

虾稻共作对稻田土壤线虫群落结构的影响^①

刘赫群¹, 李嘉尧², 成永旭², 吴纪华^{1*}

(1 复旦大学生物多样性科学研究所, 生物多样性和生态工程教育部重点实验室, 上海 200438;

2 上海海洋大学省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 农业生态系统利用种间互惠将种植业与养殖业相结合, 既能提高农作物产量, 也能减少化肥农药等对环境的危害。本研究以土壤线虫作为指示生物, 研究外来物种克氏原螯虾与水稻种养结合模式对稻田土壤生态系统的影响, 为虾稻共作模式下稻田生态系统的健康和可持续利用提供依据。通过比较水稻单作和虾稻共作, 分别在水稻分蘖期、抽穗期和成熟期采集土壤样品, 分析土壤线虫群落结构。结果表明: 与水稻单作相比, 虾稻共作土壤中食细菌线虫的百分比较高(分蘖期增加了 26.52%, 抽穗期增加了 19.85%, 成熟期增加了 32.65%), 同时机会主义 cp1 线虫类群所占百分比较高(分蘖期增加了 31.13%, 抽穗期增加了 24.91%, 成熟期增加了 19.49%), 说明虾稻共作生态系统中农田土壤养分循环较快, 土壤呈养分富集。但是, 虾稻共作农田土壤中捕食杂食性线虫、cp3~5 线虫类群百分比较低($P < 0.05$), 同时成熟度指数也显著低于水稻单作。因此, 在克氏原螯虾的影响下, 稻田土壤食物网趋于简化, 土壤的生物稳定性有下降趋势, 故需要进一步加强虾稻共作对稻田土壤健康长期影响的监测和研究。

关键词: 农田生态系统; 虾稻共作; 土壤线虫

中图分类号: S154.1 **文献标识码:** A

因全球人口的快速增长和气候变化, 农业生产正面临严峻的挑战^[1]。现代农业因使用化肥农药等化学物质, 造成土壤污染, 对维持农作物长期稳产及农产品安全产生不利影响。如何减轻化肥农药对农田土壤带来的危害, 并增加农作物的产量, 是实现农业可持续发展所需解决的重要问题。目前许多研究已发现物种间的互利互惠能够减少农药化肥的使用, 提高农业系统的生产力^[2-6], 从而成为实现可持续农业的重要途径。现有研究发现, 渔稻共作(即在稻田养殖水产经济动物)是利用生物多样性的重要方式之一, 能够有效减少害虫和杂草, 减轻水体富营养化, 增加土壤肥力, 提高水稻产量^[7-9]。

近年来, 渔稻共作得到推广, 并逐渐发展成为包括稻-鱼、稻-蟹、稻-虾等多种类型共作的稻田综合种养模式。克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)原产于美国中南部和墨西哥东北部, 并于 1929 年引进中国^[10], 虽是外来物种, 但人们发现该虾不仅具有食用价值, 同时还能在稻田中进行养殖^[11]。虾稻共作模式充分

利用人工生态系统将种植业与养殖业有机结合^[12], 是一种提高生产效益的高效模式^[13]。尽管虾稻共作模式已经在中国许多地区进行了产业化推广, 但这种外来生物在稻田中进行综合种养的模式对稻田土壤及生态系统的健康和稳定具有什么样的影响, 尚没有报道。

在农田土壤生态系统中, 线虫通常是土壤动物中的优势类群, 具有较高的多样性, 在土壤食物网中占据多个营养级^[14]。食细菌线虫、食真菌线虫和捕食性线虫调节着土壤生态系统中的营养循环, 对农作物的生长具有重要的促进作用。但是, 一些植食性的病原线虫取食作物根系等, 也会对农业生产带来负面影响。此外, 土壤线虫对环境干扰和污染敏感, 可以反映土壤的降解、矿化等, 是农田土壤健康和可持续发展的重要指示生物^[15-17]。因此, 本研究以农田土壤线虫为指示生物, 研究虾稻共作综合种养模式对土壤生物组分的影响, 为评价虾稻共作对农田生态系统可持续发展的影响提供依据。

