

彭成林, 徐大兵, 周勇, 等. 小龙虾扰动下水稻秸秆腐解及养分释放和表面结构变化特征[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 214-219.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.03.022

小龙虾扰动下水稻秸秆腐解及养分释放 和表面结构变化特征

彭成林¹, 徐大兵¹, 周勇², 佘国涵¹, 赵书军¹, 刘威¹, 周剑雄¹

1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/国家土壤质量洪山观测实验站, 武汉 430064;
2. 麻城市黄土岗镇农业服务中心, 麻城 438302

摘要 为探究持续泡水条件下小龙虾参与水稻秸秆腐解过程与特征, 完善稻虾模式水稻秸秆还田技术、实现秸秆资源的高效利用及农田可持续发展, 采用自制尼龙网箱法, 在稻虾环沟模式的养殖沟内, 以不养虾为对照, 模拟研究小龙虾扰动下水稻秸秆的腐解特性、养分释放特征及其表面微观结构变化特点。结果显示, 无论是否有小龙虾参与, 水稻秸秆各时段平均腐解率表现出快—慢—快—慢—快的特点; 150 d 及以前, 有虾处理与无虾处理各时段腐解量、累计腐解率和各时段平均腐解率差异均不显著, 180 d 及以后各指标均表现为有虾处理显著高于无虾处理, 至 210 d 时, 有虾处理水稻秸秆累计腐解率达 85.67%, 比无虾处理高出 12.35 个百分点。秸秆养分累积释放率均表现为 $K > P > N$; 150 d 及以后, 有虾处理 N 累积释放率表现出高于无虾处理的趋势, 180 d 及以上, 有虾处理 P 累积释放率和总养分累积释放率表现出高于无虾处理的趋势, 至 210 d, 有虾处理 K 累积释放率表现出高于无虾处理的趋势。120 d 及以后, 有虾处理的秸秆表面结构受破坏程度明显大于无虾处理。结果表明, 稻虾环沟模式下, 小龙虾扰动能增加中后期水稻秸秆表面微观结构的受破坏程度, 促进后期水稻秸秆腐解和养分释放。

关键词 稻虾共作; 秸秆还田; 腐解; 养分释放; 表面微观结构

中图分类号 S141.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)03-0214-06

作物秸秆含有较丰富的养分和有机碳, 是作物生产系统中一项重要的生物资源。在土壤微生物的作用下, 秸秆还田能够增加土壤有机质含量和改善有机质性质, 释放的养分能够被作物吸收利用, 因此, 秸秆还田是秸秆资源利用的直接有效途径^[1-2]。水稻-克氏原螯虾模式已发展成为长江中下游地区一种重要的稻田种养复合生态模式。2021年, 全国稻虾种养面积 140 万 hm^2 , 占全国稻渔综合种养面积的 52.95%, 是稻渔综合种养的最主要模式, 该模式主要分布在湖北、安徽、湖南、江苏、江西等长江中下游地区, 其中湖北面积最大^[3]。在稻虾共作模式下, 水稻秸秆的持续全量还田、水草的种植、饲料残饵、小龙虾的蜕壳及排泄物、水稻水肥管理措施等综合因素影响了土壤肥力^[4]。相对于中稻单作, 稻虾模式改善了土壤结构, 降低了氮肥用量, 增加了土壤截存的 N 和 P 量, 系统 K 表现平衡表现盈余, 水稻产量显著

提高^[5-7]。稻虾种养又以环沟模式为主^[3], 目前关于稻虾模式小龙虾扰动对水稻秸秆腐解影响方面的研究鲜有报道。本研究采用自制尼龙网箱法, 在稻虾环沟模式的养殖沟内, 模拟研究小龙虾参与下水稻秸秆的腐解过程, 探求秸秆养分释放特征和秸秆表面微观结构变化特征, 旨在为完善稻虾模式水稻秸秆还田技术、实现秸秆资源合理利用以及土壤培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验安排在湖北省潜江市后湖管理区, 稻田四周挖有 4 m 宽、1.5 m 深的养殖沟, 试验所用的网箱安置在养殖沟内。

