

沈丹琪, 刘敏, 曹凑贵, 等. 稻虾共作模式下稻田pH对土壤和水稻重金属含量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 86-92.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.011

稻虾共作模式下稻田pH对土壤 和水稻重金属含量的影响

沈丹琪¹, 刘敏¹, 曹凑贵^{1,2}, 江洋^{1,2}

1. 华中农业大学植物科学技术学院/作物栽培与生理生态研究中心, 武汉 430070;

2. 华中农业大学双水双绿研究院, 武汉 430070

摘要 为探究稻虾共作模式对稻田土壤和水稻中重金属含量的影响, 以湘晚籼12号、黄华占、玉针香为试验材料, 常规稻作模式为对照, 在不同土壤背景条件下(试验地点分别位于湖北省荆门市掇刀区和黄冈市浠水县)开展大田试验。结果显示: 在弱碱性土壤背景下, 稻虾共作模式中稻田土壤中Cr、As、Cd、Pb和Hg的含量降低, 水稻根、茎、穗以及糙米中Cd、Pb含量降低; 在弱酸性土壤背景下, 稻虾共作模式中稻田土壤中Cr、As、Cd、Pb和Hg的含量升高, 水稻根中Cd、Pb含量升高, 水稻茎叶穗中Cd含量升高, Pb含量降低, 水稻糙米中Cd、Pb含量均降低。本研究结果表明, 不同pH土壤背景下稻虾模式对土壤和水稻重金属含量的影响表现不一致, 但稻虾模式均可明显降低稻米中Cd和Pb的含量。

关键词 稻虾共作; 稻田综合种养; 土壤pH; 稻田重金属; 水稻品种; 水稻重金属; 绿色稻米

中图分类号 S511; S966.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0086-07

近年来, 由于采矿、化肥和农药的过度使用导致环境中的重金属含量增加^[1-2]。当土壤中重金属积累量过多时, 会降低农田土壤的生产效率, 影响作物的生长和产量。水稻是世界上第一大粮食作物, 也是我国主要的粮食作物, 在人群日常膳食消费中占有重要地位。重金属可通过食物链进入人体从而导致疾病, 如长时间食入镉超标的食物可导致肾毒病、骨质疏松等疾病; 过量的铅能导致人类机体免疫力下降、头疼等一系列症状^[3-4]。稻虾共作模式是一种稻田种养结合的生态农业模式, 由于稻虾共作模式效益好, 促使全国“稻虾”面积迅速扩大^[5-6]。小龙虾的排泄以及蜕壳增加了土壤养分的输入, 使土壤有机质含量增加^[7]; 同时由于冬季持续淹水以及添加生石灰使土壤pH增加^[8-9]。土壤pH、有机质含量等土壤理化性质是影响土壤中重金属含量的关键因素^[1]。许多研究表明, 土壤pH与重金属含量呈负相关, 随着土壤pH的降低, 土壤中Cd、Pb离子从与H⁺竞争吸附的位点上解吸, 溶解度增加, 导致土壤溶液中的Cd、Pb离子浓度增加, 生物活性增强^[10]。模型分析

与验证试验表明稻虾共作中虾无重金属食用风险, 但对稻虾共作中水稻重金属的研究较少^[11]。不同水稻品种对土壤中重金属的吸收以及积累也存在较大差异, 其中籼稻比粳稻对Cd的吸收能力强, 常规稻吸收Cd的能力强于杂交稻^[12]。稻虾共作模式改变了稻田生态过程和土壤环境, 同时可能改变了土壤理化性质, 进而可能影响土壤中重金属的含量、形态以及水稻中重金属含量。本研究以稻虾共作模式为研究对象, 探究稻虾共作模式是否能够改变土壤的理化特性从而导致土壤中重金属含量及形态的变化, 进而影响水稻对重金属的吸收, 旨在为稻虾共作模式发展与绿色无污染稻米生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究以稻虾共作模式(rice-crayfish co-culture system, RC)为研究对象, 以常规稻作模式(rice monoculture system, RM)作为对照。分别在湖北省荆门市掇刀区谭店村以及湖北省黄冈市浠水县百寺

收稿日期: 2022-04-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2662019QD049); 湖北洪山实验室重大项目(2021hszd002)