基金项目: 上海市科委崇明专项农业科技项目(15391912100)资助。

* 通讯作者(jihuawu@fudan.edu.cn)

作者简介: 刘赫群(1991—), 女, 吉林白山人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学方面的研究。E-mail: 1421070094@fudan.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本研究在上海市崇明岛上海海洋大学实验基地 (31°34'N, 121°33'E) 进行。试验分为处理组(虾稻共作)和对照组(水稻单作), 每组重复 5 次, 共 10 块样地, 每块样地面积为 8 m × 12.5 m, 每块样地之间用田埂隔开。在每块样地中间挖宽 0.5 m 的十字田沟, 有利于养殖水生动物在田间充分活动, 且十字田沟的经济效益较高^[18]。稻秧于 2015 年 6 月底移栽, 种植密度为 13 丛/m²。虾苗放入暂养池中进行培育, 在水稻进入返青期后, 投放成体克氏原螯虾, 每块样地共投放 205 只克氏原螯虾。7 月 5 日在投放克氏原螯虾前采集土壤样品, 记录样地的本底值, 各样地间无显著差异。完成投放克氏原螯虾后, 分别于 8 月 18 日(水稻分蘖期)、9 月 17 日(水稻抽穗期)、10 月 20 日(水稻成熟期)采集土壤样品。采样时在每块样地十字田沟分隔的四个区域内分别采集土样, 利用内径为 3 cm 的采土器采集表层 0 ~ 10 cm 的土柱, 并将土柱混匀。水稻于同年 11 月收割。

将采集的土壤样品带回实验室进行处理, 称取约 150 g 土样用 4% 的热福尔马林溶液固定, 用于线虫群落的分离, 同时, 另称取约 20 g 土壤测定土壤含水率。利用 ludox 悬浮法^[19]分离土壤样品中的线虫, 在解剖镜下计数。每个样品随机挑取 100 条线虫进行制片, 鉴定线虫至属的水平。将线虫按食性划分类群为食藻类线虫、食植线虫、食细菌线虫、食真菌线虫、捕食性线虫和杂食性线虫^[20], 并根据不同的生活史对策将线虫划分成 5 个 cp(colonizer-persister)类群(cp1 ~ cp5)^[21], cp1 为典型的机会主义者(opportunist), 极耐污染和环境压力; cp2 也是机会主义者, 较耐污染和环境压力; cp3 对环境压力较敏感; cp4 对环境压

力敏感; cp5 为典型的 K-对策者, 对污染和环境压力极为敏感。最后, 计算可以反映生态系统受干扰程度及土壤可持续健康程度的成熟指数 MI, 其公式^[21]为:

$$MI = \sum_{i=1}^n v(i) \cdot f(i)$$

式中: $v(i)$ 为第 i 个类群的 cp 值, $f(i)$ 为第 i 个类群在样品中所占的比例。

1.2 数据分析

采用 Statistica 统计软件中的多次测量重复方差分析(Repeated Measures ANOVA)分析克氏原螯虾对水稻田线虫群落结构特征的影响(显著水平 $P < 0.05$), 同时对水稻每个生长时期处理间差异利用 Fisher 检验进行后续检验。为了满足参数检验的条件, 线虫营养类群百分比数据需进行反正弦平方根转换, 其他部分数据采用对数转换。

2 结果与分析

2.1 线虫营养类群组成

重复方差分析结果表明, 养殖克氏原螯虾对稻田土壤中食细菌线虫的影响达到边缘显著水平 ($P = 0.056$, $F = 4.99$, $df = 1$), 而对其他各营养类群无显著影响(表 1)。除食植线虫外, 其他各线虫食性类群占线虫总数量的比例都受克氏原螯虾放养的显著影响。从水稻分蘖期至成熟期, 虾稻共作稻田土壤中食细菌线虫的百分比要显著高于水稻单作稻田土壤 ($P < 0.05$, $F = 12.71$, $df = 1$)。水稻分蘖期食细菌线虫的百分比增加了 26.52%, 抽穗期增加了 19.85%, 成熟期增加了 32.65%。而虾稻共作土壤中的杂食性和捕食性线虫显著低于水稻单作土壤(杂食性线虫: $P < 0.05$, $F = 9.11$, $df = 1$; 捕食性线虫: $P < 0.05$, $F = 5.46$, $df = 1$)。在虾稻共作中, 食细菌线虫一直都是土壤线虫群落的优势营养类群, 所占比例均大于 50%。