1.2 供试秸秆

水稻收割后, 将收集到的秸秆风干, 试验前测定

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BBA0044, 2021BBA075); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901204)

彭成林, E-mail: chlpeng@163.com

通信作者: 徐大兵, E-mail: 117823809@qq.com

供试水稻秸秆成分含量分别为水分9.07%、N 6.49 g/kg、P 0.73 g/kg、K 13.9 g/kg。

1.3 试验设计

试验采用网箱法,共设2个处理,处理1为水稻秸秆(简称:无虾),处理2为水稻秸秆+小龙虾(简称:有虾),3次重复,5次取样。每处理18个网箱,共36个网箱,每次取样每处理随机选择3个网箱,此外,每处理各有3个取样备用网箱。

试验装置为自制孔径0.15 mm尼龙网箱,长100 cm、宽100 cm、高150 cm,网箱上沿缝有20 cm宽的防逃塑料膜。11月26日,将网箱放入养虾沟内,入水深度120 cm,用竹竿固定。每个网箱放入风干水稻秸秆100 g,处理2的每个网箱放入小龙虾10只,小龙虾单只平均21 g。

1.4 样品采集及指标测定

试验前取混匀的风干水稻秸秆1.01 kg放入可密封的塑料袋中,密封袋口。带回实验室立即精确称质量后,70℃烘干至恒质量,再次称质量。计算水稻秸秆含水量和干质量。

分别于放养小龙虾后60、120、150、180和210 d各取样1次,每个处理各取3个网箱,清除框外杂物,带回实验室。将框内秸秆残留物全部回收至孔径0.15 mm筛中,清除杂质,先用自来水洗净,再用蒸馏水漂洗1次,70℃烘干至恒质量。植物样品经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后,全氮和全磷采用SEAL Auto Analyzer3连续流动分析仪测定,全钾采用火焰光度计检测。

秸秆表面微观结构观察:秸秆样品真空干燥后喷金,于加速电压3 kV下成像,采用超高分辨场发射扫描电镜(HITACHI S4800, Japan)观察。

分析基础样和试验样的全量氮、磷、钾含量。

利用第60、120、150、180和210天水稻秸秆测定秸秆腐解率及全N、全P、全K含量。在腐解率基础上,进一步选择第120、150、180和210天有代表性秸秆,进行表面微观结构观察。

水稻秸秆含水率=(风干水稻秸秆质量-烘干水稻秸秆质量)/风干水稻秸秆质量 $\times 100\%$

供试水稻秸秆干质量=供试风干水稻秸秆质量 $\times (100\% - \text{含水率})/100$

秸秆累积腐解率=(试验前秸秆干质量-取样时秸秆剩余干质量)/试验前秸秆干质量 $\times 100\%$

养分累积释放率=(试验前秸秆养分量-取样时秸秆养分量)/试验前秸秆养分量 $\times 100\%$

1.5 数据统计分析

试验数据采用Excel和DPS软件进行处理统计,采用最小显著法(LSD)检验试验数据的差异显著性水平($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 稻秸秆腐解特点

秸秆还田后的腐解情况通常用腐解量、腐解率和腐解速率来描述。由表1可知,随着腐解的进行,2个处理的水稻秸秆各时段平均腐解速率表现出快—慢—快—慢—快的特点,前60 d水稻秸秆腐解很快,平均腐解速率4.62~4.67 g/d;60~120 d腐解较慢,平均腐解速率0.82~0.98 g/d;120~150 d水稻秸秆腐解最快,平均腐解速率8.96~9.62 g/d,150~180 d腐解又变慢,平均腐解速率0.56~1.34 g/d,180~210 d腐解又变快,平均腐解速率3.94~6.40 g/d。不同处理间,150 d及以前,2个处理各时段腐解量、累积腐解率和各时段平均腐解速率差异均不显著,180 d及以后各指标均表现为有虾处理显著高于无虾处理,至210 d时,有虾处理水稻秸秆累积腐解率达85.67%,比无虾处理高出12.35个百分点。可见,小龙虾能促进水稻秸秆腐解,前150 d主要是冬季和早春,气温和水温低,小龙虾活动少,对水稻秸秆的腐解几乎没有影响,150 d以后随着气温升高,小龙虾活动加强,逐步开始影响水稻秸秆的腐解。

