

doi: 10.7541/2024.2024.0070

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0070

耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统青蟹食物来源分析

郑纯纯^{1,2} 周厚杰^{1,2} 史策^{1,2} 王春琳^{1,2} 母昌考^{1,2} 叶央芳^{1,2} 李荣华^{1,2}
吴清洋^{1,2} 刘海娟³ 王晓朋^{1,2} 周月越^{1,2} 陈书健^{1,2}

(1. 宁波大学海洋学院, 教育部水产生物技术重点实验室, 农业部绿色海水养殖重点实验室, 浙江海洋高效健康水产养殖协同创新中心, 宁波 315832; 2. 中国三门青蟹产业技术研究院, 台州 317109; 3. 广西海洋研究有限责任公司, 北海 536000)

摘要: 为了探究拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*, 简称青蟹)在耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统中的食物来源, 研究在耐盐碱水稻田内投放密度为0.6 ind./m²的拟穴青蟹, 经过为期2个月的养殖实验后通过碳、氮稳定同位素技术分析青蟹的食物来源。研究结果显示: 实验期间青蟹特定生长率为(2.71±0.27)%/d, 存活率为(14.26±4.85)%, 青蟹收获产量为(116.30±39.59) kg/ha, 水稻产量为3332.25 kg/ha。拟穴青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 为(-21.55±0.90)‰, $\delta^{15}\text{N}$ 为(9.96±0.40)‰, 可能食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 为(-30.51±0.25)‰—(-13.45±0.15)‰。其中, 水花生的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低(-30.51±0.25)‰, 其次是水稻(-28.73±0.73)‰, 而稗草的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高(-13.45±0.15)‰。可能食物源的 $\delta^{15}\text{N}$ 为(5.97±0.13)‰—(11.38±0.11)‰, 其中配合饲料的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低(5.97±0.13)‰, 飞虫的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高(11.38±0.11)‰。在食物贡献方面, 配合饲料对青蟹食物贡献最高, 达(61.2±3.8)%, 稗草和千金子次之, 分别为(8.3±5.2)%和(8.8±6.1)%, 飞虫的食物贡献率占比最低, 为(0.9±1.4)%。研究表明青蟹在耐盐碱水稻田内生长状况良好, 配合饲料可成为稻田内青蟹的主要食物来源, 同时植物性食物源对青蟹食物有重要贡献。研究可为耐盐碱水稻-青蟹综合种养系统管理和饲料开发提供理论和技术支撑。

关键词: 耐盐碱水稻; 稳定同位素; 食性; 综合种养; 拟穴青蟹

中图分类号: S962.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)11-1855-07



拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*, 简称青蟹)广泛分布于中国东南沿海地区, 为甲壳纲(Crustacea)、十足目(Decapoda)、梭子蟹科(Portunidae)、青蟹属(*Scylla*), 是一种重要经济价值的海水蟹类, 具有风味鲜美、适应性强和生长速度快的优点^[1,2], 在中国青蟹的养殖记录可追溯到100多年前^[3]。目前青蟹养殖的主要模式为池塘养殖, 但近年来沿海地区的海水池塘养殖受到“退塘还田”等环保政策的影响, 面积逐年下降, 导致青蟹供不应求, 亟需探索养殖新空间。

耐盐碱水稻(海水稻)是一种可以在沿海滩涂、

盐碱地正常生长的, 具有抗盐碱、抗淹、抗倒伏、抗病虫等特点的水稻。目前, 国内耐盐碱水稻研发团队已研发出可在土壤pH为8—9、盐度为6‰以下种植的耐盐碱水稻, 但海水稻种质需要一定的淡水资源和农田灌溉设施, 种植前期成本高、收益低, 减缓了耐盐碱水稻产业化推广的进程^[4], 利用耐盐碱水稻进行稻渔综合种养, 是提升水稻经济效益的可行方法之一。

稻蟹共作模式在我国已有30多年的发展历程^[5], 稻蟹综合种养系统中水稻和蟹存在互惠互利的关系^[6,7]。但目前对于利用耐盐碱水稻进行稻渔综合

收稿日期: 2024-02-24; **修订日期:** 2024-05-23

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划(2023SNJF063); 浙江省重点研发计划(2021C02074); 乐清市农业农村局化肥减量增效“三新”耐盐碱水稻青蟹共作及轮作技术开发; 国家虾蟹产业技术体系资助 [Supported by the Zhejiang Province San-Nong-Jiu-Fang Science and Technology Cooperation Project (2023SNJF063); Province Key Research and Development Program of Zhejiang (2021C02047); Development of salt alkali tolerant rice and crab co cultivation and rotation technology in the “Three New” of reducing fertilizer usage and increasing efficiency by the Agriculture and Rural Bureau of Yueqing City; the earmarked fund for China Agriculture Research System-48]