沈丹琪, E-mail: 315295499@qq.com

通信作者: 江洋, E-mail: jiangyang@mail.hzau.edu.cn

河农场开展试验。荆门试验区土壤 pH 值为 7.03, 有机质含量为 23.29 g/kg, 阳离子交换量为 17.25 cmol/kg, 浠水试验区土壤 pH 值为 5.45, 有机质含量为 43.28 g/kg, 阳离子交换量为 4.3 cmol/kg。水稻品种为黄华占、玉针香、湘晚粳 12 号(XWX), 均属于常规籼稻品种。黄华占为湖北省面积较大的水稻品种, 玉针香和湘晚粳 12 号为优质香稻品种。试验区水稻种植方式均为人工插秧, 株行距为 13 cm × 30 cm, 每个处理 3 次重复。

1.2 样品的采集、处理及保存

使用土钻利用五点采集法采集稻虾田 0~20 cm 的土壤, 每个点取 3 个重复, 并挑出土壤中的根系, 混匀后利用四分法收集土壤样品分为 2 份, 并将其中一份装入密封袋放进 -20 °C 冰箱中保存, 另一份置于通风处, 自然风干后过孔径 0.85、0.15 mm 筛并保存。

水稻样品为对应稻虾共作田块上生长正常的水稻。将水稻冲洗干净后分为根、茎、叶、穗并先将其于 105 °C 杀青 30 min, 再放入 80 °C 烘箱中烘干后进行粉碎, 并保留能通过孔径 0.15 mm 筛的样品。在每个田块另收取一部分稻谷用砵谷机去壳, 将其烘干后用球磨机进行粉碎后保存为糙米样品。

1.3 测定指标与方法

1) 土壤 pH。采用土水质量比为 1: 2.5 混合摇匀后静置 30 min, 用 Mettler Toledo FE28 pH 计测定上清液的 pH。土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定。阳离子交换量(CEC)采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法(HJ 889-2017)进行测定。

2) 土壤中重金属的测定。称取过孔径 0.15 mm 筛的土壤样品 0.200 0 g, 利用微波消解法消解土壤, 测定镉、铅元素的消解液为 2 mL HCl-6 mL HNO₃-2 mL HF, 测定砷元素的消解液为 6 mL HCl-2 mL HNO₃-2 mL HF, 消解后 160 °C 赶酸至溶液体积为 1 mL, 定容至 25 mL, 过 0.45 μm 滤膜后备测。其中镉、铅元素含量根据样品浓度选择石墨炉原子吸收光谱法或火焰原子吸收光谱法测定, 砷元素采用氢化物发生原子荧光光谱法测定。

3) 水稻中重金属的测定。称取过孔径 0.15 mm 筛的水稻各部位样品 0.300 0 g(根系样品 0.100 0 g), 利用微波消解法消解水稻, 消解液为 8 mL HNO₃-2 mL H₂O₂, 消解后 160 °C 赶酸至溶液体积为 1 mL, 定容至 25 mL, 过 0.45 μm 滤膜后备测。测定方法同

土壤中重金属测定方法。

所有样品在微波消解和测定过程中均做 3 次重复并做 1 组空白和土壤(GBW07443)或植物(GBW(E)100348)标准样品。玻璃容器以及消煮管均使用 20% 硝酸浸泡过夜并用超纯水清洗, 所用试剂均为优级纯, 以保证不被污染。每测定 40 个样品随机选取其中 1 个做平行双样试验, 确保测定结果在误差允许范围内。

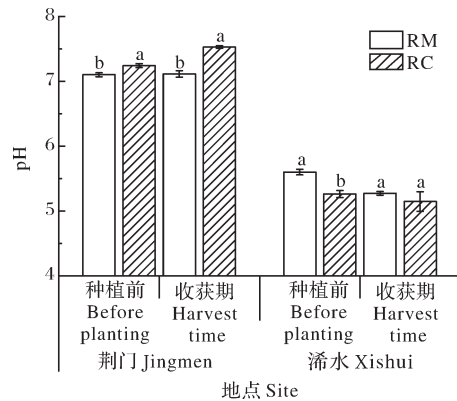
1.4 数据分析

所有的数据分析均采用 SPSS 25.0 进行统计分析, 并用 Origin 2019 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 的差异

由图 1 可以看出, 不同土壤背景下稻虾共作模式与常规稻作模式相比, 土壤 pH 的变化规律不同。其中, 与常规稻作模式相比, 在荆门试验区水稻种植前和收获期, 土壤 pH 呈现出显著上升趋势, 而在浠水试验区水稻种植前和收获期, 土壤 pH 呈现下降趋势。



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same period ($P < 0.05$). RM: 常规稻作模式 Rice monoculture system; RC: 稻虾共作模式 Rice-crayfish co-culture system. 下同。The same as follows.