2.2 水稻秸秆养分释放特点

由水稻秸秆腐解过程中N、P、K及总养分的累积释放率(图1)可见,水稻秸秆腐解第60天,氮、磷、钾的累积释放率分别为27.94%~28.30%、68.78%~68.93%、93.92%~94.69%,氮的释放率最低,磷居中,钾的释放率最高,且养虾对水稻秸秆养分累积释放率影响不大;随腐解时间的延长,N、P及总养分的累积释放率保持增长,150 d及以后,有虾处理N累积释放率表现出高于无虾处理的趋势;180 d及以后,有虾处理P累积释放率和总养分累积释放率表现出高于无虾处理的趋势,至210 d时,有虾处理K累积释放率表现出高于无虾处理的趋势。结合水稻秸秆累积腐解率分析可知,N的累积释放率与水稻秸秆腐解率在120 d及以前保持一致,而在150 d及以后水稻秸秆腐解率高于N的累积释放率;P的累积释放率在180 d及以前明显高于水稻秸秆腐解率,而在210 d时二者基本保持一致;K的累积释放率在整个过程一直明显高于水稻秸秆腐解率,说明K的释放

表1 水稻秸秆腐解情况

Table 1 Decomposing rates and amounts of rice straw

项目 Item	处理 Treatment	腐解时间/d Decomposing time				
		60	120	150	180	210
腐解量/g Decomposing amount	无虾 Without crayfish	280.10±19.50a	49.43±20.13a	268.66±36.55a	16.73±11.75b	118.27±36.61b
	有虾 With crayfish	277.49±15.61a	58.57±26.81a	288.46±46.29a	40.13±13.54a	192.08±34.00a
累积腐解率/% Cumulative decomposing rate	无虾 Without crayfish	28.01±1.95a	32.95±1.00a	59.82±3.55a	61.49±2.42b	73.32±5.50b
	有虾 With crayfish	27.75±1.56a	33.61±1.32a	62.45±3.33a	66.46±2.10a	85.67±3.10a
平均腐解速率/(g/d) Average decomposing rate	无虾 Without crayfish	4.67±0.32a	0.82±0.34a	8.96±1.22a	0.56±0.39b	3.94±1.22b
	有虾 With crayfish	4.62±0.26a	0.98±0.45a	9.62±1.54a	1.34±0.45a	6.40±1.13a

注:同列同类指标后不同小写字母表示有虾与无虾处理差异显著($P<0.05$)。Note: Different lowercases in a column and similar indicators indicate significant differences ($P<0.05$) between the treatment with crayfish and the treatment without crayfish.