作者简介: 郑纯纯(1997—), 女, 硕士在读; 主要从事青蟹稻田综合种养研究。E-mail: 394036598@qq.com

通信作者: 史策(1985—), 主要从事海水蟹养殖技术研究。E-mail: shice3210@126.com

种养模式的实践相对较少,这与耐盐碱水稻田水体具有一定盐碱度有关。青蟹作为广盐物种,经过驯化后具有较好的耐盐碱能力^[8],是耐盐碱水稻综合种养的潜在优良物种,并已在山东、浙江、广东等地进行了产业实践。周冬平等^[9]比较了黄河三角洲地区“拟穴青蟹-脊尾白虾”养殖模式与“拟穴青蟹-耐盐碱水稻”养殖模式中青蟹的饵料系数与特定生长率,发现二者之间不存在显著差异,吴清洋等^[10]报道了“青蟹-海水稻”共作模式在广东台山地区取得了较好的经济效益。

稳定同位素分析是研究动物食性的常用方法^[11-13],通过测量被同化物质的稳定同位素来评估生物体的食物来源,并提供与生物体组织周转时间相对应的长周期综合食物信息^[14]。现有研究发现消费者组织中的碳、氮稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)可指示食物来源,并且随着营养级增加,消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别呈现出+1‰和+3.4‰的富集水平^[15,16]。一个物种所占据的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 空间的同位素生态位可以反映其食物网中资源的营养多样性^[17],并确定不同饵料来源的贡献率。目前已经有学者应用稳定同位素技术研究水产动物在养殖过程中的食物偏好,调查水产动物对环境中食物资源的利用情况,然而目前对于拟穴青蟹在稻蟹综合种养系统中的食物来源研究仍然较少。因此,本研究拟采用稳定同位素技术对耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中青蟹的食物来源进行分析,研究结果将对于促进耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验田概况

实验区域位于浙江省台州市三门县凤凰山农垦场(E 121°57', N 29°06'),设置实验田重复共3块,面积均为300 m²,其中包括蟹沟面积25 m²,水稻种植面积275 m²,实验田改造完成后保持稻田水位0.2 m,蟹沟宽2.5 m,深1.5 m,水位保持为1.3 m,实验组示意图如图1所示。在养殖过程中不换水,根据天气和水位抽排水。蟹沟底部放置纳米气盘增氧,蟹沟面积占总稻田面积8.3%。各田块以防水膜分隔,防水膜埋入土内20 cm,地表上高度保留80 cm,用玻璃纤维杆作支撑,分隔田块同时可防止青蟹逃逸。

1.2 青蟹来源及淡化

青蟹为购买的海捕苗。在实验开始前,投放的青蟹于水泥池内进行淡化以适应稻田盐度。淡化池内提前放入消毒后的芦苇叶作为青蟹的遮蔽物,

池内溶氧大于5 mg/L,水温在(22±2)℃。所有青蟹用5 mg/L的聚维酮碘浸泡后放入淡化池,密度为40—50 ind./m²。青蟹淡化步骤按照姚宏志等^[18]专利进行,在适应12h后盐度降为12‰,以每6h降2‰的速度降为8‰的盐度后,以每6h降1‰的速度降为1‰的盐度即完成淡化。在所有蟹苗淡化后,每150只青蟹装入四周有通气孔的泡沫盒,泡沫盒底部铺设湿润的海绵,放入芦苇叶,运输至稻田内投放。

1.3 实验设计

本研究使用的水稻品种为袁种一号(青岛袁策集团有限公司,青岛),稻田施底肥(N:N:K=15:15:15,雅苒国际有限公司,芬兰)后于2022年6月19日插秧,秧苗高为20 cm。2022年8月13日在3块实验田投放180只四肢健全、规格均匀、活力健壮的青蟹,青蟹的平均体重为(26.22±3.83) g,水稻高为55 cm,养殖过程中不使用化肥和农药。实验周期60d,期间每日17点投喂青蟹专用配合饲料(粗蛋白含量≥42.0,粗脂肪≥7.0,粗纤维≤6.0,粗灰分≤17.0,青岛赛格林生物工程有限公司),根据残饵和青蟹生长情况调整投喂量,每日巡田,观察青蟹活动,用抄网打捞死亡的青蟹并做好记录。

在实验期间每天监测水温、pH、盐度和溶氧值,每15d测定3组水体的理化性质。用镉还原法测定水样的硝酸盐,用重氮化法测定水样的亚硝酸盐,用水杨酸法测定水样的氨氮,用过硫酸盐氧化法测定水样的总氮,用氧化法测定水样的化学需氧量(COD),用抗坏血酸法测定水样的总磷,用N,N-二甲基对苯二胺法测定水样的硫化物,用抗坏血酸法测定水样的活性磷^[19]。在养殖期间,稻田水温25.3—