表 1 水稻单作和虾稻共作稻田土壤线虫各营养类群密度(ind./g 干土±SE)及百分比(%±SE)
Table 1 Densities and percentages of soil nematode trophic groups in rice monoculture and rice-crayfish co-culture

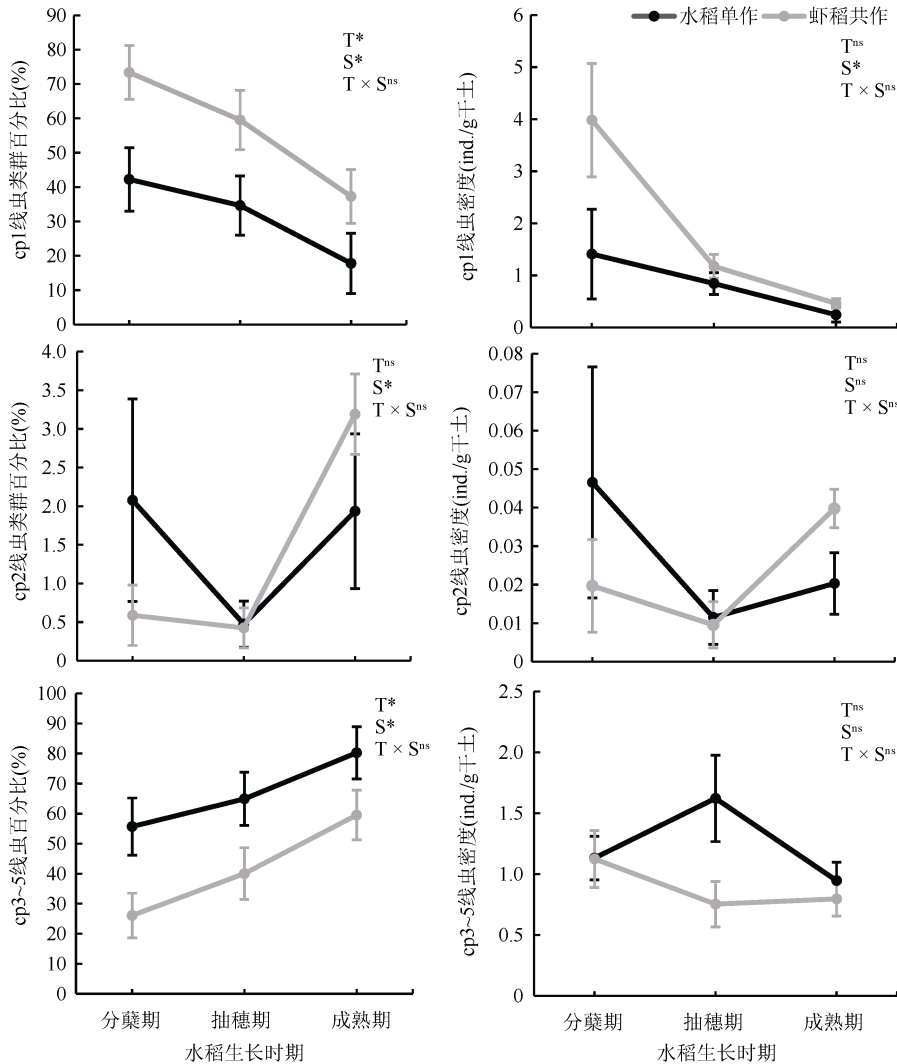
生长时期	处理	食细菌线虫		食植线虫		捕食性线虫		杂食性线虫	
		密度	百分比	密度	百分比	密度	百分比	密度	百分比
分蘖期	水稻单作	1.51 ± 0.56 a	48.54 ± 8.75 a	0.03 ± 0.01 a	1.56 ± 1.03 a	0.68 ± 0.20 a	35.72 ± 10.80 a	0.37 ± 0.14 a	14.18 ± 3.92 a
	虾稻共作	4.05 ± 1.07 a	75.06 ± 7.21 b	0.01 ± 0.01 a	0.39 ± 0.39 a	0.83 ± 0.23 a	19.75 ± 6.70 a	0.22 ± 0.05 a	4.41 ± 0.78 b
抽穗期	水稻单作	1.18 ± 0.21 a	46.53 ± 6.22 a	0.04 ± 0.01 a	1.36 ± 0.88 a	1.00 ± 0.20 a	40.71 ± 6.72 a	0.24 ± 0.05 a	10.53 ± 1.98 a
	虾稻共作	1.30 ± 0.24 a	66.38 ± 6.72 a	0.07 ± 0.05 a	5.36 ± 4.67 a	0.49 ± 0.14 a	24.19 ± 3.82 a	0.08 ± 0.04 a	3.88 ± 1.99 b
成熟期	水稻单作	0.29 ± 0.15 a	22.45 ± 8.89 a	0.03 ± 0.02 a	2.52 ± 1.01 a	0.67 ± 0.12 a	57.66 ± 8.78 a	0.21 ± 0.07 a	16.76 ± 5.14 a
	虾稻共作	0.70 ± 0.09 b	55.10 ± 6.78 b	0.07 ± 0.02 a	5.03 ± 1.15 a	0.43 ± 0.07 a	32.45 ± 3.89 b	0.10 ± 0.03 a	7.10 ± 2.18 a
P 值	生长时期	0.004	0.006	0.402	0.090	0.372	0.013	0.028	0.146
	处理	0.056	0.007	0.653	0.531	0.236	0.048	0.108	0.017
	生长时期×处理	0.113	0.579	0.520	0.299	0.149	0.758	0.788	0.965