图 1 不同地区不同时期的土壤 pH

Fig.1 Soil pH in different regions and different periods

2.2 土壤重金属含量的差异

由表 1 可以看出, 不同土壤背景下稻虾共作模式与常规稻作模式对水稻收获时期 0~20 cm 土壤重金属影响不同。其中, 在荆门试验区水稻收获时期, 稻虾共作模式 0~20 cm 土壤中 As、Cd、Pb 的含量均较常规稻作模式降低, 分别降低了 32.3%、29.8% 和 11.5%; 在浠水试验区水稻收获时期, 稻虾共作模式 0~20 cm 土壤中 Cr、As、Pb 和 Hg 的含量均显著升

表 1 不同地区水稻收获时期 0~20 cm 土壤中重金属含量

Table 1 Content of heavy metals in 0~20 cm soil after rice harvest in different regions

地点 Site(S)	处理 Treatment(T)	Cr	As	Cd	Pb	Hg
荆门 Jingmen	常规稻作模式 RM	62.50±7.77a	5.48±0.34a	0.09±0.010a	29.30±1.27a	0.027±0.004a
	稻虾共作模式 RC	61.50±3.87a	3.71±0.91b	0.07±0.001b	25.90±0.78b	0.022±0.003a
浠水 Xishui	常规稻作模式 RM	47.10±0.80b	0.25±0.01b	0.09±0.004a	31.60±1.75b	0.048±0.004b
	稻虾共作模式 RC	63.00±4.87a	0.58±0.05a	0.11±0.01a	38.20±1.48a	0.059±0.002a
地点 S		ns	**	*	**	**
处理 T		ns	ns	ns	ns	ns
地点×处理 S×T		*	**	**	**	*

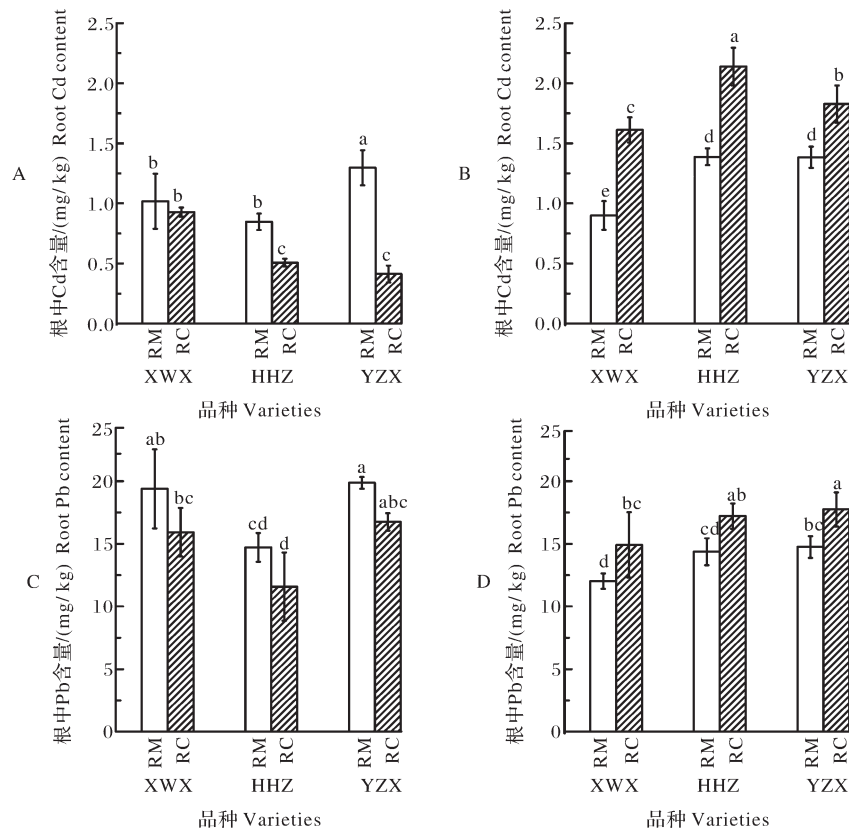
注:同一列内同一地点不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。*表示在 0.05 水平差异显著;**表示在 0.01 水平差异显著;ns 表示差异不显著。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments in the same site($P<0.05$); * $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns, no significant difference.