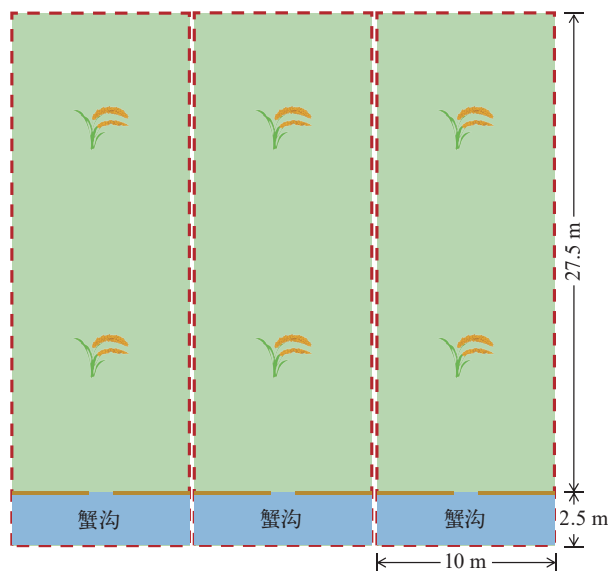


图1 实验组示意图

Fig. 1 Experimental group diagram

35.6℃, pH 7.01—7.52, 盐度1‰—7‰, 溶氧 ≥ 5 mg/L, 氨氮0.02—0.27 mg/L, 硝酸盐0.14—0.26 mg/L, 亚硝酸盐0.001—0.008 mg/L, 总氮1.0—2.2 mg/L, 活性磷0—0.04 mg/L, 总磷0.03—0.08 mg/L, COD₁₉—42 mg/L, 硫化物0—0.05 mg/L。

实验开始与结束时每组随机取青蟹15只, 测量其生长指标, 用电子分析天平测量青蟹的体重, 用电子游标卡尺测量青蟹的体重、全甲宽、甲长、体高。在实验结束后, 计算青蟹的特定生长率、存活率和产量, 称量各组的水稻产量。随机取6只拟穴青蟹, 取青蟹的螯部肌肉, 用纯净水清洗后, 在50℃烘干至恒重, 研磨, 过100目网筛, 保存于离心管中, 干燥避光保存^[20]。

在实验结束后, 在每个组内采集可能食物源样品。水生植物(水稻、千金子、稗草、水花生、水棉)中除漂浮植物采集全株外, 其他植物均只采集各株的茎叶, 分类做好标签, 用纯净水反复冲洗, 在105℃下灭菌15min。用纯净水清洗因灭虫灯诱集杀死的飞虫和从各组的底泥、环沟和田埂上采集的各种底栖动物(螺、蛙、蜘蛛、蜻蜓幼虫、爬虫等), 底栖动物用清水暂养24h后去除外壳。采集各实验组的水样, 用13#浮游动物网过滤后保留浮游动物于锥形瓶中, 加入纯净水暂养后, 用马弗炉灼烧后的玻璃纤维滤膜抽滤。将过滤过浮游动物的水样用马弗炉灼烧后的玻璃纤维滤膜抽滤, 将滤膜在装有浓盐酸的干燥器内熏蒸24h, 获得颗粒有机物(POM)。将所有水生植物、飞虫、底栖动物、滤膜、青蟹专用配合饲料的样品放入烘箱, 在50℃烘干至恒重, 除滤膜外的所有样品经研磨后过100目网筛, 样品粉末干燥避光保存, 滤膜装入培养皿内, 用铝箔干燥保存^[20]。

所有食物源样本和拟穴青蟹样本均送往上海交通大学分析测试中心使用元素分析同位素质谱联用仪测定碳、氮稳定同位素, 标准物质为美国拟箭石(VPDB)和N₂。碳、氮稳定同位素值以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表示, 计算公式如下:

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, X 为 ^{13}C 或 ^{15}N , R_{sample} 是实验样本的同位素比值, R_{standard} 是标准品的同位素比值。

1.4 数据分析

水质数据使用IBM SPSS Statistics 20软件进行分析, 使用IsoSource 1.3.1软件分析不同食物源对拟穴青蟹的食物贡献率。计算时, 采用的Increment数值为2%, Tolerance数值为0.01, $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏系数即 $\Delta^{13}\text{C}$ 为1.3‰, $\delta^{15}\text{N}$ 的分馏系数即 $\Delta^{15}\text{N}$ 为3.3‰。

2 结果

2.1 耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统中青蟹生长指标及产量

青蟹的生长指标结果如表1所示, 拟穴青蟹体重由(26.2±3.9) g增长到(135.9±39.8) g, 全甲宽由(49.9±2.6)增长到(84.8±7.3) mm, 甲长由(35.7±3.8)增长到(63.9±5.6) mm, 体高由(21.0±1.2)增长到(35.8±3.1) mm。耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统中青蟹存活率为(14.26±4.85)%, 青蟹收获产量为(116.30±39.59) kg/ha, 特定生长率为(2.71±0.27)%/d, 水稻产量为3332.25 kg/ha。

2.2 耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统中碳、氮稳定同位素特征

将拟穴青蟹及其可能食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值做双象限图(图2)。拟穴青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 为(-21.55±0.90)‰, $\delta^{15}\text{N}$ 为(9.96±0.40)‰。拟穴青蟹可能食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 为(-30.51±0.25)‰—(-13.45±0.15)‰。其中, 水花生的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 其次是水稻, 为(-28.73±