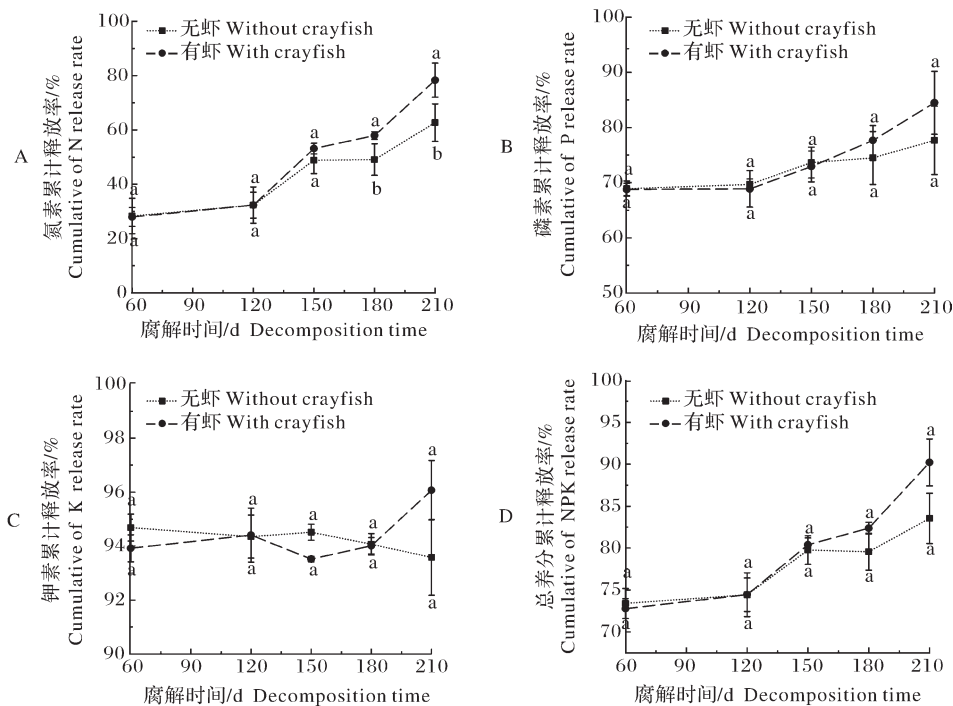


图1 不同处理N、P、K及总养分累积释放率

Fig. 1 N, P, K and total cumulative release rates

主要靠浸出。

总之,在长期泡水条件下,水稻秸秆中养分的释放率表现为钾最快、磷次之、氮最慢的特点,150 d后,小龙虾具有加快水稻秸秆养分释放的趋势。

2.3 水稻秸秆表面微观结构变化特征

水稻秸秆发生腐解是由于基本组织的薄壁细胞和维管束中的韧皮部遭到破坏^[8]。比较腐解过程中水稻秸秆扫描电镜图像(图2)可以看出,120 d后,水

稻秸秆出现较明显的腐解特征,表面的平整被打乱,结构开始变得松散。第150天,秸秆表面出现较大的空洞,呈现出断裂状并出现了不平整的断层。至第180天和210天,水稻秸秆基本组织已经被腐解。对比有虾处理和无虾处理水稻秸秆扫描电镜图像可见,有小龙虾处理的水稻秸秆受破坏程度更严重,说明泡水120 d后,小龙虾的参与明显加速了水稻秸秆腐解过程。

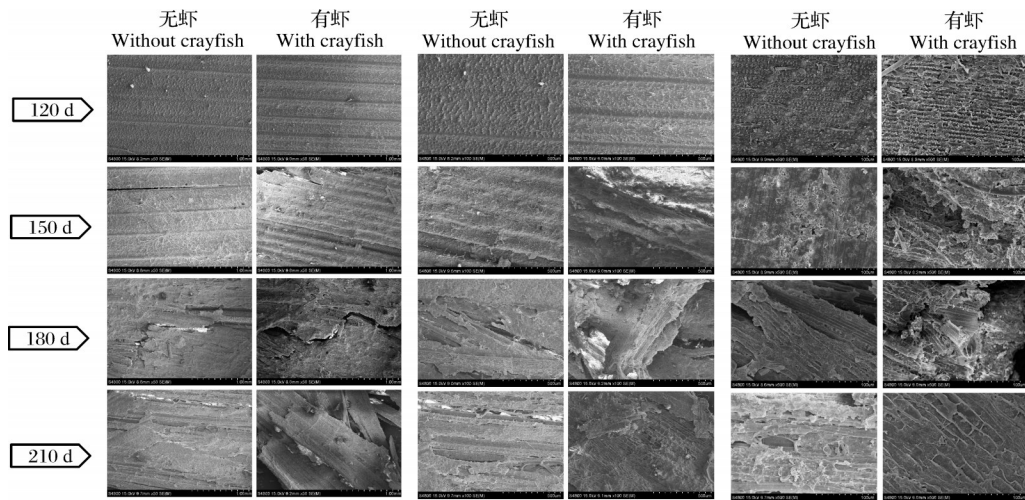


图2 腐解进程中有虾与无虾处理水稻秸秆表面结构扫描电镜观察

Fig. 2 SEM images of rice straw surface structure at different days of decomposition under the treatments with crayfish and without crayfish

