

文献著录格式：李久国，叶春宇，陈丽芝，等. 4种不同青蟹养殖模式的生命周期评价 [J]. 浙江农业科学, 2023, 64 (6): 1375-1379.
DOI: 10.16178/j.issn.0528-9017.20221066

4种不同青蟹养殖模式的生命周期评价

李久国^a, 叶春宇^a, 陈丽芝^a, 王春琳^a, 母昌考^a, 叶央芳^a, 史策^{b*}

(宁波大学 a 海洋学院, b 东海战略研究院, 浙江 宁波 315832)

摘要：利用生命周期评价法量化了国内典型的4种青蟹养殖模式（工厂化循环水单体养殖、稻蟹综合种养、内陆盐碱地鱼虾蟹养殖、沿海池塘虾蟹贝养殖）的资源消耗与污染物排放清单，以获得1 kg青蟹养殖增重为评价的功能单位，分析了能源消耗、全球变暖潜势、酸化潜势、富营养化潜势4种环境影响类型。结果表明，工厂化、稻蟹、盐碱地、虾蟹贝池塘养殖模式的环境影响综合指数分别为 2.31×10^{-3} 、 9.96×10^{-4} 、 9.44×10^{-3} 、 3.24×10^{-3} 。我国青蟹养殖模式的环境性能从高到低依次为稻蟹综合种养>工厂化循环水单体养殖>沿海池塘虾蟹贝养殖>内陆盐碱地鱼虾蟹养殖。

关键词：青蟹；养殖模式；生命周期评价；生态农业

中图分类号：S969.3 **文献标志码：**A **文章编号：**0528-9017(2023)06-1375-05

拟穴青蟹 (*Scylla paramamosain*) 简称青蟹，隶属甲壳纲十足目梭子蟹科青蟹属，是我国具有重要经济价值的海洋渔业资源和海水养殖品种之一，广泛分布于我国长江口以及南方海域^[1]。浙江宁波、台州沿海的青蟹以生长速度快、肉质鲜美、营养价值高等特点而深受消费者欢迎^[2]。生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是对一个产品系统的生命周期中物质能量输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价，是目前一种被广泛使用的环境影响评价工具^[3]。通过LCA的方法，建立青蟹养殖系统的生命周期影响评价体系，从能源消耗、全球变暖潜势、酸化潜势和富营养化潜势4种环境影响类型方面对青蟹的工厂化循环水单体养殖、稻蟹综合种养、内陆盐碱地鱼虾蟹养殖、沿海池塘虾蟹贝养殖进行了生命周期资源消耗与污染物排放清单分析^[4]。

1 材料与方法

1.1 研究地点与数据收集

研究选取浙江省沿海区域的台州市蓝湾养殖场和宁波市的西周农场养殖基地、蓝尚海洋科技养殖场以及河南盐津县的海泽情水产养殖基地进行。采用实地调研和查阅文献相结合的方法，所有物质和

能量的投入以及相关生产数据由养殖从业者提供，数据处理及环境生命周期建模采用 simapro 9.0 生命周期分析软件进行。

台州市蓝湾养殖场为工厂化循环水单体养殖模式，简称工厂化养殖。此模式使用大棚+室内单体养殖盒搭配微滤机、蛋白分离器等水处理装置进行暂养育肥。地面铺设10 cm厚的水泥，四周用钢筋水泥红砖铺设，顶部加盖遮阳棚，养殖系统安置在水泥地上。底部设有长约10 m，宽2 m，深2 m的长方形蓄水池30个。高温时采用喷淋方式降温。每天投喂饲料2次。该模式因为分隔养殖，能够杜绝海水蟹相残导致的死亡。生产期间667 m²投放大小50~100 g亚成体，经过15~30 d暂养育肥后出售（图1）。

宁波市西周农场养殖基地为稻蟹综合种养殖模式，简称稻蟹养殖。本研究中该模式使用水稻田进行稻蟹综合种养，稻田种质品种为甬优1540，青蟹为唯一养殖品种。养殖周期为4个月，稻田外围约有10%比例环沟，环沟水深1.5 m左右，内设纳米盘增氧。稻田水稻为单季稻晚稻，经人工育秧后，6月下旬插秧，插秧后即投放20 g左右蟹苗，每667 m²放养200只左右，10月中下旬水稻收获前捕捞青蟹，捕获规格为200~300 g（图1）。