表1 耐盐碱水稻-拟穴青蟹综合种养系统中青蟹生长指标

Tab. 1 Growth indicators of mud crabs in the saline-alkali tolerant rice and mud crab co-culture system

时期 Time	体重 Body weight (g)	全甲宽 Full carapace width (mm)	甲长 Carapace length (mm)	体高 Body height (mm)	特定生长率 Specific growth rate (%/d)
初期Initial stage	26.2±3.9	49.9±2.6	35.7±3.8	21.0±1.2	
末期Last stage	135.9±39.8	84.8±7.3	63.9±5.6	35.8±3.1	2.7±0.3

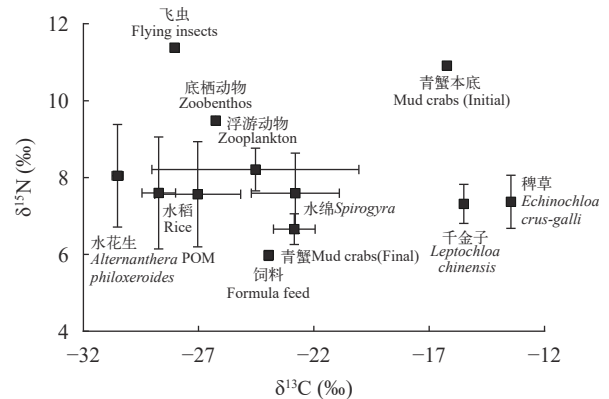


图2 拟穴青蟹及其可能食物源的碳、氮稳定同位素组成

Fig. 2 Carbon and nitrogen stable isotope composition of mud crabs and their potential food sources

图中青蟹的同位素值经分馏系数转换; 正方形为同位素均值, 线条为SD值

The isotopic values of mud crabs are converted by fractionation coefficients. The square represents mean, and the line represents SD

0.73)‰。稗草的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,其次是千金子。青蟹可能食物源的 $\delta^{15}\text{N}$ 为 $(5.97\pm 0.13)\text{‰}$ — $(11.38\pm 0.11)\text{‰}$,配合饲料的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低,飞虫的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高,其次是底栖动物,为 $(9.48\pm 0.07)\text{‰}$ 。

2.3 耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中可能食物源贡献率

将拟穴青蟹及其可能食物源样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值用IsoSource 1.3.1软件计算,得出各可能食物源的贡献率如表2所示。

表2 耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中食物源各组分贡献率
Tab. 2 Contribution rate of different food sources in the saline-alkali tolerant rice and mud crab co-culture system

组分Component (%)	均值±标准差Mean±SD
配合饲料Formula feed	61.2±3.8
飞虫Flying insects	0.9±1.4
底栖动物Zoobenthos	1.7±2.2
水稻Rice	3.7±4.0
稗草 <i>Echinochloa crus-galli</i>	8.3±5.2
千金子 <i>Leptochloa chinensis</i>	8.8±6.1
水花生 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	2.5±2.9
水绵 <i>Spirogyra</i>	5.4±5.5
浮游动物Zooplankton	3.3±3.6
颗粒有机物POM	4.2±4.4

计算结果表明在水稻—拟穴青蟹共作系统中配合饲料是青蟹食物中占比最大的成分,平均贡献率为 $(61.2\pm 3.8)\%$,其次是稗草和千金子,平均贡献率分别为 $(8.3\pm 5.2)\%$ 和 $(8.8\pm 6.1)\%$ 。飞虫的食物贡献率占比最低,仅为 $(0.9\pm 1.4)\%$,底栖动物的食物贡献率次之,平均贡献率为 $(1.7\pm 2.2)\%$ 。

3 讨论

3.1 耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中水稻和青蟹的产量

本研究耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中,水稻产量为 3332.25 kg/ha ,相比水稻-中华绒螯蟹综合种养较低^[21—23],原因可能是因为相较于普通水稻,耐盐碱水稻产量普遍略低、且其产量随着盐度上升而下降^[24]。而本研究中水体盐度在 1‰ — 7‰ ,同时为了避免对青蟹造成胁迫,在施底肥后没有对稻田再进行追肥,因此盐度和追肥两种因素都可能对水稻产量产生影响,使其产量低于一般综合种养条件下的水稻产量。

本研究拟穴青蟹的存活率为 $(14.26\pm 4.85)\%$,青蟹收获产量为 $(116.30\pm 39.59)\text{ kg/ha}$,其存活率高于拟穴青蟹池塘养殖 (9.94%) ^[25]。一般认为,青蟹池塘养殖成活率较低主要原因是相残,放养密度与成活

率负相关。本研究中稻田内青蟹放养密度 (0.6 ind./m^2) 远低于池塘 (6.75 ind./m^2) ^[25],且水稻具有一定的遮蔽作用,这可能降低了青蟹打斗,并对成活率产生正面影响;但另一方面,稻田水体的盐度较低,虽然驯化可以降低青蟹急性低盐胁迫条件下的死亡率,但长期的低盐环境仍然会使青蟹存活率显著下降^[26],因此,实验中青蟹成活率可能是两种因素综合作用的结果。

