Cd 含量增加。配施石灰可提高土壤 pH,增加土壤胶体表面携带的负电荷量,促使土壤胶体对 Cd 离子的吸附;其次,由于氢离子浓度降低,竞争作用减弱,促使 Cd 离子与 CO_3^{2-} 或 OH^- 结合形成碳酸盐或氢氧化物等沉淀,有利于土壤对 Cd 的吸附,进而降低土壤 Cd 的有效性^[41]。

3.2 对稻米中 Cd 含量的影响

前人试验表明,秸秆还田配施石灰能降低稻米 Cd 含量。如段桂兰等^[42]研究表明,水稻秸秆配施石灰处理最多能使糙米中 Cd 含量减低 50%。本试验中秸秆还田与石灰配施均降低稻米 Cd 含量,且随着石灰用量的增加降 Cd 效果递增,直至低于我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017) $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准限值的平稳水平。这可能是由于稻米 Cd 含量与土壤 pH、DOC 含量、有效态 Cd 含量均存在较好的相关性,石灰的施入能显著提高土壤 pH,降低土壤 DOC 含量、有效态 Cd 含量,使土壤中 Cd 的生物利用性降低,从而减少稻米的 Cd 含量。本试验还表明,小麦秸秆单独还田能轻微增加稻米的 Cd 含量,该结果与林鸾芳等^[18]田间试验结果不同,其试验

表明小麦秸秆单独还田能显著降低稻米 Cd 含量,其原因可能是使用的小麦秸秆 Cd 含量较低,仅为 $0.179\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,本试验使用的小麦秸秆 Cd 含量较高,达 $1.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高 Cd 含量的秸秆施入增加了稻米对 Cd 的吸收。也可能是秸秆还田显著增加土壤 DOC 含量而增加土壤 Cd 的溶出,从而促进水稻对 Cd 的吸收^[11]。

3.3 对水稻产量及其构成因素的影响

研究表明,秸秆还田配施石灰对水稻有一定的增产作用^[21]。倪中应等^[19]小区试验表明在重污染土壤和轻污染土壤中,水稻产量以秸秆配施石灰处理的最高,秸秆单独还田处理次之,不施秸秆处理的最低。廖萍等^[43]连续 4 a 在江西省开展的施石灰和秸秆还田双因素田间试验表明施石灰和秸秆还田均显著提高了早、晚稻的产量,且二者具有显著的协同促进效应。这主要是因为首先秸秆还田释放出大量碳、氮、磷、钾等营养元素,能有效提升土壤肥力^[44-45];其次,秸秆还田能改善土壤物理性质,降低土壤容重,增加土壤毛管孔隙度,减小根系阻力,促进水稻根系生长^[36]。秸秆还田配施石灰增加水稻产量则是因为石灰能提高土壤碳氮代谢相关的酶活性,提高有机凋落物和土壤有机质的矿化速率,二者配施协同促进水稻对氮素吸收利用、水稻光合作用和同化物向籽粒的转运,增加水稻产量^[46-48]。本试验结果表明,秸秆还田配施石灰有利于水稻产量增加,但其数量变化在短期内并不显著,这与 Singh 等^[49]报道秸秆还田在短期内对水稻的增产效果不明显结果相似。

4 结论

(1)秸秆还田配施石灰可通过有效提高土壤 pH、降低土壤 DOC 含量、有效态 Cd 含量等方面降低稻米 Cd 含量,且随着石灰用量的增加稻米降 Cd 效果递增,直至平稳水平,以秸秆还田配施石灰 $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2\ 400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理表现最佳。

(2)秸秆还田配施石灰有利于水稻产量增加,但其数量变化在短期内并不显著。

(3)从水稻安全、丰产、优质生产角度来看,秸秆还田配施石灰的最佳用量为 $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,既能兼顾水稻产量,又能保障稻谷、土壤生态安全。

参考文献:

- [1] 苏瑶,杨艳华,贾生强,等. 秸秆还田下的主要产地环境问题及其绿色防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 711-717. SU