高,其中 Cr 增加了 34.0%,As 增加了 1.3 倍,Pb 增加了 20.8%,Hg 增加了 22.9%。

2.3 水稻重金属含量的差异

1) 水稻根部重金属含量的差异特征。由图 2 可见,不同土壤背景下,与常规稻作模式相比,稻虾共

作模式对水稻根部 Cd、Pb 含量影响不同。在荆门试验区,稻虾共作模式下不同品种水稻根中 Cd、Pb 含量与常规稻作模式相比均呈降低趋势,其中黄华占和玉针香根中 Cd 含量显著降低了 40.0% 和 68.2%,根中 Pb 含量的降低并未达到显著水平;浠水试验区



XWX: 湘晚籼 12 号 Xiangwanxian 12; HHZ: 黄华占 Huanghuazhan; YZX: 玉针香 Yuzhenxiang; A: 荆门不同品种水稻根中 Cd 含量 Cd content of different varieties of rice roots in Jingmen; B: 浠水不同品种水稻根中 Cd 含量 Cd content of different varieties of rice roots in Xishui; C: 荆门不同品种水稻根中 Pb 含量 Pb content of different varieties of rice roots in Jingmen; D: 浠水不同品种水稻根中 Pb 含量 Pb content of different varieties of rice roots in Xishui; 不同小写字母表示不同品种不同处理间差异显著($P<0.05$)。 Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different varieties and different treatments($P<0.05$).

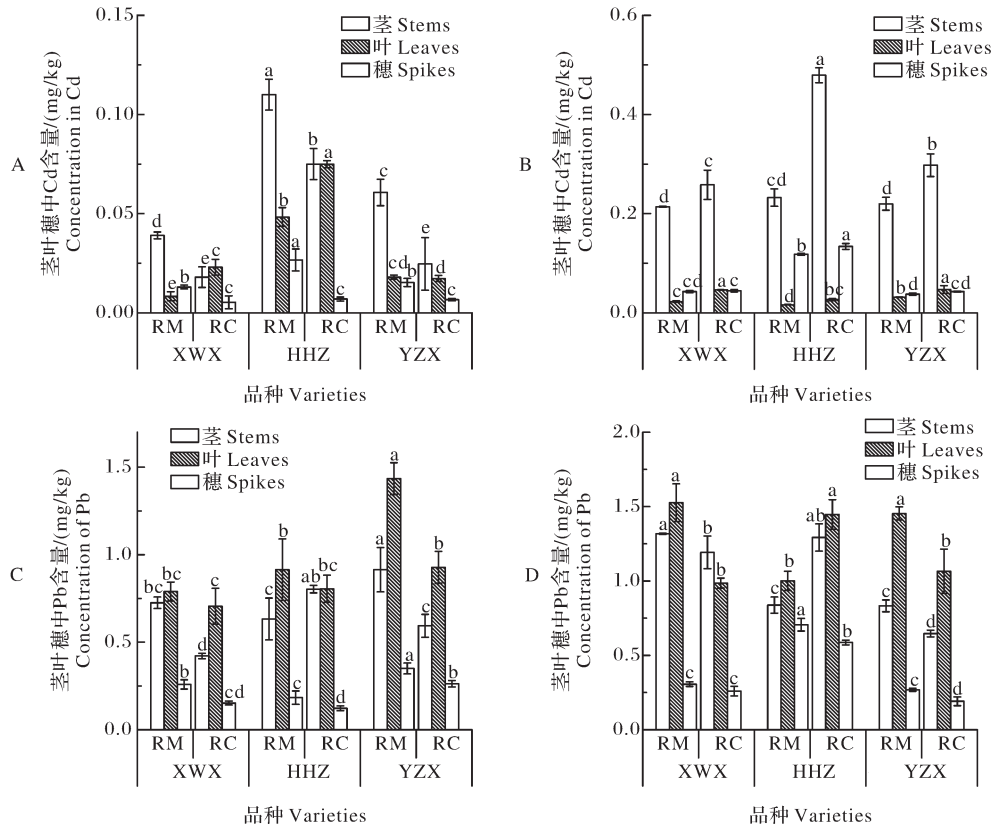
图 2 不同地区不同品种水稻根中 Cd、Pb 含量

Fig.2 Cd and Pb content in rice roots of different rice varieties in different regions