3 讨论

3.1 秸秆腐解试验方法选择与取样时间节点的设置

研究秸秆腐解一般采用砂滤管法、土壤直接培养法和网袋法。砂滤管法是将秸秆放入砂滤管并埋在土壤中进行培养,其缺点是影响了管内外的水分移动,并产生滞后效应。土壤直接培养法是把秸秆直接与土壤混合进行培养,缺点是腐解后的秸秆与土壤结合紧密,难以分离^[9-10]。网袋法是将秸秆装入一定孔径的网袋后埋在土壤中培养,土壤水分和微生物可以自由进出网袋,土壤水分状况与田间实际接近,且方便操作,被普遍采用^[11]。但网袋内秸秆难以与土壤紧密接触,从而使测定结果与真实状况存在偏离^[12]。以上3种方法都有其自身的缺点,难以满足本研究的要求。为了能使小龙虾与水稻秸秆充分接触,最大程度契合小龙虾的自然生长环境,本研究在试验时将小网袋改成自制网箱,并将网箱安置在养殖沟内。

戴志刚等^[13]用埋袋法研究还田秸秆养分释放特征时所使用的尼龙网袋孔径0.075 mm、长25 cm、宽20 cm、厚0.8~1 cm,每袋装秸秆10 g,共取样20次,目的是模拟研究稻田耕作方式下秸秆养分释放的详细过程。由于研究目的不同,本研究采用的网箱比戴志刚等^[13]所用的网袋大得多,秸秆用量也大得多,取样次数要少很多。本试验前120 d主要在冬季和早春,小龙虾活动少,对水稻秸秆的腐解几乎没有影响,每60 d取样1次,120 d以后随着气温升高,小

虾活动加强,逐步影响水稻秸秆的腐解,增加取样频率至30 d 1次。

3.2 小龙虾对水稻秸秆腐解、养分释放及表面微观结构变化的影响

作物秸秆还田后的降解过程主要受水分和通气状况的影响,合适的土壤水分和通气状况可加速秸秆的腐解,可能与秸秆腐解能调节土壤微生物代谢有关^[11-12]。王景等^[14]采用网袋法,分别在好气和厌氧环境下研究作物秸秆的腐解特点,发现水稻和玉米秸秆均表现出前3个月腐解速率较快,3~12个月逐渐减缓。戴志刚等^[13]采用网袋法研究水稻、小麦和油菜秸秆养分释放规律,将供试秸秆的腐解过程分为3个主要时期:培养的前36 d为快速腐解期、36~76 d为腐解减缓期、76~124 d为腐解停滞期。本研究发现,在泡水条件下,水稻秸秆平均腐解率随时间延长表现出快—慢—快—慢—快的特点;前60 d水稻秸秆快速腐解,可能与秸秆中大量的多糖、氨基酸、有机酸等易溶有机物和无机矿质养分的快速释放有关;60~120 d腐解慢,可能与易溶解可溶性有机物基本释放完全、加之此时正值冬季和早春微生物活性弱有关;120~150 d水稻秸秆腐解速率最快,可能原因是此期气温和水温回升,微生物数量增多,活性增强,加速了秸秆腐解矿化;150~180 d水稻秸秆腐解速率又变慢,可能是因为随着腐解的进行,秸秆中易腐解组分逐渐减少,秸秆腐解速率也随之变慢;180~210 d秸秆腐解速率又变快,可能是因为此期气温和水温高,秸秆中难腐解组分也逐渐在微生物的作用下开始降解。本研究中水稻秸秆的腐解特征与