收稿日期：2022-11-16

基金项目：浙江省新型重点专业智库—宁波大学东海战略研究院 (DHJJ22YB2)；三门县政府采购合同指引（服务）项目：水稻青蟹综合种养模式示范（浙建科三-2022-004号）

作者简介：李久国（1997—），男，安徽阜阳人，在读硕士研究生，主要研究方向为生态经济学，E-mail: a2791655361@163.com。

通信作者：史策（1985—），男，辽宁锦州人，副教授，主要研究方向为水产养殖生态，E-mail: shice3210@126.com。



A—工厂化循环水单体养殖；B—稻蟹综合种养；C—内陆盐碱地鱼虾蟹养殖；D—沿海池塘虾蟹贝养殖。

图1 青蟹的不同养殖模式

河南盐津县的海泽情水产养殖基地为内陆盐碱地鱼虾蟹养殖模式，简称盐碱地养殖。该模式是利用黄河流域盐碱地，抽取地下盐碱水进行池塘养殖的生产模式。盐碱地养殖处水体pH值较高，池塘水深1.5 m，每667 m²放养20 g左右的青蟹约600只，1 cm左右的南美白对虾苗5 000尾，2 cm的罗非鱼2 000尾。养殖期间采用水车式增氧机，养殖用水由水泵抽取地下水至养殖池。秋季收获青蟹规格为150~300 g（图1）。

宁波市蓝尚海洋科技养殖场为沿海池塘虾蟹贝养殖模式，简称虾蟹贝养殖。该模式常见于东部沿海地区，利用自然潮汐对池塘进排水。池塘水深为1.0~1.5 m，每667 m²放养20 g左右的青蟹大苗300只，1 cm的日本对虾苗10 000尾，缢蛏3.5万粒（4 000粒·kg⁻¹）。采用水车式增氧机，进行立体增氧方式养殖。养殖期间使用配合饲料和小杂鱼，分早晚投喂2次。秋季青蟹收获规格为200~300 g（图1）。

1.2 生命周期评价目的和范围的确定

为比较我国4种青蟹养殖系统在能源消耗和环境影响方面的差异，以获得1 kg青蟹养殖增重为评价的功能单位。评价范围从青蟹幼苗到养成至养殖场大门口，评价对象为场地建造材料、饲料投喂量、能源消耗以及废弃物排放。在养殖场地建造和使用过程中所使用的材料，如蟹公寓设备、微滤机、蛋白分离器、水车式增氧机、围网、输水管等，按照其材料性质划分为混凝土、钢材、聚乙烯、聚氯乙烯和砖块等^[5]。能源包括用电，排放的废物包括CO₂、CO、NO_x、SO₂、COD、CH₄、N

和P。

1.3 影响评价的步骤

影响评价是研究系统的资源消耗和污物排放及其对外部环境的影响，一般包括分类和特征化、标准化和加权评估3个步骤。

1.3.1 分类和特征化

特征化是对资源消耗和环境排放清单进行分类计算并计算环境影响潜力的过程。本研究仅考虑青蟹养殖生命周期的4种环境影响类型（能源消耗、全球变暖、环境酸化、富营养化）^[6]。

1.3.2 标准化和加权评估

各种环境影响潜值可以根据公式（1）计算：

$$E_{p(x)} = \sum E_{p(x)i} = \sum [Q_{(x)i} E_{F(x)i}] \quad (1)$$

式中： $E_{p(x)}$ 为产品系统对第x种环境的影响潜值； $E_{p(x)i}$ 为第i种排放物质对第x种环境的影响潜值； $Q_{(x)i}$ 为第i种物质排放量； $E_{F(x)i}$ 为第i种物质对第x种潜在环境影响的当量因子当量系数见表1。