- Yao, YANG Yan-hua, JIA Sheng-qiang, et al. Main problems of agricultural production areas after straw returning and the respective green control technologies[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 711-717.
- [2] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2583-2593. CHAI Ru-shan, WANG Qing-yun, YE Xin-xin, et al. Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2583-2593.
- [3] Li S, Zhang S R, Pu Y L, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 289-297.
- [4] 胡乃娟, 史航, 朱利群. 不同麦秸还田方式对周年稻麦轮作农田碳足迹的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2775-2783. HU Nai-juan, SHI Hang, ZHU Li-qun. Effects of different straw returning modes on carbon footprint in a rice-wheat rotation system[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12): 2775-2783.
- [5] Yadvinder S, Bijay S, Timsina J. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 85(4): 269-407.
- [6] Pan G X, Zhou P, Li Z P, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3): 274-280.
- [7] Zhao Y C, Wang P, Li J L, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1): 36-42.
- [8] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 668-676. YANG Yan-hua, SU Yao, HE Zhen-chao, et al. Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 668-676.
- [9] 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 Wen-guang, XIAO Xiao-ping, TANG Hai-ming, 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.
- [10] 成臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 186-195. CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue in-corporation in double rice-cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 186-195.
- [11] 单玉华, 李昌贵, 陈晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1362-1366. SHAN Yu-hua, LI Chang-gui, CHEN Chen, et al. Effects of straw incorporation on the solubility of cadmium and copper in flooded soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1362-1366.
- [12] 米深深, 肖然, 王姣, 等. 添加方式对不同固化剂稳定土壤重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1946-1953. MI Shen-shen, XIAO Ran, WANG Jiao, et al. Effects of different applications of soil remediation agents on heavy-metal stabilization in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1946-1953.
- [13] Lee T M, Lai H Y, Chen Z S. Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2004, 57(10): 1459-1471.
- [14] 曾秀君, 程坤, 黄学平, 等. 石灰、腐植酸单施及复配对污染土壤铅镉生物有效性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 121-128. ZENG Xiu-jun, CHENG Kun, HUANG Xue-ping, et al. Effect of single and multiple application of lime and humic acid on the bio-availability of lead and cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 121-128.
- [15] 封文利, 郭朝晖, 史磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 399-405. FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, et al. Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 399-405.
- [16] 蔡建军, 汪恩国, 林采舜, 等. 施用生石灰对连作晚稻甬优9号产量及土壤理化性状的影响[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(7): 969-970, 972. CAI Jian-jun, WANG En-guo, LIN Cai-shun, et al. Effects of different quicklime dosage on yield and soil physical and chemical properties accumulation continuous cropping late rice Yongyou 9[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture Sciences*, 2015, 56(7): 969-970, 972.
- [17] 黄柏豪, 吴秦慧姿, 肖亨, 等. 连施石灰对Cd污染土壤Cd形态及稻麦吸收Cd的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 138-143. HUANG Bo-hao, WU Qin-hui-zi, XIAO Heng, et al. Effects of continuous application of lime for three years on cadmium concentration and uptake by wheat and rice in Cd contaminated soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3): 138-143.
- [18] 林鸾芳, 王昌全, 李冰, 等. 秸秆还田下改良剂对水稻生长和Cd吸收积累的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1492-1497. LIN Luan-fang, WANG Chang-quan, LI Bing, et al. Effect of amendments on rice growth and Cd uptake based on straw returning[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1492-1497.
- [19] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(3): 215-225. NI Zhong-ying, SHEN Qian, ZHANG Ming-kui. Effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 215-225.
- [20] Elisal A A, Shamshuddin J, Che F I, et al. Increasing rice production using different lime sources on an acid sulphate soil in Merbok, Ma-