3.2 耐盐碱水稻—拟穴青蟹综合种养系统中青蟹 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的特征和食物贡献率

稳定同位素可用于了解水产养殖系统中食物网的能量流动,生物体组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值会接近其食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,可用于指示其食物来源,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值可用来指示该生物的营养水平,摄食者的氮同位素通常都比其食物高。在本研究中,稗草的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-13.45\pm 0.15)\text{‰}$,千金子的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-15.50\pm 0.08)\text{‰}$,相对水稻 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,符合C4植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征,水稻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-28.73\pm 0.73)\text{‰}$,处于 -20‰ — -35‰ ,符合C3植物的特征^[20, 27—29]。植物在光合作用中主要利用 ^{12}C ,导致其作为初级生产者 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,而底栖和浮游动物等杂食动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均高于水稻、水花生等大型植物,说明能量转移至浮游动物和杂食动物上,稻蟹共作系统中所有样品的稳定碳、氮同位素值差异较大,高营养级样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 都有增加的趋势^[30—32],飞虫和青蟹的 $\delta^{15}\text{N}$ 相近,且两者的 $\delta^{15}\text{N}$ 为系统中最高值,表明两者为该系统的顶级消费者,而飞虫对青蟹食物的贡献率低,可能是因其生物量相对较少。

各组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小排序为稗草、千金子、青蟹本底值、青蟹、水绵、饲料、浮游动物、底栖动物、POM、飞虫、水稻、水花生。在本研究中,青蟹的食物来源可分为四类:植物性食源(水稻、稗草、千金子、水花生、水绵)、动物性食源(飞虫、底栖动物、浮游动物)、POM和饲料,四类饵料对青蟹的贡献率从高到低排列为饲料、植物性食源、动物性食源和POM。从双象限图可以看出,青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在其他食物源的 $\delta^{13}\text{C}$ 内,饲料的 $\delta^{13}\text{C}$ 与青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相近,表明饲料是稻田内青蟹的主要食物来源,其贡献率达到 61.2% ,在水稻—中华绒螯蟹共作系统中也发现了类似的现象^[20]。值得注意的是,在实验结束后青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比青蟹本底的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大幅降低, $\delta^{15}\text{N}$ 值较前期的幼蟹也有减小,而黄国强等^[33]和李斌等^[34]研究结果显示拟穴青蟹和蒙古鮠随发育和体型增大, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著升高,其原因可能是因为本实验的幼蟹为海捕蟹,在进入稻田前以摄食动物性食源为主^[35],进入

稻田后则更多地摄食 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较低的配合饲料等植物性食源, 稀释了拟穴青蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[36, 37]。

饲料以外的其他食物来源的贡献率是38.8%, 说明稻田的天然饵料对其有一定的补充作用。青蟹在植物性食源和动物性食源的偏好上更偏向前者, 在水稻-中华绒螯蟹共作系统^[20]和水稻-克氏原螯虾系统中也有发现^[38]类似现象, 这可能是因为蟹类更偏好摄食生境中食物丰度高、易获取的种类^[39], 稻田中植物性食源的多样性和丰度均较高, 这增加了其被蟹类摄食的几率^[40]。在植物性食源中, 青蟹摄食稗草和千金子更多, 二者是水稻种植过程中常见的杂草, 因此耐盐碱水稻-青蟹综合种养对于生态防治稻田内杂草可能具有一定作用。