表1 环境影响类型及排放物质的当量系数

环境影响类型	排放物质	当量系数
全球气候变暖	CO ₂	1.00
	CO	2.00
	CH ₄	21.00
	N ₂ O	310.00
环境酸化	SO ₂	1.00
	NH ₃	1.88
	NO _x	0.70
	SO _x	1.00
富营养化	PO ₄ ³⁻	1.00
	Ptot	3.06
	NO _x	0.13
	NO ₃ ⁻	0.42
	NH ₃	0.33

采用2000年世界人均环境影响潜力作为环境影响基准进行标准化处理^[7]，加权评估采用王明新等^[8]研究中通过专家组评议设置的权重系数，标准化基准值和权重见表2。标准化和权重后产品系统的环境影响值可以根据公式（2）计算：

$$I = \sum W_x [E_{p(x)} / E_{p(2000)}] \quad (2)$$

式中I为产品系统环境影响值；W_x为第x种潜在环境影响的权重； $E_{p(x)}$ 为产品系统对第x种潜在环境影响潜值； $E_{p(2000)}$ 为2000年世界人均环境影响基准值。

表 2 环境影响指数的基准值与权重

环境影响类型	标准化基准值/(kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	权重
能源消耗	2 590 457	0.15
全球变暖潜势	6 869	0.12
酸化潜势	52.26	0.14
富营养化潜势	1.88	0.12

2 结果与分析

2.1 生命周期清单分析

以获得 1 kg 青蟹养殖增重为评价的功能单

元, 系统投入数据收集由现场调研和水产养殖场提供。物料衡算法是根据投喂饵料质量产生的氮磷排放量和生物体的生长质量所吸收到的氮磷含量计算, 根据第 1 次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册^[9]相关量求得每增加 1 kg 青蟹养殖增重的氮磷排放量。各青蟹养殖总磷和总氮的排放量采取物料衡算法计算, 再结合相关文献进行修正。4 种养殖模式的输入和输出^[10-13]见表 3。

表 3 青蟹养殖模式生命周期的输入与输出

养殖模式	输入							输出		
	混凝土/(kg·kg ⁻¹)	钢材/(kg·kg ⁻¹)	聚氯乙烯/(kg·kg ⁻¹)	聚乙烯/(kg·kg ⁻¹)	红砖/(kg·kg ⁻¹)	饲料/(kg·kg ⁻¹)	电能/(kw·h·kg ⁻¹)	产出青蟹/kg	N 排放/(g·kg ⁻¹)	P 排放/(g·kg ⁻¹)
工厂化养殖	22.3	0.65	0.71	1.15	0.54	2.25	4.34	1	8.54	0.45
稻蟹养殖	0	0	0	0.05	0	2.60	1.75	1	0.16	0.14
盐碱地养殖	0	0	0	0.18	0	3.20	2.95	1	71.00	32.00
虾蟹贝养殖	0	0	0	0.14	0	3.08	3.11	1	36.00	5.20

