



稻虾综合种养对稻田土壤肥力和金属元素含量的影响

喻记新^{1,2}, 李 为^{1,3}, 刘家寿^{1,3}, 熊 飞², 苑 晶^{1,3}, 张堂林^{1,3*}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 江汉大学生命科学学院, 湖北 武汉 430056;

3. 湖北省稻田综合养殖工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为研究稻虾综合种养对稻田土壤肥力和金属元素含量的影响, 对潜江市稻虾综合种养田 (渔沟以 TRC 表示、田面以 PRC 表示) 和水稻单作田 (以 RM 表示, 作为对照) 土壤不同土层 (0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm) 的主要肥力指标和金属元素含量进行了对比。结果显示, 各土层总氮、速效磷和总磷含量均表现出 PRC > RM > TRC 的趋势, 有机质 (20~30 cm 土层除外)、氨氮含量表现出 RM > PRC > TRC 的趋势, 硝态氮含量表现出 TRC > PRC > RM 的趋势。各土层的 Cu、As、Mg 和 Mn 含量均表现出 TRC > PRC > RM 的趋势, 而 Cd、Pb、Fe 和 Ca 含量的变化趋势与之相反; 除 0~10 cm 土层外, Cr、Zn 和 Ni 含量在 TRC、PRC 和 RM 之间均无显著差异。根据《GB 15618—2018》中的污染风险筛选值, 各土层的 Cr、Cd、Pb、Zn、Ni、As 含量均未超标, 而 Cu 含量普遍超标, 超标率的范围为 14%~46%。研究表明, 稻虾综合种养可能会促进田面土壤中氮磷的积累、降低渔沟土壤氮磷的含量, 也可能引起土壤中 Cu、As、Mg、Mn 的积累及 Cd、Pb、Fe 和 Ca 的减少。

关键词: 克氏原螯虾; 稻渔综合种养; 土壤; 肥力; 金属元素

中图分类号: S 965

文献标志码: A

稻渔综合种养在中国和东南亚等一些国家有着悠久的历史^[1], 它是淡水渔业的重要组成部分, 在调整区域农村经济产业结构、增加农民收入、改善饮食结构等方面发挥着重要作用^[2,3]。近年来, 克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*)、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)、中华鳖 (*Trionyx sinensis*)、黄鳝 (*Monopterus albus*)、泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 等经济价值高、产业化条件好的名特优水产品种逐渐成为稻渔综合种养的主要对象^[3]。稻虾综合种养 (克氏原螯虾) 近年在中国的长江中下游地区发展迅猛^[4]。

研究表明, 甲壳动物养殖过程中大部分氮、磷会沉积于土壤中, 而通过水体或生物转移的比例则较低^[5-6]。如齐振雄等^[7]报道中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 养殖池塘中氮、磷沉积分别占总输入量的 19.4%~64.6% 和 21.7%~95.9%。倡国涵等^[8]发现稻虾综合种养田氮和磷截存于土壤中的比例分别超过 50% 和 40%。近年来, 国内学者对稻虾综合种养田土壤的肥力开展了一些研究, 多数研究表明稻虾综合种养会显著提高稻田土壤的有机质、总氮、总磷和总钾等含量^[9-13], 但管勤壮等^[14]发现稻虾综合种养田土壤

收稿日期: 2019-07-30 修回日期: 2019-10-07

资助项目: 湖北省技术创新专项重大项目 (2016ABA123; 2018ABA102); 国家重点研发计划 (2019YFD0900304); 农业部行业专项协作项目 (201203081-4)

第一作者: 喻记新 (照片), 从事养殖生态学研究, E-mail: jxyu001@126.com

通信作者: 张堂林, E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn



有机质含量显著升高,而总磷含量有降低的趋势,倡国涵等^[15]发现稻虾综合种养田 25~50 cm 土层的有机碳和总氮含量分别下降了 41.8% 和 34.8%。此外,稻虾综合种养田中渔沟和田面在结构、种养管理和水体理化形状等方面均存在一定差异^[16],这也可能导致渔沟和田面土壤的理化性质存在差异,但目前鲜有相关报道。金属元素,尤其是重金属元素含量,会影响稻虾综合种养田水产品和稻米的食用安全,但稻虾综合种养对土壤金属元素含量的影响目前未见报道。

本实验以水稻单作田为对照,对比研究了水稻单作田、稻虾综合种养田的渔沟与田面不同土层的主要肥力指标及金属元素含量的差异,同时根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值^[17]对 Cr、Cd、Pb、Zn、Ni、As 和 Cu 含量的超标情况进行了评价,以期对稻虾综合种养田土壤管理及克氏原螯虾与稻米的食用安全评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