综上所述, 本研究通过碳氮稳定同位素方法探明了耐盐碱水稻-拟穴青蟹共作系统中青蟹的食物来源, 配合饲料是青蟹食物中占比最大的成分, 平均贡献率为 $(61.2\pm 3.8)\%$, 稗草和千金子的贡献率分别为 $(8.3\pm 5.2)\%$ 和 $(8.8\pm 6.1)\%$ 。需要注意的是, 目前对耐盐碱水稻-青蟹综合种养系统中青蟹食物来源的研究尚未见报道, 因此本研究综合了野生青蟹^[35]和中华绒螯蟹、克氏原螯虾稻田综合种养食物来源^[20, 38]的研究结果及实验稻田的实际情况, 选取了潜在青蟹食物来源: 例如, 本研究中排除了野外条件下对青蟹食物贡献较高但稻田环境中缺乏的鱼类、双壳贝类、虾类、多毛类等, 并结合了稻田条件下饲料和植物性食源对甲壳动物贡献率较高的特点, 尽可能筛选青蟹的主要食物贡献者。但受到客观条件限制, 研究仍然无法覆盖青蟹所有潜在食物来源, 因此本研究相关食物源的贡献可能高估, 未来研究需要进一步对青蟹食物来源进行细化分析。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ma H, Ma C, Li X, *et al.* The complete mitochondrial genome sequence and gene organization of the mud crab (*Scylla paramamosain*) with phylogenetic consideration [J]. *Gene*, 2013, **519**(1): 120-127.
- [2] Jie Y K, Cheng C H, Wang L C, *et al.* Hypoxia-induced oxidative stress and transcriptome changes in the mud crab (*Scylla paramamosain*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2021(245): 109039.
- [3] Shen Y, Lai Q. Present status of mangrove crab (*Scylla serrata* (Forskall)) culture in China [J]. *NAGA: the ICLARM Quarterly*, 1994: January 28-29.
- [4] Hu Y Y, Tan Y N, Liu X L, *et al.* Problems and suggestions for industrialization development of saline-alkali tolerant rice in China [J]. *Hybrid Rice*, 2023, **38**(5): 1-5.
- [5] Yan Z L, Lin R M, Niu J Y, *et al.* Current status and perspectives of rice-crab production technique research in China [J]. *North Rice*, 2008, **38**(2): 5-8+27. [闫志利, 林瑞敏, 牛俊义, 等. 我国稻蟹共作技术研究的现状与前景展望 [J]. 北方水稻, 2008, **38**(2): 5-8+27.]
- [6] An H, Liu M D, Wang H X, *et al.* Effects of different rice-crab production models on rice-crab yield and quality [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, **26**(3): 581-586. [安辉, 刘鸣达, 王厚鑫, 等. 不同稻蟹生产模式对稻蟹产量和稻米品质的影响 [J]. 核农学报, 2012, **26**(3): 581-586.]
- [7] Miao W, Liu J M, Zhang J, *et al.* Effects of rice-crab coculture on field ecological environment and rice growth: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(8): 2785. [苗微, 刘佳敏, 张佳, 等. 稻蟹共作对田间生态环境与水稻生长的影响研究进展 [J]. 生态学杂志, 2020, **39**(8): 2785.]
- [8] Liu X, Liu L, Fang W, *et al.* Domestication method for adapting *Scylla paramamosain* seedlings to saline-alkali soil water area culture: CN111436391B [P]. 2022-03-04. [刘晓, 刘磊, 方伟, 等. 一种使拟穴青蟹苗种适应盐碱地水域养殖的驯化方法: CN111436391B [P]. 2022-03-04.]
- [9] Zhou D P, Liu L, Fu Y Y, *et al.* Analysis on growth and economic benefit of *Scylla paramamosain* under different polyculture patterns in the Yellow River Delta [J]. *Hebei Fisheries*, 2023(1): 22-26. [周冬平, 刘磊, 付媛媛, 等. 黄河三角洲地区不同混养模式下拟穴青蟹生长与经济效益分析 [J]. 河北渔业, 2023(1): 22-26.]
- [10] Wu Q Y, Wang C L, Wang H, *et al.* Analysis of "blue crab-sea rice" co-cropping technology [J]. *Scientific Fish Farming*, 2020(10): 63-65. [吴清洋, 王春琳, 王欢, 等. "青蟹—海水稻"共作技术探析 [J]. 科学养鱼, 2020(10): 63-65.]
- [11] Olsson K, Stenroth P, Nyström P, *et al.* Invasions and niche width: does niche width of an introduced crayfish differ from a native crayfish [J]? *Freshwater Biology*, 2009, **54**(8): 1731-1740.
- [12] Jackson M C, Donohue I, Jackson A L, *et al.* Population-level metrics of trophic structure based on stable isotopes and their application to invasion ecology [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(2): e31757.
- [13] Paloma A, Angel B. The trophic ecology of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in Mediterranean aquatic ecosystems: a stable isotope study [J]. *Limnetica*, 2013(32): 121-138.
- [14] Hobson K A, Welch H E. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992(84): 9-18.
- [15] Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age [J]. *Geochimica et Cosmochimica*