稻虾共作模式下3个品种水稻根中Cd、Pb含量与常规稻作模式相比则呈现出显著增高趋势,其中湘晚粳12号、黄华占和玉针香根中Cd含量分别显著增高了79.2%、54.0%和32.1%,湘晚粳12号、黄华占和玉针香根中Pb含量分别显著增高了24.1%、19.7%和20.4%。

2)水稻茎、叶、穗中重金属含量的差异特征。由图3A、C可见,荆门试验区稻虾共作模式下,与常规

稻作模式相比,3个品种水稻茎中Cd、Pb含量呈现出显著降低趋势,其中湘晚粳12号和玉针香茎中Cd含量分别显著降低了53.8%和59.0%,茎中Pb含量显著降低了41.9%和35.0%;与常规稻作模式相比,3个品种水稻叶中Cd含量均呈显著升高趋势,叶中Pb含量均呈显著降低趋势,其中湘晚粳12号和黄华占茎中Cd含量分别增加了1.9倍和56.3%,玉针香叶中Pb含量降低了35.3%。



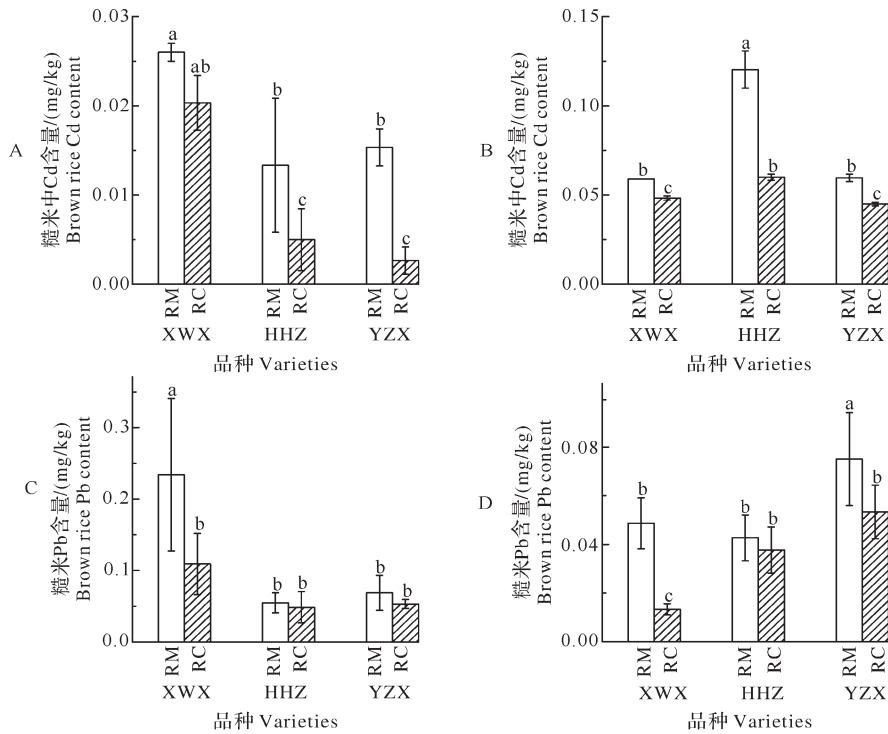
A: 荆门不同品种水稻茎叶穗中Cd含量; B: 浠水不同品种水稻茎叶穗中Cd含量; C: 荆门不同品种水稻茎叶穗中Pb含量; D: 浠水不同品种水稻茎叶穗中Pb含量。不同小写字母表示不同品种相同部位不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A: Cd content in stems, leaves and spikes of different varieties of rice in Jingmen; B: Cd content in stems, leaves and spikes of different varieties of rice in Xishui; C: Pb content in stems, leaves and spikes of different varieties of rice in Jingmen; D: Pb content in stems, leaves and spikes of different varieties of rice in Xishui. Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different varieties and different treatments ($P < 0.05$).