潜江是我国“稻虾连作”的发源地和“中国小龙虾之乡”,潜江地处江汉平原腹地,属亚热带季风性湿润气候,年均气温 16.1 °C,无霜期 246 d,年均降雨量 1100 mm,土壤类型为湖积物发育而成的潮土性水稻土,种植制度为中稻-冬泡。本实验选取潜江市后湖管理区张家窑分场(E 112°29'~E 113°01', N 30°04'~N 30°39')为研究区域,该场的部分稻田于 2012 年开始实行稻虾综合种养,其他稻田实行水稻单作。

1.2 样品采集及测定

样品采集 在稻虾综合种养区及相邻 500 m 以内的水稻单作区各选取 3 块相邻的稻田取样。水稻单作田只种稻,部分秸秆还田,当年 11 月至次年 5 月初休耕;稻虾综合种养田在水稻休耕期灌水淹田,稻草全部还田,隔年对渔沟进行清淤,养殖中投喂配合饲料 750 kg/hm² 及少量小麦、麸皮等,克氏原螯虾的捕捞主要集中在 4—6 月,并留足虾种。2 种稻田均在 6 月上旬插秧,水稻品种为黄华占(粤审稻 2005010),插秧前 15 d 施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O: 17-17-17) 600 kg/hm²,

插秧后 10 d 左右施用尿素 150 kg/hm²(其中稻虾综合种养田施用量按田面面积计算),10 月收割^[18]。

取样时间为 2016 年 11 月。参照 Si 等^[11]的土层设置方法,按 S 型五点法布点,用柱状采土器取出水稻单作田(RM)、稻虾综合种养田的田面(PRC)和渔沟(TRC) 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 的土样。将同一土层 5 个点的土样混合为 1 个样本,去除植物根系、石块后放入封口袋里带回实验室,风干、研磨后过筛保存。

指标测定 分别用重铬酸钾容量法-外加加热法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有机质(SOM)、速效磷(AP),用流动注射法测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)。用微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定 Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Ni、As、Fe、Mg、Ca 和 Mn 的含量。

1.3 数据处理

数据处理和统计分析在 Excel 2010 和 SPSS 18.0 中进行。先检验数据的正态性,符合正态性的数据用 One-Way ANOVA 检验,若 One-Way ANOVA 中数据方差齐性,则用 LSD 判断统计学差异性。对于不符合正态性或方差齐性的数据,用 Kruskal-Wallis 进行非参数检验,且对有显著差异的结果进行 Mann-Whitney 检验。

2 结果

2.1 土壤肥力

3 个土层中,PRC 的总氮含量均是最高,TRC 的总氮含量均是最低。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间总氮含量无显著差异($P > 0.05$),但在 20~30 cm 土层三者之间存在显著差异($P < 0.05$)。随着土层加深,PRC 和 TRC 的总氮含量均出现下降趋势,但 PRC 在 20~30 cm 土层出现剧烈上升(图 1-a)。各土层的 NH₄⁺-N 含量均在 RM 最高、TRC 最低($P < 0.05$);随着土层加深,NH₄⁺含量呈下降趋势(图 1-b)。NO₃⁻-N 的变化趋势与氨氮相反,在 0~10 cm 土层 PRC 和 TRC 的 NO₃⁻-N 含量显著高于 RM 的($P < 0.05$),而 PRC 和 TRC 无显著差异($P > 0.05$);在 10~20 cm、20~30 cm 土层 TRC 的 NO₃⁻-N 含量均显著高于 RM 和 PRC 的($P < 0.01$)(图 1-c)。

总磷和速效磷的变化趋势与总氮类似。在

0~10 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 的总磷含量无显著差异 ($P > 0.05$), 在 10~20 cm 土层 TRC 的总磷含量显著低于 PRC 和 RM 的 ($P < 0.01$), 在 20~30 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间总磷含量存在显著差异 ($P < 0.01$)(图 1-d)。速效磷含量的变化范围为 7.37~8.91 mg/kg, 呈现出随土层加深而降低的趋

势(图 1-e); 在 0~10 cm 土层 PRC 的速效磷含量显著低于 TRC 的 ($P < 0.01$), RM 与 PRC、RM 与 TRC 之间无显著差异 ($P > 0.05$); 在 10~20 cm 土层 TRC 的速效磷含量显著低于 PRC 和 RM 的 ($P < 0.05$), 而 PRC 与 RM 之间无显著差异 ($P > 0.05$); 在 20~30 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间速效磷含量无