- Acta*, 1984, **48**(5): 1135-1140.
- [16] Goericke R, Fry B. Variations of marine plankton $\delta^{13}\text{C}$ with latitude, temperature, and dissolved CO_2 in the world ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(1): 85-90.
- [17] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, *et al.* Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure [J]? *Ecology*, 2007, **88**(1): 42-48.
- [18] Yao H, Wang H, Tang L, *et al.* Method for improving survival rate of crab seedlings of *Scylla paramamosain* through desalination: CN110463638A [P]. 2019-11-19. [姚宏志, 王欢, 唐蕾, 等. 一种有效提高拟穴青蟹蟹苗淡化成活率的方法: CN110463638A [P]. 2019-11-19.]
- [19] Ni M, Yuan J, Zhang L, *et al.* In-situ and ex-situ purification effect of ecological ponds of *Euryale ferox* Salisb on shrimp aquaculture [J]. *Aquaculture*, 2021(540): 736678.
- [20] Miao J, Liu F, Yan F J, *et al.* Analysis of food sources of *Eriocheir sinensis* in rice-crab integrated ecosystem based on stable isotopes in saline-alkali land of the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(6): 1489-1496. [苗静, 刘峰, 闫法军, 等. 基于稳定同位素的黄河三角洲盐碱地稻蟹种养系统中中华绒螯蟹食物源分析 [J]. 应用生态学报, 2022, **33**(6): 1489-1496.]
- [21] Lv D F, Wang W, Ma X Z, *et al.* The effect of stocking density of Chinese mitten crab on yields of rice and crab in rice-crab culture system [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, **49**(7): 1677-1680. [吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生系统河蟹放养密度对水稻和河蟹的影响 [J]. 湖北农业科学, 2010, **49**(7): 1677-1680.]
- [22] Sun W T, Sun F Y, Gong L, *et al.* Effect of single basal application of fertilizers on the yield of rice and crab in rice-crab symbiosis system [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(2): 429-434. [孙文涛, 孙富余, 宫亮, 等. 一次性施肥对稻田蟹及水稻产量的影响 [J]. 土壤通报, 2012, **43**(2): 429-434.]
- [23] Sun W T, Zhang Q Y, Ma X Z, *et al.* A study on effects of different crab stocking density on water environment and rice yield [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, **23**(3): 366-373. [孙文通, 张庆阳, 马旭洲, 等. 不同河蟹放养密度对养蟹稻田水环境及水稻产量影响的研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2014, **23**(3): 366-373.]
- [24] Wei H H, Zhang X, Zhu W, *et al.* Effects of salinity stress on grain-filling characteristics and yield of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, **50**(3): 734-746. [韦还和, 张翔, 朱旺, 等. 盐胁迫对水稻籽粒灌浆特性及产量形成的影响 [J]. 作物学报, 2024, **50**(3): 734-746.]
- [25] You C H, Han Y L, Wu Q Y, *et al.* The improvement effects of *Gracilaria tenuistipitata* on water quality in crab (*Scylla paramamosain*) pond with a semi-closed culture mode [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, **28**(14): 138-143. [游翠红, 韩耀龙, 吴清洋, 等. 细基江蒿对半封闭式拟穴青蟹养殖池塘水质的改善作用 [J]. 中国农学通报, 2012, **28**(14): 138-143.]
- [26] Ji Z, Li R, Wang C, *et al.* Effect of long-term low-salinity culture on the survival, growth, and nutrient composition of mud crab *Scylla paramamosain* [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, **21**(1): 179-185.
- [27] Zhai Z K, Zhao M, Wei Y S, *et al.* The list of C4 plant in China [J]. *Shanxi Forest Science and Technology*, 2020, **48**(5): 71-89. [翟增康, 赵珉, 魏永胜, 等. 中国C4植物名录 [J]. 陕西林业科技, 2020, **48**(5): 71-89.]
- [28] Wang S, He X H. Plants with C₃ and C₄ photosynthetic pathway in Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 1991(2): 69-75. [王松, 何新华. 云南的C₃和C₄植物 [J]. 云南师范大学学报, 1991(2): 69-75.]
- [29] Bardonnet A, Riera P. Feeding of glass eels (*Anguilla anguilla*) in the course of their estuarine migration: new insights from stable isotope analysis [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**(1/2): 201-209.
- [30] Hansson S, Hobbie J E, Elmgren R, *et al.* The stable nitrogen isotope ratio as a marker of food-web interactions and fish migration [J]. *Ecology*, 1997, **78**(7): 2249.
- [31] Yang G H, Sun X L, Hou X Q, *et al.* Measurement of the trophic level of fish in a coral reef ecosystem using stable isotopes [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, **19**(1): 105-115. [杨国欢, 孙省利, 侯秀琼, 等. 基于稳定同位素方法的珊瑚礁鱼类营养层次研究 [J]. 中国水产科学, 2012, **19**(1): 105-115.]
- [32] Guo K, Zhao W, Li W, *et al.* Food web structure and trophic levels in polyculture rice-crab fields [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, **33**(3): 735-740.
- [33] Huang G Q, Cao S H, Liu X J, *et al.* A preliminary study on enrichment of stable isotope from diets by mud crab (*Scylla paramamosain*) [J]. *South China Fisheries Science*, 2021, **17**(3): 19-26. [黄国强, 曹素会, 刘旭佳, 等. 拟穴青蟹对饵料中稳定同位素富集效应的初步研究 [J]. 南方水产科学, 2021, **17**(3): 19-26.]
- [34] Li B, Wang Z J, Jin L, *et al.* Study on diet shift of *Erythrulter mongolicus mongolicus* with stable isotope technology [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, **35**(9): 1419-1425. [李斌, 王志坚, 金丽, 等. 蒙古鲇食性转变的稳定性同位素研究 [J]. 水产学报, 2011, **35**(9): 1419-1425.]
- [35] Song J D. Analysis of food source of mud crab (*Scylla paramamosain*) in Beibu Gulf and effect of different baits on its growth [D]. Jinan: Shandong University, 2022: 26-28. [宋建达. 北部湾拟穴青蟹食源分析及摄食不同饵料对其生长的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2022: 26-28.]
- [36] Li C, Cheng Y X, Guan Q Z, *et al.* Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(11): 1778-1786. [李聪, 成永旭, 管勤壮, 等. 用

稳定性同位素技术分析稻——虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响 [J]. 水产学报, 2018, 42(11): 1778-1786.]