图3 不同地区不同品种水稻茎叶穗中Cd、Pb含量

Fig.3 Cd and Pb content in stems, leaves and spikes of different varieties of rice in different regions

浠水试验区稻虾共作模式下,与常规稻作模式相比,不同品种水稻茎叶穗中Cd含量均呈升高趋势,茎、叶、穗中Pb含量均呈显著降低趋势,其中湘晚粳12号和玉针香茎中Cd含量分别增加了20.6%和35.5%,茎中Pb含量显著降低了9.6%和22.2%;湘晚粳12号和玉针香叶中Cd含量分别增加了100%和46.9%,叶中Pb含量与常规稻作模式相比显著降低了35.4%和26.7%;黄华占穗中Cd含量显著增加了13.6%,穗中Pb含量显著降低了17.0% (图3B、D)。

3)糙米中重金属含量的差异特征。由图4可见,荆门和浠水试验区稻虾共作模式下不同品种水稻糙米中的Cd、Pb含量与常规稻作模式相比均呈降低趋势,其中荆门试验区黄华占和玉针香糙米中Cd含量分别显著下降了61.5%和80.0%,湘晚粳12号糙米中Pb含量显著降低了53.4%。浠水试验区湘晚粳12号、黄华占和玉针香糙米中Cd含量分别显著下降了16.9%、50.4%和25.0%,湘晚粳12号和玉针香糙米中Pb含量显著降低了73.5%和29.3%。



A:荆门不同品种水稻糙米Cd含量;B:浠水不同品种水稻糙米Cd含量;C:荆门不同品种水稻糙米Pb含量;D:浠水不同品种水稻糙米Pb含量。不同小写字母表示不同品种不同处理间差异显著($P<0.05$)。A: Cd content of different varieties of rice in Jingmen;B: Cd content of different varieties of rice in Xishui; C:Pb content of different varieties of rice in Jingmen; D:Pb content of different varieties of rice in Xishui.Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different varieties and different treatments($P<0.05$).

图4 不同地区不同品种水稻糙米中Cd、Pb含量

Fig.4 Cd and Pb content in brown rice of different rice varieties in different regions

3 讨论

3.1 稻虾共作模式对土壤中重金属含量的影响

不同土壤背景条件下,稻虾共作模式对水稻收获后土壤中重金属的影响不同。土壤作为作物生长的主要介质,其成分和作物的生长密切相关。土壤pH、氧化还原电位(Eh)、有机质含量(SOM)、阳离子交换量(CEC)、碳酸钙、粘土矿物和铁锰化合物含量等是影响土壤中重金属的含量、形态的变化以及移动性的关键土壤理化因子^[13-15]。土壤pH能够影响重金属的水解及其与氢离子的相互作用过程,进而影响土壤中重金属的含量及形态^[1,16]。有研究利用乙二胺四乙酸(EDTA)提取出土壤中的重金属,这部分重金属可以近似理解为土壤中可被植物吸收利用的有效态重金属,结果表明EDTA提取态的重金属含量与土壤pH呈负相关^[17-18]。有机质是决定土壤生产力和土壤性质的重要因素,同时也是影响重金属环境行为的关键土壤组分。有机质可以通过吸附和与腐殖质形成稳定的结构,从而降低重金属的迁移率^[19]。同时,有机质中所含腐殖酸含量越高,其对重金属的吸附能力越强,重金属的迁移转运能力越弱,

生物有效性越低^[20]。土壤CEC值是能够直接反映土壤贮藏、提供以及缓冲阳离子养分能力的指标,同时也可以影响土壤中重金属元素生物有效性^[21-22]。

在本研究中,弱碱性土壤(荆门试验区)条件下,由于土壤pH呈升高趋势,导致稻虾共作模式0~20 cm土壤中Cr、As、Cd、Pb和Hg含量与常规稻作模式相比呈降低趋势,其中As、Cd和Pb含量的降低达到显著水平;在弱酸性土壤(浠水试验区)条件下,土壤pH值降低,稻虾共作模式0~20 cm土壤中Cr、As、Cd、Pb和Hg含量与常规稻作模式相比呈升高趋势,其中Cr、As、Pb和Hg含量的升高达到显著水平。

3.2 稻虾共作模式对水稻重金属含量的影响

稻虾共作模式对不同土壤背景下水稻不同部位中重金属含量的影响不同。许多研究表明,水稻不同部位中Cd和Pb的含量呈显著正相关^[23]。随着土壤pH的降低,Cd和Pb离子在土壤中的解吸能力增强,导致植物吸收的Cd离子、Pb离子增加^[11]。