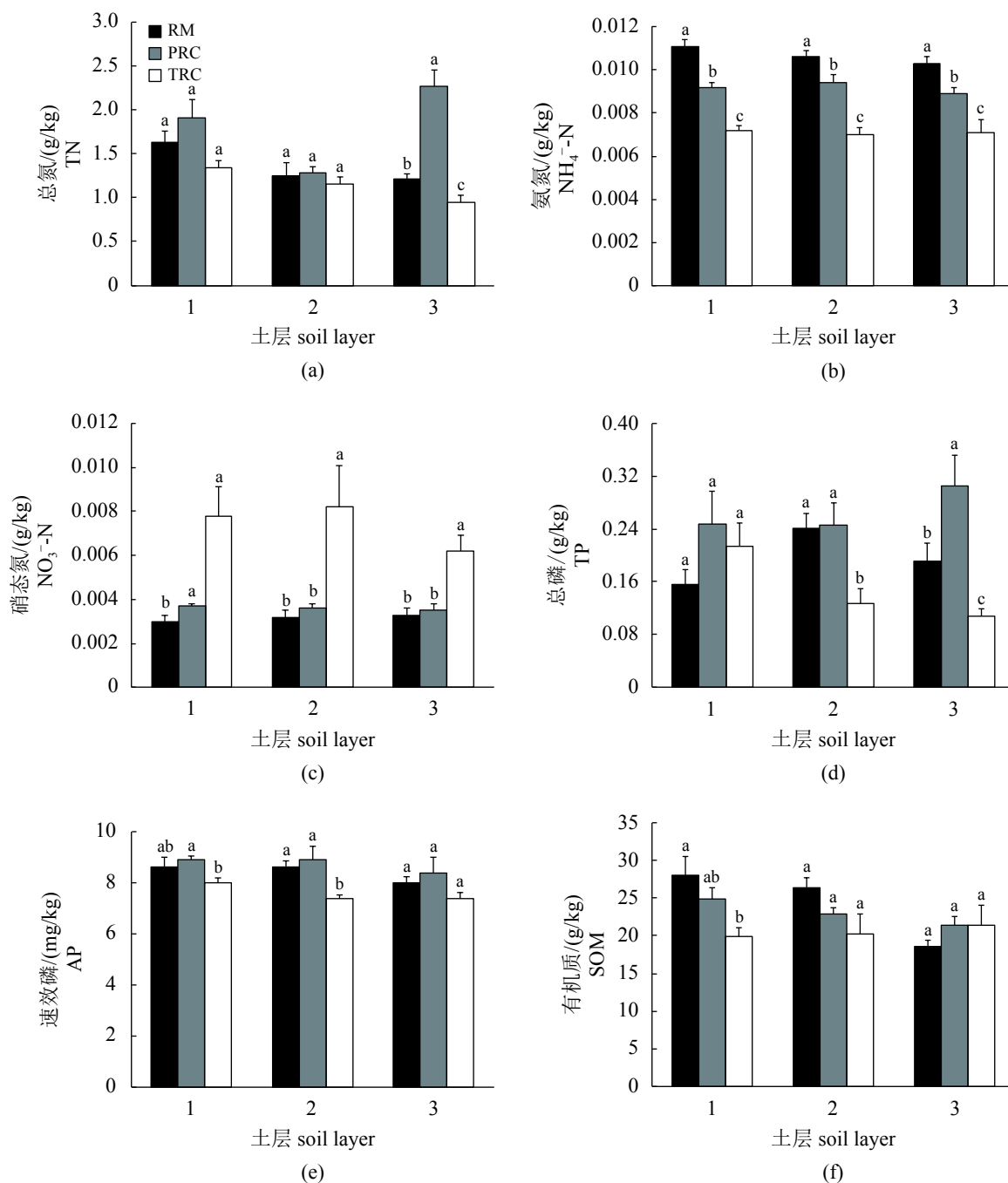


图 1 稻虾综合种养稻田田面、渔沟和水稻单作稻田的土壤肥力

Fig. 1 Soil fertility in paddy (PRC) and trench (TRC) of integrated rice-crayfish, and rice monoculture field (RM)

1. 0~10 cm, 2. 10~20 cm, 3. 20~30 cm

显著差异 ($P > 0.05$)。

有机质含量的变化范围为 18.62~28.06 g/kg。在 0~10 cm 土层 RM 的有机质含量显著高于 TRC 的 ($P < 0.01$), 但与 PRC 之间无显著差异 ($P > 0.05$); 在 10~20 cm、20~30 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间有机质含量均无显著差异 ($P > 0.05$)(图 1-f)。

2.2 土壤金属元素含量

3 个土层中, RM 的 Cu、As、Mg、Mn 含量都是最低。在 0~10 cm 土层 PRC 和 TRC 的 Cu 含量显著高于 RM 的 ($P < 0.01$), 在 10~20 cm 土层 TRC 的 Cu 含量显著高于 RM 和 PRC 的 ($P < 0.05$)(图 2-a)。在 0~10 cm 土层 TRC 的 As 含量显著高于 RM 和 PRC 的 ($P < 0.01$)(图 2-b)。在 3 个土层 PRC、TRC 和 RM 之间 Mg 和 Mn 含量均存在显著差异 ($P < 0.05$)(图 2-c, d)。