- laysia[J]. *Tropical Agricultural Science*, 2014, 37(2):223-247.
- [21] 孙玉平, 谢小芳, 李建华, 等. 石灰用量对不同酸度等级稻田土壤理化性状及产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(2):50-52. SUN Yu-ping, XIE Xiao-fang, LI Jian-hua, et al. Effect of lime dosage on soil physicochemical properties and yield of rice fields with different acidity grades[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(2):50-52.
- [22] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(26):109-112. CAO Sheng, OUYANG Meng-yun, ZHOU Wei-jun, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: A review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(26):109-112.
- [23] 李启权, 张少尧, 代天飞, 等. 成都平原农地土壤镉含量特征及来源研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5):898-906. LI Qi-quan, ZHANG Shao-yao, DAI Tian-fei, et al. Contents and sources of cadmium in farmland soils of Chengdu plain, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):898-906.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [25] Zhang S R, Wen J, Li T, et al. Soil carbon fractions of restored lands in Liusha River Valley, Sichuan[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40:27-36.
- [26] 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 Wen-guang, XIAO Xiao-ping, TANG Hai-ming, 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.
- [27] 胡星明, 袁新松, 王丽平, 等. 磷肥和稻草对土壤重金属形态微生物活性和植物有效性的影响[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(1):77-82. HU Xing-ming, YUAN Xin-song, WANG Li-ping, et al. Effects of phosphate fertilizer and rice straw on soil heavy metal fraction, microbial activity and phytoavailability[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(1):77-82.
- [28] 李霞, 杨定清, 李旭毅, 等. 秸秆还田下配施石灰、尿素和腐熟剂对水稻Cd吸收累积的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(7):1-6. LI Xia, YANG Ding-qing, LI Xu-yi, et al. Returning straw combined with lime, urea and straw-decomposing inoculant: Effects on Cd accumulation in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(7):1-6.
- [29] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10):1992-1998. JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1992-1998.
- [30] 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9):1073-1082. WANG De-jian, CHANG Zhi-zhou, WANG Can, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9):1073-1082.
- [31] 王玉云. Cd胁迫对不同水稻根系分泌有机酸和氨基酸及根系Cd含量的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2011:13-14. WANG Yu-yun. The influence of Cd stress on roots exudation organic acid and amino acid and Cd content of the different rice[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011:13-14.
- [32] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5):736-741. LU Ping, SHAN Yu-hua, YANG Lin-zhang, et al. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):736-741.
- [33] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. *浙江林学院学报*, 2003, 20(2):119-123. LI Shu-fen, YU Yuan-chun, HE Sheng. Correlation between dissolved organic carbon and soil factors of the forest soil in southern of China[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2003, 20(2):119-123.
- [34] 李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 等. 秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与CO₂排放的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12):2535-2543. LI Bin-bin, WU Lan-fang, XU Yan-yan, et al. Relationship between functional groups of soil dissolved organic carbon and CO₂ emissions with crop residues incorporation to soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2535-2543.
- [35] Ye R, Horwath W R. Influence of rice straw on priming of soil C for dissolved organic C and CH₄ production[J]. *Plant & Soil*, 2017, 417(1/2):1-11.
- [36] 郑继成, 张刚, 王德建, 等. 稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(3):431-440. ZHENG Ji-cheng, ZHANG Gang, WANG De-jian, et al. Effects of straw incorporation on crop yield and dissolved organic carbon concentration at rice growing season in rice-wheat rotation cropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3):431-440.
- [37] 贾华丽, 郝敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机质生物降解研究进展[J]. *生态科学*, 2016, 35(2):183-188. JIA Hua-li, XI Min, KONG Fan-long, et al. Research progress on the biodegradation of soil dissolved organic matter[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(2):183-188.
- [38] Zheng R L, Chen Z, Cai C, et al. Mitigating heavy metal accumulation into rice (*Oryza sativa* L.) using biochar amendment—a field experiment in Hunan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(14):11097-11108.
- [39] 武成辉, 李亮, 晏波, 等. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10):2007-2013. WU Cheng-hui, LI Liang, YAN Bo, et al. Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):2007-2013.
- [40] 张庆沛, 李冰, 王昌全, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12):2345-2352. ZHANG Qing-pei, LI Bing, WANG Chang-quan, et al. Effects of combined application of straw and inorganic amendments on cadmium speciation and bioavailability in paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12):2345-2352.
- [41] 单玉华, 蔡祖聪, 韩勇, 等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及

- 氮供应的关系[J]. 土壤学报, 2006(6):941-947. SHAN Yu-hua, CAI Zu-cong, HAN Yong, et al. Accumulation of organic acids in relation to C:N ratios of straws and N application in flooded soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(6):941-947.
- [42] 段桂兰, 王芳, 岑况, 等. 秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(9):3927-3936. DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, et al. Effects of straw incorporation on cadmium accumulation and subcellular distribution in rice[J]. *Environment Science*, 2017, 38(9):3927-3936.
- [43] 廖萍, 刘磊, 何宇轩, 等. 施石灰和秸秆还田对双季稻产量和氮素吸收的互作效应[J]. 作物学报, 2020, 46(1):84-92. LIAO Ping, LIU Lei, HE Yu-xuan, et al. Interactive effects of liming and straw incorporation on yield and nitrogen uptake in a double rice cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1):84-92.
- [44] 陈新红, 叶玉秀, 许仁良, 等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2009(1):54-57. CHEN Xin-hong, YE Yu-xiu, XU Ren-liang, et al. Effects of wheat straw residue amount on grain yield and quality in rice[J]. *Crops*, 2009(1):54-57.
- [45] Nie J, Zhou J M, Wang H Y, et al. Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3):295-302.
- [46] Liao P, Huang S, Van Gestel N, et al. Liming and straw retention interact to increase nitrogen uptake and grain yield in a double rice-cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216:217-224.
- [47] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 不同土壤耕作模式对双季水稻生理特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(5):740-754. TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, LI Chao, et al. Effects of different soil tillage systems on physiological characteristics and yield of double-cropping rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5):740-754.
- [48] Page K L, Allen D E, Dalal R C, et al. Processes and magnitude of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from liming of Australian acidic soils: A review[J]. *Soil Research*, 2009, 47:747-762.
- [49] Singh B, Shan Y H, Johnson-Beebout S E, et al. Crop residue management for lowland rice-based cropping systems in Asia[J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 98:117-199.