王景等^[14]和戴志刚等^[13]的研究结果不完全一致,其原因可能是试验开始时间和取样的时间节点不同所致。本研究供试水稻秸秆经过 120 d 的腐解,秸秆质量损失率约 33%,低于以往的研究结果^[13, 15-16],这可能与前期低温和厌氧环境有关。不同处理间,150 d 以前,2 个处理各时段腐解量、累计腐解率和各时段平均腐解率差异均不显著,180 d 及以后各指标均表现为有虾处理显著高于无虾处理,原因可能是前 150 d 主要是冬季和早春,小龙虾活动少,对水稻秸秆的腐解几乎没有影响,150 d 以后随着气温升高,小龙虾活动加强,逐步开始影响水稻秸秆的腐解。

本研究结果表明,秸秆养分累积释放率均表现为 $K > P > N$,与以往的研究结果一致^[13, 8],但在 100 d 或 120 d 的培养时间内,本研究中水稻秸秆 N、P、K 的累积释放率均低于以往的研究结果^[13, 15],可能主要与本试验前期低温和厌氧环境有关。

对于水稻秸秆的表面微观结构,随着腐解进程的延续,秸秆残余物外表面变得粗糙,表层的基本组织薄壁细胞被破坏,这与李逢雨^[8]的研究结果相似。从 120 d 开始,有虾处理的水稻秸秆受破坏程度明显大于无虾处理,特别是横断面断裂的程度,这可能是由于小龙虾的活动促进了秸秆破碎,从而促进秸秆腐解。

总之,稻虾环沟模式下,小龙虾扰动能增加中后期水稻秸秆表面微观结构的受破坏程度,促进后期水稻秸秆腐解和养分释放。

参考文献 References

- [1] 倪进治,徐建民,谢正苗. 有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 416-419. NI J Z, XU J M, XIE Z M. Dynamic of active organic matter fractions in fluvio-aquic soil after application of organic fertilizers [J]. Journal of agro-environmental science, 2003, 22(4): 416-419 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李逢雨,孙锡发,冯文强,等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 374-380. LI F Y, SUN X F, FENG W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2009, 15(2): 374-380 (in Chinese with English abstract).
- [3] 于秀娟,郝向举,党子乔,等. 中国小龙虾产业发展报告(2022)[J]. 中国水产, 2022(6): 47-54. YU X J, HAO X J, DANG Z Q, et al. China crayfish industry development report (2022)[J]. China fisheries, 2022(6): 47-54 (in Chinese).
- [4] 彭成林,袁家富,马朝红,等. 湖北省稻虾共作典型区域水稻施肥现状评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(7): 30-33. PENG C L, YUAN J F, MA C H, et al. Evaluation of rice fertilization status in typical areas of integrated rice-crayfish mode in Hubei Province [J]. Hubei agricultural sciences, 2021, 60(7): 30-33 (in Chinese with English abstract).
- [5] 佘国涵,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(中英文), 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 with English abstract).
- [6] 彭成林,袁家富,贾平安,等. 长期稻虾共作模式对不同施氮量下直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 15-21. PENG C L, YUAN J F, JIA P A, et al. Effects of long-term integrated rice-crayfish model on yield and nitrogen use efficiency of direct-seeding rice under different nitrogen application rates [J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2020, 49(4): 15-21 (in Chinese with English abstract).
- [7] 彭成林,袁家富,佘国涵,等. 长期稻虾共作模式下稻田钾素平衡状况及合理施钾量研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 135-141. PENG C L, YUAN J F, SI G H, et al. Study of potassium balance and potassium application rate in long-term integrated rice-crayfish mode [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2021(4): 135-141 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李逢雨. 秸秆还田养分释放规律及稻草化感作用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007. LI F Y. Patterns of nutrient release from straws returned to the field and the allelopathic effect of rice straw [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [9] 郑丹. 不同条件下作物秸秆养分释放规律的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012. ZHENG D. The nutrient releasing regularity of crop stalks under different conditions [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [10] 车玉萍,林心雄,程励励,等. 用¹⁴C示踪法研究植物残体在田间的分解速率[J]. 土壤, 1993, 25(3): 159-161. CHE Y P, LIN X X, CHENG L L, et al. Study on decomposition rate of plant residues in field by ¹⁴C tracer method [J]. Soils, 1993, 25(3): 159-161 (in Chinese).
- [11] 王景,陈曦,张雅洁,等. 好气和厌氧条件下小麦秸秆的腐解特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 161-168. WANG J, CHEN X, ZHANG Y J, et al. Characteristic of wheat straw decomposition under aerobic and anaerobic condition in soil [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3): 161-168 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王景,魏俊岭,章力干,等. 厌氧和好气条件下油菜秸秆腐解的红外光谱特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 892-899. WANG J, WEI J L, ZHANG L G, et al. FTIR characteristic of rapeseed straw decomposition under anaerobic and aerobic conditions [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2015, 23(7): 892-899 (in Chinese with English abstract).
- [13] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 不同作物还田秸秆的养分释放