3 个土层中, Cd、Pb、Fe、Ca 含量的变化趋势基本一致。在 0~10 cm 和 20~30 cm 土层 TRC 的 Cd 含量显著低于 RM 和 PRC 的 ($P < 0.01$), 在 10~20 cm 土层 TRC 的 Cd 含量显著低于 RM 的 ($P < 0.05$)(图 2-e)。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层 TRC 的 Pb 含量显著低于 RM 的 ($P < 0.05$)(图 2-f)。在 0~10 cm 土层 TRC 和 PRC 的 Fe 含量显著低于 RM 的 ($P < 0.01$), 在 10~20 cm、20~30 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间 Fe 含量均存在显著差异 ($P < 0.05$)(图 2-g)。在 3 个土层 PRC、TRC 和 RM 之间 Ca 含量均存在显著差异 ($P < 0.05$)(图 2-h)。

Cr、Zn 和 Ni 含量在 0~10 cm 土层 PRC、TRC 和 RM 之间均存在显著差异 ($P < 0.05$), 但 3 个土层中, 10~20 cm 和 20~30 cm 土层之间均无显著差异 ($P > 0.05$)(图 2-i、图 2-j、图 2-k)。

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值, 本实验区域中的 Cr、Cd、Pb、Zn、Ni 和 As 含量均未超标, 而 Cu 超标较为普遍, 按照该标准中 Cu 的最高阈值 100 mg/kg 来计算, Cu 含量的超标率范围为 14%~46%。

3 讨论

3.1 稻虾综合种养对土壤肥力的影响

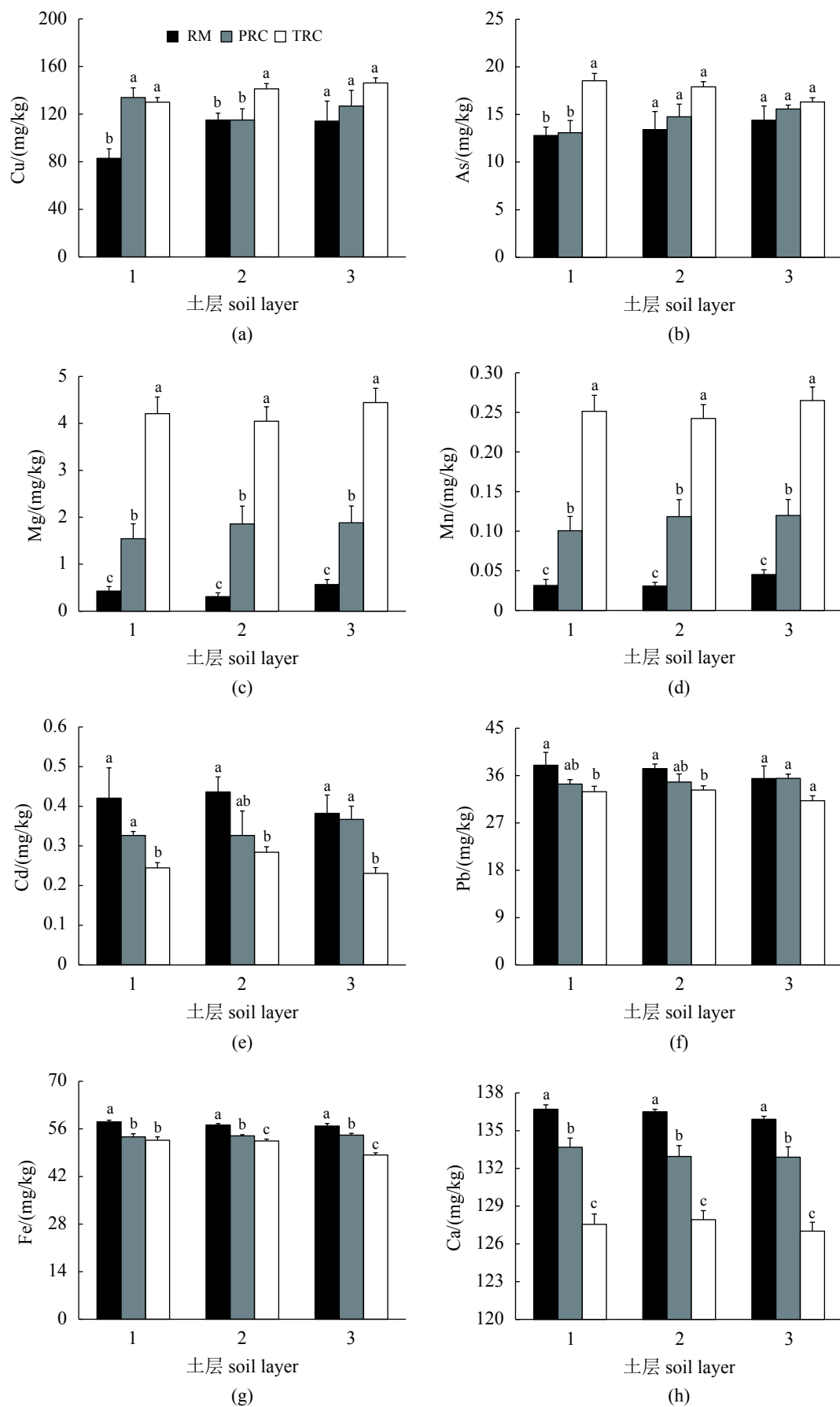
相对于水稻单作稻田, 稻虾综合种养稻田田面土壤的 TN、TP、 NO_3^- -N 及 AP 含量呈现了升高趋势, 这种结果与其他对稻虾综合种养^[9-13]及稻蟹综合种养^[19]的研究结果一致。这主要与