本研究中,在弱碱性土壤(荆门试验区)条件下,与常规稻作模式相比,水稻根部对土壤中Cd、Pb吸收减少,根部Cd、Pb含量均呈显著降低趋势;在弱酸

性土壤(浠水试验区)条件下,与常规稻作模式相比,根部 Cd、Pb 含量均呈显著上升趋势。这与土壤中 Cd、Pb 的变化是一致的。地上部通过根将土壤中重金属吸收转移进入地上部,重金属活性与水稻吸收能力决定了地上部含量^[24]。在弱碱性土壤条件下,与常规稻作模式相比,稻虾共作模式中水稻茎 Cd、Pb 含量均显著降低;而水稻叶中 Cd 含量显著上升, Pb 含量显著降低;穗中 Cd、Pb 含量均显著降低;同时糙米中 Cd、Pb 含量均显著降低。水稻吸收的 Cd 离子主要集中在水稻叶片中。在弱酸性土壤条件下,与常规稻作模式相比,稻虾共作模式中水稻茎 Cd 含量显著上升, Pb 含量显著降低;叶中 Cd 含量均显著上升, Pb 含量显著降低;穗中 Cd 含量显著上升, Pb 含量显著降低;水稻糙米中 Cd、Pb 含量均显著下降。水稻吸收的 Cd、Pb 离子主要集中在水稻根部。

本研究通过在不同酸碱背景地区进行大田试验,调查分析稻虾共作模式与稻单模式中 3 个不同水稻品种与不同重金属含量的差异。土壤 pH 是影响土壤重金属有效性的重要环境因子^[25]。本研究结果表明,在弱碱性土壤背景下,与常规稻作模式相比,稻虾共作模式可以降低土壤中 Cr、As、Cd、Pb 和 Hg 的含量,同时降低水稻糙米中 Cd、Pb 含量;而在弱酸性土壤背景下,与常规稻作模式相比,稻虾共作模式可以升高土壤中 Cr、As、Cd、Pb 和 Hg 的含量,但水稻糙米中 Cd、Pb 含量降低。与常规单作相比,稻虾共作模式中水稻根系吸收后向籽粒转移积累的差异以及机制有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] REFAEY Y, JANSEN B, PARSONS J R, et al. Effects of clay minerals, hydroxides, and timing of dissolved organic matter addition on the competitive sorption of copper, nickel, and zinc: a column experiment [J]. *Journal of environmental management*, 2017, 187: 273-285.
- [2] TAORAN S, MA J, ZHANG Y, et al. Status of lead accumulation in agricultural soils across China (1979—2016) [J]. *Environment international*, 2019, 129: 35-41.
- [3] 李广云, 曹永富, 赵书民, 等. 土壤重金属危害及修复措施 [J]. *山东林业科技*, 2011(6): 96-101. LI G Y, CAO Y F, ZHAO S M, et al. Harm of soil heavy metals and remediation measure [J]. *Shandong forestry science and technology*, 2011(6): 96-101 (in Chinese with English abstract).
- [4] 周宗灿. 环境医学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 36-37. ZHOU Z C. *Environmental medicine* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001: 36-37 (in Chinese).
- [5] 曹湊贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1245-1253. CAO C G, JIANG Y, WANG J P, et al. “Dual character” of rice-crayfish culture and strategies for its sustainable development [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2017, 25(9): 1245-1253 (in Chinese with English abstract).
- [6] JIANG Y, CAO C G. Crayfish-rice integrated system of production: an agriculture success story in China: a review [J/OL]. *Agronomy for sustainable development*, 2021, 41(5): 68 [2022-04-30]. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00724-w>.
- [7] 李丽娜, 闫淋淋, 曹湊贵, 等. 稻虾共作系统中水稻生长及养分吸收对秸秆还田与投食响应 [J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(2): 8-16. LI L N, YAN L L, CAO C G, et al. Effects of straw returning and crayfish feeding on rice growth and nutrient uptake in rice-crayfish ecosystem [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 8-16 (in Chinese with English abstract).
- [8] 佘国涵. 长期稻虾共作模式下稻田土壤肥力变化特征研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. SI G H. Study on change characteristics of soil fertility in paddy fields under long-term integrated rice-crayfish model [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [9] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set [J/OL]. *Soil and tillage research*, 2020, 204: 104732 [2022-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104732>.
- [10] SUKREEYAPONGSE O, HOLM P E, STROBEL B W, et al. pH-dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge-amended soils [J]. *Journal of environmental quality*, 2002, 31(6): 1901-1909.
- [11] TAN Y F, PENG B, WU Y L, et al. Human health risk assessment of toxic heavy metal and metalloid intake via consumption of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) from rice-crayfish co-culture fields in China [J/OL]. *Food control*, 2021, 128: 108181 [2022-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108181>.
- [12] YE X X, MA Y B, SUN B. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety [J]. *Journal of environmental sciences (China)*, 2012, 24(9): 1647-1654.
- [13] KASHEM M A, SINGH B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn [J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2001, 61(3): 247-255.
- [14] ANTONIADIS V, ROBINSON J S, ALLOWAY B J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field [J]. *Chemosphere*, 2008, 71(4): 759-764.
- [15] HONMA T, OHBA H, KANEKO-KADOKURA A, et al. Optimal soil eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(8): 4178-4185.
- [16] 刘军, 谢祥林, 严维辉, 等. 克氏原螯虾稻田高效生态养殖试验总结 [J]. *水产养殖*, 2011, 32(5): 37-38. LIU J, XIE X L, YAN