注: 表中同列小写字母不同表示同一生长时期水稻单作和虾稻共作两处理间差异显著($P < 0.05$); P 值为重复方差分析结果。

2.2 线虫 cp 类群组成及成熟度指数

从水稻分蘖期至成熟期，虾稻共作土壤中 cp1 线虫的百分比要显著高于水稻单作稻田土壤($P<0.05$, $F=8.29$, $df=1$)。水稻分蘖期 cp1 线虫增加了 31.13%，抽穗期增加了 24.91%，成熟期增加了 19.49%。两种处理间 cp2 线虫类群所占百分比差异不显著，而

cp3~5 线虫类群所占百分比要显著低于水稻单作稻田土壤($P<0.05$, $F=8.13$, $df=1$)(图 1)。但两种种植模式中 cp1、cp2 和 cp3~5 类群密度无显著差异。通过对线虫成熟度指数的分析得出，从水稻分蘖期至成熟期，虾稻共作稻田土壤线虫成熟度指数均显著低于水稻单作($P<0.05$, $F=21.67$, $df=1$)(图 2)。



(图中 T 表示试验处理；S 表示水稻生长时期；*表示具有显著影响；ns 表示不具有显著影响；误差线为标准误。下同)

图 1 水稻单作和虾稻共作稻田土壤线虫各 cp 类群所占百分比和密度

Fig. 1 Percentages and densities of soil nematode cp groups in rice monoculture and rice-crayfish co-culture

3 讨论

本研究结果说明虾稻共作系统会改变稻田土壤的线虫群落结构。与水稻单作稻田相比，虾稻共作稻田土壤食细菌线虫所占比例相对较高。由于食细菌线虫能促进细菌生物量的增长，从而提高土壤养分矿化率，增强植物对土壤养分的吸收利用^[22]。本研究结果意味着虾稻共作农田土壤生态系统营养物质循环加快，并具有较高的营养物质利用率^[23]。其他渔稻

生态系统的相关研究发现渔稻共作对农田土壤营养物质具有积极作用。例如，Li 等人^[24]研究发现在鸭稻共作和鱼稻共作系统中，稻田养鱼养鸭能够减少氮的损失速率，从而提高氮的利用率。汪清等人^[25]的研究发现稻田养蟹增加了铵态氮和速效磷的含量。本研究发现虾稻共作农田土壤中营养循环细菌通道加快，原因可能是虾稻田中克氏原螯虾的排泄物可作为有机肥料，为微生物提供更多营养，并且克氏原螯虾在田间的活动提高了土壤通气性，增加了好氧微生物