施肥、投饲和稻草还田有关, 稻虾综合种养中主要在田面施肥, 水稻休耕期会在田面投饲, 导致部分未被利用的肥料、饲料和克氏原螯虾排泄物中的氮磷沉积于土壤中。稻虾综合种养收割水稻时通常将全部的稻草还田, 然后灌水淹田, 这使得淹没后腐烂的稻草在休耕期向水体和土壤释放氮磷。与氮磷变化规律不同的是, 本研究中稻虾综合种养田 SOM 含量有低于水稻单作田的趋势, 这可能与换水及克氏原螯虾对土壤的扰动有关。与水稻单作相比, 稻虾综合种养的换水量和换水频率显然更高, 这会导致土壤中较多的有机质流失。底栖性水生动物, 如底栖动物、虾蟹类、底层鱼类对 SOM 含量的降低已被广泛报道^[20-21]。但也有一些研究认为稻渔综合种养有利于增加 SOM 含量^[22-23]。本研究的结果与上述研究^[22-23]的差异显示, 稻渔综合种养中不同的水产动物养殖对 SOM 的影响可能存在差异。

相对于水稻单作稻田, 稻虾综合种养稻田渔沟土壤的 TN、TP、AP 含量总体上呈降低趋势, 这主要与对渔沟的清淤有关。为了防止土壤中营养物质的过度积累, 通常隔年对稻虾综合种养稻田的渔沟进行一次清淤, 清淤首先会携带出大量的营养物质。其次, 克氏原螯虾主要生活在渔沟中, 克氏原螯虾对土壤的扰动促进了氮磷向水体释放^[24]。此外, 沉水植物主要种植在渔沟中, 会从土壤中吸收大量营养物质^[25]。结果表明, 定期的渔沟清淤对减缓稻虾综合种养稻田土壤营养物质的积累有一定的效果。

3.2 稻虾综合种养对土壤金属元素含量的影响

总体上, 11 种金属元素含量在 3 种环境之间均存在一定的差异, 其中 Cu、As、Mg 和 Mn 含量均表现出 TRC > PRC > RM 的趋势, Cd、Pb、Fe 和 Ca 含量的变化趋势则与之相反, Cr、Zn 和 Ni 含量仅在 0~10 cm 土层表现出了不同环境之间的显著差异。土壤中金属元素的含量由本底、输入和输出共同决定。本实验 2 种稻田在同一区域, 本底值相同, 水源相同, 土壤中金属元素的输入差异在于: ①稻虾综合种养的水体交换量较大, 通过水体进入土壤的金属元素含量高于水稻单作田; ②部分农药、肥料和饲料中含有一定量的金属元素^[26-28]。例如, 由化肥产生的土壤重金属污染的主要元素包括 Cd、Hg、



(图2 Fig. 2)