- [37] Zeng Q F, Gu X H, Mao Z G, *et al.* Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 253-259. [曾庆飞, 谷孝鸿, 毛志刚, 等. 同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织N同位素转化率的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(4): 253-259.]
- [38] He M, Liu F, Wang F. Quantitative analysis of density dependent resource utilization, cannibalism, and competi-

tion of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in rice-crayfish cocultures without supplementary food [J]. *Aquaculture*, 2021(543): 736966.

- [39] Cannicci S, Ritossa S, Ruwa R K, *et al.* Tree fidelity and hole fidelity in the tree crab *Sesarma leptosoma*, (Decapoda, Grapsidae) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1996, 196 (1-2): 299-311.
- [40] Geiger W, Otero M, Alcorlo P. Feeding preferences and food selection of the red swamp crayfish *Procambarus clarkii*, in habitats differing in food item diversity [J]. *Crustaceana*, 2004, 77(4): 435-453.

ANALYSIS OF THE FOOD SOURCES OF MUD CRABS (*SCYLLA PARAMAMOSAIN*) IN THE SALT ALKALI TOLERANT RICE AND MUD CRABS CO-CULTURE SYSTEM

ZHENG Chun-Chun^{1,2}, ZHOU Hou-Jie^{1,2}, SHI Ce^{1,2}, WANG Chun-Lin^{1,2}, MU Chang-Kao^{1,2},
YE Yang-Fang^{1,2}, LI Rong-Hua^{1,2}, WU Qing-Yang^{1,2}, LIU Hai-Juan³, WANG Xiao-Peng^{1,2},
ZHOU Yue-Yue^{1,2} and CHEN Shu-Jian^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center for Zhejiang Marine High-Efficiency and Healthy Aquaculture, Key Laboratory of Green Mariculture of Ministry of Agriculture and Rural, Key Laboratory of Aquacultural Biotechnology of Chinese Ministry of Education, School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China; 2. Research Academy of Sanmen Mud Crab Industrial Technology, Taizhou 317109, China; 3. Guangxi Institute of Oceanology Company Limited, Beihai 536000, China)

Abstract: The mud crab (*Scylla paramamosain*) is a marine species of significant economic value, renowned for its delicious flavor, strong adaptability, and rapid growth. As a euryhaline species, it demonstrates good tolerance to salinity and alkalinity after domestication. Salt-tolerant rice, also known as seawater rice, can grow in saline-alkaline soil and is characterized by its resistance to salt, alkali, flood, lodging, and pest. The integrated farming of salt-tolerant rice and mud crab, a new model that has emerged in recent years, enhances the economic output per unit area of paddy fields. In order to explore the food source of mud crabs in the salt alkali tolerant rice and mud crabs co-culture system, this study released mud crabs into a salt alkali-tolerant rice field at a density of 0.6 individuals per square meter. After a two-month breeding experiment, the food sources of mud crabs within this ecosystem were analyzed using carbon and nitrogen stable isotope technology. The research results showed that the water quality in the paddy field was promising. The mud crabs exhibited a specific growth rate of $(2.71 \pm 0.27)\%/d$ and a survival rate of $(14.26 \pm 4.85)\%$, with mud crab yield at (116.30 ± 39.59) kg/ha and rice yield at 3332.25 kg/ha. The provision of compound feed to the crabs did not adversely affect water quality. In terms of isotopic composition, mud crabs displayed $\delta^{13}C$ values of $(-21.55 \pm 0.90)\%$ and $\delta^{15}N$ values of $(9.96 \pm 0.40)\%$. The potential food sources exhibited a range of $\delta^{13}C$ values from $(-30.51 \pm 0.25)\%$ to $(-13.45 \pm 0.15)\%$. Among these sources, *Alternanthera philoxeroides* exhibited the lowest $\delta^{13}C$ value at $(-30.51 \pm 0.25)\%$, followed by *Oryza sativa* at $(-28.73 \pm 0.73)\%$, while *Echinochloa crus-galli* exhibited the highest $\delta^{13}C$ value at $(-13.45 \pm 0.15)\%$. Similarly, the potential food sources displayed $\delta^{15}N$ values ranging from $(5.97 \pm 0.13)\%$ to $(11.38 \pm 0.11)\%$, with compound feed recording the lowest $\delta^{15}N$ value at $(5.97 \pm 0.13)\%$ and flying insects the highest at $(11.38 \pm 0.11)\%$. The study found that compound feed constituted the primary dietary component for mud crabs, contributing $(61.2 \pm 3.8)\%$ to their diet. This was followed by contributions from *Echinochloa crus-galli* and *Leptochloa chinensis* at rates of $(8.3 \pm 5.2)\%$ and $(8.8 \pm 6.1)\%$, respectively, while flying insects contributed the least, at only $(0.9 \pm 1.4)\%$. In conclusion, the study suggests that mud crabs thrive in salt alkali-tolerant rice fields, with compound feed emerging as a significant food source for them within this environment. Additionally, plant-based food sources play a crucial role in the diet of mud crabs in such ecosystems.

Key words: Salt alkali tolerant rice; Stable isotopes; Feeding habits; Rice-crab coculture system; *Scylla paramamosain*