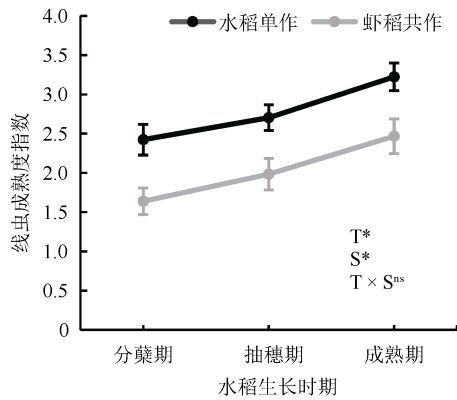


图 2 水稻单作和虾稻共作稻田土壤线虫成熟度指数
Fig. 2 Maturity indexes in rice monoculture and rice-crayfish co-culture

生物量和活性,增加了资源的吸收,从而加速了营养物质的循环^[26-28]。佘国涵等人^[29]有关虾稻共作的研究也发现这种种养模式增加土壤微生物活性,改变了稻田生态系统中的物质循环。此外,本研究发现虾稻田中线虫 cp1 类群所占比例较高。cp1 线虫为富集机会主义者,其种群的快速增长是对土壤中营养物质增加的响应,这也进一步证明虾稻共作能加快农田土壤中的营养循环。

虾稻共作土壤中的捕食性线虫所占比例相对较低。捕食性线虫对农田土壤食物网的稳定性具有重要作用^[30],因此虾稻共作可能会导致土壤食物网结构的简化。线虫的成熟度指数可用于评价外界的干扰程度,在干扰下土壤线虫成熟度指数较低^[31],主要表现为 cp1 的线虫占优势。Bongers^[21]指出成熟度指数越高,生态系统的成熟度越高,反之则说明生态系统受到干扰而导致退化。王静^[32]的研究发现在生态系统受到外界施肥干扰,土壤肥力增加的情况下,成熟度指数则变小。本研究发现虾稻系统中土壤线虫成熟度指数较低,说明克氏原螯虾的干扰在增加土壤肥力的同时,可能导致土壤生态系统的生物稳定性退化。捕食性线虫对植食性线虫具有一定的控制作用,虽然并未发现虾稻共作对植食性线虫具有显著影响,但虾稻田中捕食性线虫所占比例相对较低,将可能不利于对植食性线虫的控制。

4 结论

虾稻共作改变土壤线虫的群落结构,食细菌线虫比例增加,说明虾稻共作增加土壤肥力,加快物质循环,这对满足水稻的养分需求具有积极作用。而虾稻田中高营养级土壤线虫比例下降,线虫成熟度指数降低,说明生态系统食物网趋于简化,土壤生物稳定性下降。由于本研究试验时间较短,克氏原螯虾在稻田

中进行综合种养对稻田土壤的长期影响以及相应的改善性农业措施仍有待进一步研究。

致谢:感谢上海海洋大学的管勤壮和刘洪天同学在田间试验上的帮助,感谢严珺协助进行土壤样品采集等工作。

参考文献:

- [1] Godfray H C J. The challenge of feeding 9–10 billion people equitably and sustainably[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(S1): S2–S8
- [2] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192–11196
- [3] 胡亮亮. 农业生物种间互惠的生态系统功能[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 1–95
- [4] 柳欣茹, 包兴国, 王志刚, 等. 灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 951–962
- [5] 代会会, 胡雪峰, 曹明阳, 等. 豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 911–918
- [6] Ren W Z, Hu L L, Zhang J, et al. Can positive interactions between cultivated species help to sustain modern agriculture?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(9): 507–514
- [7] Xie J, Hu L L, Tang J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): E1381–E1387
- [8] Zhang J E, Xu R B, Chen X, et al. Effects of duck activities on a weed community under a transplanted rice-duck farming system in southern China[J]. *Weed Biology and Management*, 2009, 9(3): 250–257
- [9] Feng J F, Li F B, Zhou X Y, et al. Nutrient removal ability and economical benefit of a rice-fish co-culture system in aquaculture pond[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 315–319
- [10] Li Y H, Guo X W, Cao X J, et al. Population genetic structure and post-establishment dispersal patterns of the red swamp crayfish *Procambarus Clarkii* in China[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(7): e40652
- [11] Brady S. Incidental aquaculture in California's rice paddies: red swamp crawfish[J]. *The Geographical Review*, 2013, 103(3): 336–354
- [12] 熊良伟, 王权. 淡水小龙虾稻田高效生态养殖技术[J]. *水产科技情报*, 2011, 38(3): 135–137
- [13] 刘其根, 李应森, 陈蓝荪. 克氏原螯虾的生态养殖(四)-稻田养殖克氏原螯虾[J]. *水产科技情报*, 2008, 35(4): 186–189