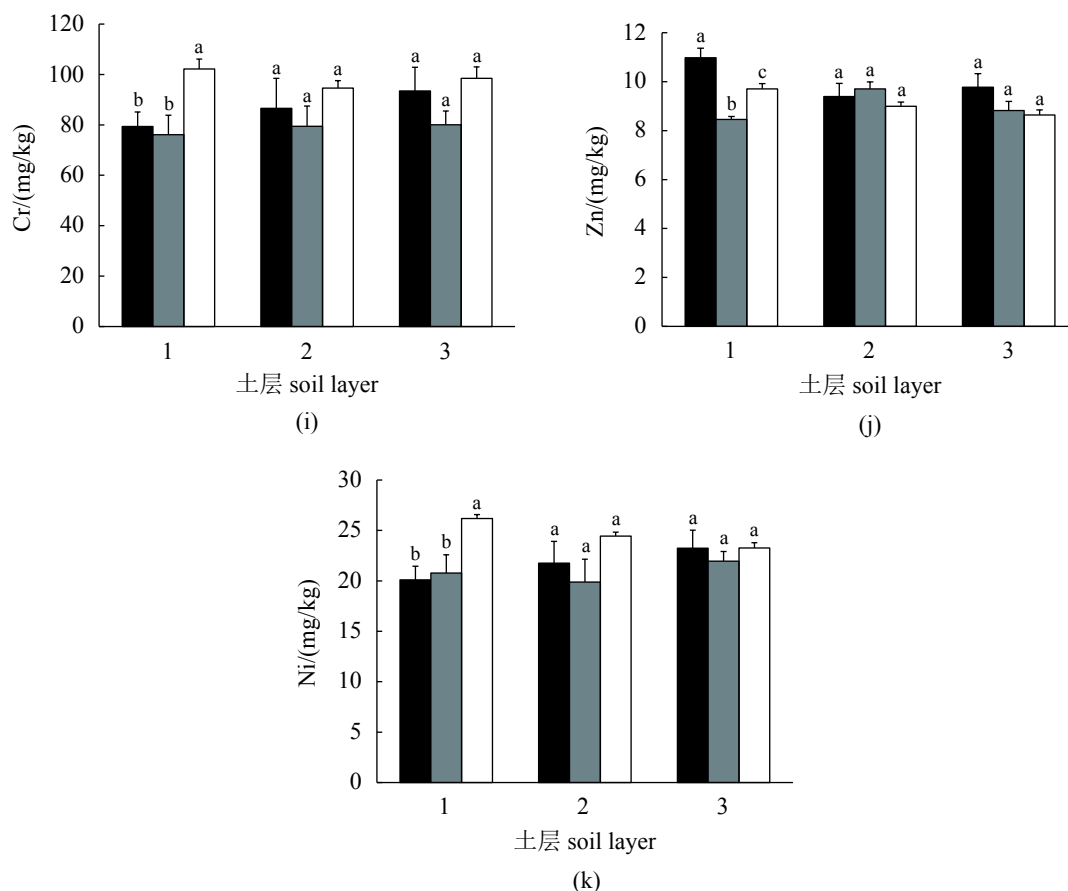


图 2 稻虾综合种养稻田田面、渔沟和水稻单作稻田土壤 11 种金属元素的含量

Fig. 2 Contents of 11 metal elements in soil in paddy (PRC) and trench (TRC) of integrated rice-crayfish, and rice monoculture field (RM)

1. 0~10 cm, 2. 10~20 cm, 3. 20~30 cm

As、Pb 和 Cr^[27]，柏雪等^[26]等报道四川省常用的能量和蛋白质饲料中 Cr 和 Pb 的超标较为普遍，张帆等^[29]发现稻鸭综合种养系统中 Cd 的主要来源为磷肥和饲料。相对于水稻单作，稻虾综合种养使用的农药和化肥量较低^[3]，但会投喂一定量的饲料，因此投喂饲料可能会导致稻虾综合种养稻田土壤的部分金属元素含量高于水稻单作田。此外，稻虾综合种养中常用 KMnSO₄、CuSO₄ 等消毒或杀灭青苔^[30]。上述因素可能是稻虾综合种养稻田土壤 Cu、As、Mg 和 Mn 含量高于水稻单作稻田土壤的部分原因。2 种稻田土壤中金属元素输出的差异主要在于：①克氏原螯虾会携带出部分金属元素^[31]；②稻虾综合种养换水次数多、水量大，换水从土壤携带的金属元素含量更高；③稻虾综合种养中种植的沉水植物会从土壤中吸收一部分金属元素。对于不同金属元素在 3 种环境间的变化趋势不同，这可能与不同

元素在土壤中的吸附性、水体溶解性、生物富集和转化迁移等过程的差异性有关，尚需进一步研究。

本实验中 2 种稻田土壤 Cu 含量远远超出了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值，应当引起重视。由于水稻单作稻田土壤的 Cu 含量也存在超标，这表明该研究区域土壤中 Cu 的本底值较高，而且稻虾综合种养可能有助于土壤中 Cu 的富集。因此，稻田综合种养中有必要采取措施控制该区域土壤中 Cu 的输入，如减少 CuSO₄ 等含铜制剂的使用；此外，土壤 Cu 含量超标是否会引起克氏原螯虾和稻米 Cu 含量超标，也需要进一步研究。

参考文献 (References):

[1] 倪达书. 稻田养鱼[J]. 淡水渔业, 1985(1): 28-31.