- W H, et al. Experimental summary on efficient ecological culture of *Procambarus clarkii* in paddy field [J]. Journal of aquaculture, 2011, 32(5): 37-38 (in Chinese with English abstract).
- [17] ZENG F R, ALI S, ZHANG H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental pollution, 2011, 159(1): 84-91.
- [18] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤pH值对重金属形态的影响及其相关性研究 [J]. 中国矿业, 2017, 26(6): 79-83. YANG X M, REN G M, LI L X, et al. Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. China mining magazine, 2017, 26(6): 79-83 (in Chinese with English abstract).
- [19] ZENG P, GUO Z H, XIAO X Y, et al. Response to cadmium and phytostabilization potential of *Platyclusus orientalis* in contaminated soil [J]. International journal of phytoremediation, 2018, 20(13): 1337-1345.
- [20] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4): 82-87. SUN H, TAN C Y, HUANG D Y, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal [J]. Journal of natural science of Hunan Normal University, 2011, 34(4): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [21] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. HUANG C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [22] AMERY F, SMOLDERS E. Unlocking fixed soil phosphorus upon waterlogging can be promoted by increasing soil cation exchange capacity [J]. European journal of soil science, 2012, 63(6): 831-838.
- [23] 赵迪. 不同水稻品种对土壤铅镉吸收分配差异研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. ZHAO D. Study on the difference of absorption and distribution of lead and cadmium in soil by different rice varieties [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [24] ZHOU H, ZHU W, YANG W T, et al. Cadmium uptake, accumulation, and remobilization in iron plaque and rice tissues at different growth stages [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2018, 152: 91-97.
- [25] SIDDIQUE B A, RAHMAN M M, ISLA MR, et al. Influences of soil pH, iron application and rice variety on cadmium distribution in rice plant tissues [J/OL]. Science of the total environment, 2022, 810: 152296 [2022-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152296>.

Effects of pH on heavy metals contents in paddy soil and rice under rice-crayfish co-culture

SHEN Danqi¹, LIU Min¹, CAO Cougui^{1,2}, JIANG Yang^{1,2}

1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University/
Center for Crop Cultivation and Physiology and Ecology, Wuhan 430070, China;

2. Shuangshui Shuanglü Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract To explore the effects of rice-crayfish co-culture system on the contents of heavy metals in paddy soil and rice, field experiments were carried out under different soil backgrounds in Jingmen city and Xishui county of Hubei Province, with Xiangwanxian 12, Huanghuazhan and Yuzhenxiang as experimental materials under rice monoculture as control. The results showed that under the background of weak alkaline soil, the contents of Cr, As, Cd, Pb, and Hg in paddy soil decreased, and the contents of Cd and Pb in roots, stems, spikes, and brown rice decreased. Under the background of weak acid soil, the contents of Cr, As, Cd, Pb and Hg in paddy soil increased, the contents of Cd and Pb in rice roots increased, the contents of Cd in stems, leaves and spikes of rice increased, while the contents of Pb in stems, leaves, and spikes of rice decreased, and the contents of Cd, Pb in brown rice decreased. The results showed that the effects of rice-crayfish co-culture system on the contents of heavy metals in paddy soil and rice under different pH soil backgrounds are inconsistent, but rice-crayfish co-culture system can significantly reduce the contents of Cd and Pb in brown rice.

Keywords rice-crayfish co-culture system; integrated farming of planting and breeding in paddy field; pH of soil; heavy metals in paddy soil; rice varieties; heavy metals in rice; green rice

(责任编辑: 张志钰)