- 特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276. DAI Z G, LU J W, LI X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 272-276 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王景, 陈曦, 魏俊岭. 水稻秸秆和玉米秸秆在好气和厌氧条件下的腐解规律[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1): 59-65. WANG J, CHEN X, WEI J L. Decomposition of rice straw and corn straw under aerobic and anaerobic conditions [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2017, 34(1): 59-65 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2008, 16(3): 607-610. WANG Y Q, GUO X S. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2008, 16(3): 607-610 (in Chinese with English abstract).

Characteristics of straw decomposition, nutrient release and structural changes of rice under disturbance from crayfish

PENG Chenglin¹, XU Dabing¹, ZHOU Yong², SI Guohan¹, ZHAO Shujun¹, LIU Wei¹, ZHOU Jianxiong¹

1. *Institute of Plant Protection and Soil Fertilizers, Hubei Academy of Agricultural Sciences/National Observation and Experiment Station for Soil Quality, Hongshan, Wuhan 430064, China;*
2. *Agricultural Technology Service Center of Huangtugang Town, Macheng City, Hubei Province, Macheng 438302, China*

Abstract The nylon net cages self-made were used to study the characteristics of straw decomposition, nutrient release characteristics, and surface microstructure changes of rice under the disturbance from crayfish simulated in a trench for aquaculture with rice-crayfish model and with no crayfish as a control in order to investigate the process and characteristics of straw decomposition of rice participated by crayfish under continuous soaking conditions, improve the technology for returning rice straw to the field in the rice-crayfish model, and realize the efficient utilization of straw resources and sustainable development of farmland. The results showed that the average decomposition rate of rice straw in each stage showed a characteristic of fast-slow-fast-slow-fast regardless of whether crayfish participated or not. There was no significant difference in the amount of decomposition, cumulative decomposition rate, and average decomposition rate between the treatment with crayfish and the treatment without crayfish before 150 days. All indexes of the treatment with crayfish were significantly higher than those of the treatment without crayfish after 180 days. The cumulative decomposition rate of rice straw in the treatment with crayfish reached 85.67%, which was 12.35 percentage points higher than that in the treatment without crayfish at 210 days. The cumulative release rate of straw nutrients was in the decreasing order of $K > P > N$. The cumulative release rate of N in the treatment with crayfish was higher than that in the treatment without crayfish after 150 days. The cumulative release rate of P and the cumulative release rate of total nutrient in the treatment with crayfish were higher trend than those in the treatment without crayfish after 180 days. The cumulative release rate of K in the treatment with crayfish was higher than that in the treatment without crayfish at 210 days. The surface structure of straw treated with crayfish was significantly more damaged than that treated without crayfish after 120 days. It is indicated that the disturbance from crayfish can increase the degree of damage to the surface microstructure of rice straw at the middle and late stages, promote the decomposition and nutrient release of rice straw at the late stage in a trench for aquaculture with rice-crayfish model.

Keywords co-culture of rice and crayfish; returning straw to the field; decomposition; nutrient release; surface microstructure

(责任编辑:张志钰)