- Ni D S. Fish culture in rice field[J]. *Freshwater Fisheries*, 1985(1): 28-31(in Chinese).
- [2] Xie J, Wu X, Tang J J, *et al.* Conservation of traditional rice varieties in a globally important agricultural heritage system (GIAHS): Rice-fish co-culture[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(5): 754-761.
- [3] 唐建军, 李巍, 吕修涛, 等. 中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J]. *中国稻米*, 2020, 26(5): 1-10.
- Tang J J, Li W, Lv X T, *et al.* Development status and rethinking of the integrated rice-fish system in China[J]. *China Rice*, 2020, 26(5): 1-10(in Chinese).
- [4] 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国小龙虾产业发展报告(2020)[J]. *中国水产*, 2020(7): 8-17.
- National Fishery Technical Extension Center of China, China Society of Fisheries. Report on crayfish industry development in China (2020)[J]. *China Fisheries*, 2020(7): 8-17(in Chinese).
- [5] Funge-Smith S J, Briggs M R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: Implications for sustainability[J]. *Aquaculture*, 1998, 164(1-4): 117-133.
- [6] Islam M S, Sarker M J, Yamamoto T, *et al.* Water and sediment quality, partial mass budget and effluent N loading in coastal brackishwater shrimp farms in Bangladesh[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(5-6): 471-485.
- [7] 齐振雄, 李德尚, 张曼平, 等. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究[J]. *水产学报*, 1998, 22(2): 124-128.
- Qi Z X, Li D S, Zhang M P, *et al.* Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets of shrimp culture pond[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(2): 124-128(in Chinese).
- [8] 侣国涵, 袁家富, 彭成林, 等. 稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(9): 1309-1318.
- Si G H, Yuan J F, Peng C L, *et al.* Nitrogen and phosphorus cycling characteristics and balance of the integrated rice-crayfish system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9): 1309-1318(in Chinese).
- [9] 曹凑贵, 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).
- [10] Li Q M, Xu L, Xu L J, *et al.* Influence of consecutive integrated rice-crayfish culture on phosphorus fertility of paddy soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3413-3422.
- [11] Si G H, Peng C L, Yuan J F, *et al.* Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2856.
- [12] 吴本丽, 陈贵生, 赵慧敏, 等. 巢湖地区稻虾共作模式对稻田土壤肥力的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(1): 96-100.
- Wu B L, Chen G S, Zhao H M, *et al.* Effects of the integrated rice-crayfish mode on soil fertility in Chaohu Lake region[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2018, 45(1): 96-100(in Chinese).
- [13] 蔡晨, 李谷, 朱建强, 等. 稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 217-226.
- Cai C, Li G, Zhu J Q, *et al.* Effects of rice-crawfish rotation on soil physicochemical properties in Jiangnan Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 217-226(in Chinese).
- [14] 管勤壮, 成永旭, 李聪, 等. 稻虾共作对土壤有机碳的影响及其与土壤性状的关系[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(1): 113-120.
- Guan Q Z, Cheng Y X, Li C, *et al.* Changes of soil organic carbon and relationships with soil properties in rice-crayfish coculture system[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(1): 113-120(in Chinese).
- [15] 侣国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻-虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 503-509.
- Si G H, Peng C L, Xu X Y, *et al.* Effects of rice-crayfish integrated mode on soil microbial functional diversity and fertility in waterlogged paddy field[J]. *Soil*, 2016, 48(3): 503-509(in Chinese).
- [16] Yu J X, Ren Y, Xu T, *et al.* Physicochemical water quality parameters in typical rice-crayfish integrated systems (RCIS) in China[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2018, 11(3): 54-60.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil Environmental

- quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018 (in Chinese).
- [18] 喻记新, 向贤芬, 李为, 等. 虾稻综合种养系统浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生物资源, 2020, 42(3): 279-286.
- Yu J X, Xiang X F, Li W, *et al.* Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in integrated crayfish-rice co-culture system[J]. Biotic Resources, 2020, 42(3): 279-286(in Chinese).
- [19] 汪清, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对土壤理化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3948-3952.
- Wang Q, Wang W, Ma X Z, *et al.* The effects of integrated rice-crab production on soil physical and chemical properties[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(19): 3948-3952(in Chinese).
- [20] Angeler D G, Sanchez-Carrillo S, Garcia G, *et al.* The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland[J]. Hydrobiologia, 2001, 464(1): 89-98.
- [21] Sun G, Fang Y, Dong G, *et al.* The effects of *Misgurnus anguillicaudatus* bioturbation on the vertical distribution of sediment particles in paddy field[J]. Agricultural Science & Technology, 2008, 9(6): 18-20, 54.
- [22] 邝雪梅, 刘小燕, 余建波, 等. 稻-金鱼共栖生态系统土壤理化性状研究[J]. 淡水渔业, 2005, 35(3): 33-35.
- Kuang X M, Liu X Y, Yu J B, *et al.* A study on physico-chemical property in soil of paddy rice and goldfish commensalisms system[J]. Freshwater fisheries, 2005, 35(3): 33-35(in Chinese).
- [23] 高洪生. 北方寒地稻田养鱼对农田生态环境的影响初报[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 470-472.
- Gao H S. Preliminary report of the influence of the rice field fish culture to the farmland ecology environment in north cold area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 470-472(in Chinese).
- [24] Cai C F, Gu X H, Huang H Z, *et al.* Water quality, nutrient budget, and pollutant loads in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) farms around East Taihu Lake[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(1): 29-36.
- [25] Maucieri C, Salvato M, Borin M. Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2020, 152: 105853.
- [26] 柏雪, 原泽鸿, 王建萍, 等. 四川省常用能量饲料和蛋白质饲料中重金属分布研究[J]. 动物营养学报, 2016, 28(9): 2847-2860.
- Bai X, Yuan Z H, Wang J P, *et al.* Investigation on heavy metal distribution in energy feedstuffs and protein feedstuffs of Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(9): 2847-2860(in Chinese).
- [27] 王卫星, 曹淑萍, 李攻科, 等. 常用化肥重金属元素含量分析评价及其对土壤环境的影响[J]. 天津农业科学, 2017, 23(4): 19-22.
- Wang W X, Cao S P, Li G K, *et al.* Analysis and evaluation of heavy metal elements in common fertilizers and their effects on soil environment[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2017, 23(4): 19-22(in Chinese).
- [28] 杨旭, 余垚, 李花粉, 等. 我国与欧美化肥重金属限量标准的比较和启示[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 2019, 25(1): 149-156.
- Yang X, Yu Y, Li H F, *et al.* Comparison of heavy metal limits for chemical fertilizers in China, EU and US and enlightenments[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 2019, 25(1): 149-156(in Chinese).
- [29] 张帆, 李海露, 程凯凯. “稻鸭共生”生态系统重金属镉的转化、迁移及循环特征[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1206-1213.
- Zhang F, Li H L, Cheng K K. Characteristics of heavy metal (cadmium) transformation, migration and cycling in rice-duck mutual ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1206-1213(in Chinese).
- [30] 魏朝辉, 艾桃山, 郑程鹏, 等. 36种药物对青苔的抑杀作用[J]. 淡水渔业, 2015(2): 79-84.
- Wei Z H, Ai T S, Zheng C P, *et al.* Studies on inhibiting effects of 36 kinds of drugs on moss[J]. Freshwater fisheries, 2015(2): 79-84(in Chinese).
- [31] Xiong B, Xu T, Li R P, *et al.* Heavy metal accumulation and health risk assessment of crayfish collected from cultivated and uncultivated ponds in the Middle Reach of Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139963.