- [14] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1541–1546
- [15] Schloter M, Dilly O, Munch J C. Indicators for evaluating soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98(1/2/3): 255–262
- [16] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3–11
- [17] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(6): 224–228
- [18] 吴雪, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼系统中不同沟型边际弥补效果及经济效益分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 995–999
- [19] Griffiths B S, Boag B, Neilson R, et al. The use of colloidal silica to extract nematodes from small samples of soil or sediment[J]. Nematologica, 1990, 36(4): 465–473
- [20] Yeates G W, Bongers T, DE Goede R G M, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera--An outline for soil ecologists[J]. Journal of Nematology, 1993, 23(3): 315–331
- [21] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia, 1990, 83(1): 14–19
- [22] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 124–133
- [23] van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2008, 11(3): 296–310
- [24] Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Nitrogen losses from integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in southern China[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 207–217
- [25] 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
- [26] 章家恩, 许荣宝, 全国明, 等. 鸭稻共作对土壤微生物数量及其功能多样性的影响[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 56–62
- [27] 金全永, 朱梅芳, 金红永. 水稻_蔬菜_小龙虾多元化复合生态种养试验[J]. 渔业致富指南, 2009, (21): 56–58
- [28] 毛妙, 王磊, 席运官, 等. 有机种植业土壤线虫群落特征的调查研究[J]. 土壤, 2016, 48(3): 492–502
- [29] 倡国涵, 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
- [30] Polis G A, Strong D R. Food Web Complexity and Community Dynamics[J]. The American Naturalist, 1996, 147(5): 813–846
- [31] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 134–141
- [32] 王静. 施肥对青藏高原东部高寒草甸土壤线虫群落组成的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 1–45

Effects of Rice-crayfish Co-culture on Nematode Communities in Rice Paddy Soil

LIU Hequn¹, LI Jiayao², CHENG Yongxu², WU Jihua^{1*}

(1 Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Ministry of Education, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200438, China; 2 Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Manipulating crop production and aquaculture in agro-ecosystems by utilizing the positive species interactions can not only increase the yield of crops, but also reduce the utilization of chemical fertilizers and pesticides. In this study, soil nematodes were used as a biological indicator to investigate the effects of co-culture of rice (*Oryza sativa*) and an exotic species *Procambaru sclarkii*, aiming to evaluating the effect of rice-crayfish co-culture on soil health of agro-ecosystem. Soil samples were collected from rice monoculture and rice-crayfish co-culture at the tillering stage, heading stage and maturing stage of rice and the community structure of soil nematodes were investigated. The results showed that compared with rice monoculture, the percentage of bacterial-feeding nematodes increased by 26.52%, 19.85% and 32.65%, while the percentage of cp1 nematodes increased by 31.13%, 24.91% and 19.49% at the tillering, heading and maturing stages under rice-crayfish co-culture, respectively, indicating a faster nutrient cycling and higher nutrient level in rice-crayfish co-culture ecosystem. However, the percentage of cp3-5 nematodes and the maturity index were significantly lower in rice-crayfish co-culture than those in rice monoculture ($P < 0.05$), indicating that the *P. clarkii* in co-culture may induce a simplified soil food web and a decreased soil biological stability, thus, further study is needed to monitor soil health in rice-crayfish co-culture ecosystem.

Key words: Agro-ecosystem; Rice-crayfish co-culture; Soil nematodes