Effects of integrated rice-crayfish co-culture on soil fertility and metal element content

YU Jixin^{1,2}, LI Wei^{1,3}, LIU Jiashou^{1,3}, XIONG Fei², YUAN Jing^{1,3}, ZHANG Tanglin^{1,3*}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. School of Life Sciences, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;

3. Hubei Provincial Research Center for Integrated Rice Field Aquaculture Engineering, Wuhan 430072, China)

Abstract: The integrated rice-field aquaculture (IRFA) has been practiced successfully for 2000 years in China. The integrated rice-crayfish (*Procambarus clarkii*) co-culture (IRCC) has contributed more than 50% of the yield of IRFC, currently. Thus it is necessary to conduct researches on the IRCC, including its' environmental impacts. As commercial feed feeding is very popular in IRCC practice, one of the potential environmental problems is the effects of feeding on the water and soil quality. Some previous studies have indicated that most nitrogen and phosphorus in the feed deposit in soil of crustacean aquaculture system. While it is not clear whether IRCC can increase nitrogen and phosphorus in soil, even some researches have been done. And it's also not clear the effects of IRCC on the metal element contents in soil. The purpose of this study was to evaluate the impacts of IRCC in soil fertility (nitrogen, phosphorus and organic matter contents), and metal element contents on soil. Six physicochemical indicators and 11 metal elements contents of three layers of soil (0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm) of the trench (TRC) and paddy (PRC) of IRCC, and rice monoculture fields (RM, as control) in Qianjiang City, Hubei Province, China, were measured, and the culture ages of the two modes were both 5 years. Contents of soil organic matter (SOM) and available phosphorus (AP) were measured by potassium dichromate heating oxidation-volumetrics, and NaHCO₃ extraction, ammonium molybdate-tartaric emetic-ascorbic acid colorimetry method, respectively. Contents of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N) and total phosphorus (TP) were measured by flow injection analysis, and contents of Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Ni, As, Fe, Mg, Ca and Mn were measured by microwave digestion-inductively coupled plasma-mass spectrometry. The contents of Cr, Cd, Pb, Zn, Ni, As and Cu were then evaluated according to the risk screening values for soil contamination of agricultural land in <GB15618—2018>. The results showed that the TN, AP and TP content of all layers exhibited a trend of PRC > RM > TRC, while SOM (excepting 20-30 cm layer) and NH₄⁺-N of RM > PRC > TRC and NO₃⁻-N of TRC > PRC > RM. The content of Cu, As, Mg and Mn of all soil layers showed a trend of TRC > PRC > RM, while Cd, Pb, Fe and Ca on the contrary, and less significant differences were noted among TRC, PRC and RM for Cr, Zn or Ni, excepting for 0-10 cm longer. According to the risk screening values for soil contamination of agricultural land in <GB15618—2018>, Cr, Cd, Pb, Zn, Ni and As contents were up to standard, while Cu content was generally out of the limits, with over-limit ratios of 14%-46%. The results indicate that integrated rice-crayfish co-culture could increase nitrogen and phosphorus contents in the paddy soil, while decrease those in the trench soil, and SOM content.

Key words: *Procambarus clarkii*; integrated rice-field aquaculture; soil; fertility; metal element

Corresponding author: ZHANG Tanglin. E-mail: tlzhang@ihb.ac.cn

Funding projects: Special Project of Science and Technology Department of Hubei Province (2016ABA123, 2018ABA102); National Key R and D Program of China (2019YFD0900304); Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201203081-4)