2.2 特征化结果

通过 simapro 9.0 软件建模计算得到 4 种养殖系

统中每增产 1 kg 青蟹质量的生命周期评价 (LCA) 计算特征化结果和各阶段的贡献率 (表 4)。

表 4 环境影响的特征化结果

养殖模式	项目	能源消耗		全球变暖潜势		酸化潜势		富营养化潜势	
		能源/MJ	贡献率/%	CO ₂ /kg	贡献率/%	SO ₂ /kg	贡献率/%	PO ₄ ³⁻ /kg	贡献率/%
工厂化养殖	基建材料	1.56×10 ²	73.61	1.10×10 ¹	59.59	3.13×10 ⁻²	48.07	9.25×10 ⁻³	32.82
	饲料	1.51×10 ¹	7.10	2.86	15.43	1.31×10 ⁻²	20.50	9.24×10 ⁻³	32.78
	能源	4.09×10 ¹	19.29	4.63	24.98	2.07×10 ⁻²	31.90	4.73×10 ⁻³	16.79
	其他	0	0	0	0	0	0	4.96×10 ⁻³	17.61
	合计	2.12×10 ²	100	1.85×10 ¹	100	6.50×10 ⁻²	100	2.82×10 ⁻²	100
稻蟹养殖	基建材料	3.37	9.03	1.04×10 ⁻¹	1.97	3.51×10 ⁻⁴	1.47	3.34×10 ⁻⁵	0.25
	饲料	1.74×10 ¹	46.68	3.3	62.63	1.51×10 ⁻²	63.52	1.07×10 ⁻²	81.39
	能源	1.65×10 ¹	44.29	1.87	35.40	8.35×10 ⁻³	35.01	1.91×10 ⁻³	14.55
	其他	0	0	0	0	0	0	4.98×10 ⁻⁴	3.80
	合计	3.73×10 ¹	100	5.28	100	2.38×10 ⁻²	100	1.31×10 ⁻²	100
盐碱地养殖	基建材料	1.55×10 ¹	23.94	4.78×10 ⁻¹	6.22	1.61×10 ⁻³	4.70	1.53×10 ⁻⁴	0.11
	饲料	2.14×10 ¹	33.09	4.07	52.87	1.86×10 ⁻²	54.32	1.31×10 ⁻²	9.11
	能源	2.78×10 ¹	42.97	3.15	40.91	1.41×10 ⁻²	40.98	3.22×10 ⁻³	2.23
	其他	0	0	0	0	0	0	1.28×10 ⁻¹	88.55
	合计	6.48×10 ¹	100	7.69	100	3.43×10 ⁻²	100	1.44×10 ⁻¹	100
虾蟹贝养殖	基建材料	9.44	15.88	2.91×10 ⁻¹	3.87	9.82×10 ⁻⁴	2.91	9.34×10 ⁻⁵	0.20
	饲料	2.06×10 ¹	34.73	3.91	52.03	1.79×10 ⁻²	53.16	1.27×10 ⁻²	26.83
	能源	2.93×10 ¹	49.39	3.32	44.10	1.48×10 ⁻²	43.93	3.39×10 ⁻³	7.19
	其他	0	0	0	0	0	0	3.10×10 ⁻²	65.78
	合计	5.94×10 ¹	100	7.52	100	3.37×10 ⁻²	100	4.72×10 ⁻²	100

2.3 标准化和加权评估结果

经过标准化处理和加权分析, 得到 4 个环境影响类型的潜力, 将各环境影响类型能源消耗、全球变暖潜势、酸化潜势、富营养化潜势的潜力大小进行比较, 各环境影响类型的潜力如表 5 所示。

工厂化养殖环境影响指数分别为 1.23×10^{-5} 、 3.24×10^{-4} 、 1.74×10^{-4} 、 1.80×10^{-3} 。稻蟹养殖环境影响指数分别为 2.16×10^{-6} 、 9.22×10^{-5} 、 6.39×10^{-5} 、 8.68×10^{-4} 。盐碱地养殖环境影响指数分别为 3.75×10^{-6} 、 1.34×10^{-4} 、 9.19×10^{-5} 、 9.21×10^{-3} 。

表5 青蟹生命周期环境影响潜值标准化和加权分析

环境影响 类型	加权后影响指数			
	工厂化养殖	稻蟹养殖	盐碱地养殖	虾蟹贝养殖
能源消耗	1.23×10^{-5}	2.16×10^{-6}	3.75×10^{-6}	3.44×10^{-6}
全球变暖潜势	3.24×10^{-4}	9.22×10^{-5}	1.34×10^{-4}	1.31×10^{-4}
酸化潜势	1.74×10^{-4}	6.39×10^{-5}	9.19×10^{-5}	9.04×10^{-5}
富营养化潜势	1.80×10^{-3}	8.68×10^{-4}	9.21×10^{-3}	3.01×10^{-3}
合计	2.31×10^{-3}	9.96×10^{-4}	9.44×10^{-3}	3.24×10^{-3}

虾蟹贝养殖环境影响指数分别为 3.44×10^{-6} 、 1.31×10^{-4} 、 9.04×10^{-5} 、 3.01×10^{-3} 。工厂化养殖、稻蟹养殖、盐碱地养殖、虾蟹贝养殖的环境影响总综合指数分别为 2.31×10^{-3} 、 9.96×10^{-4} 、 9.44×10^{-3} 、 3.24×10^{-3} 。

3 结论与讨论

由表3、表4和表5可知，4种青蟹养殖模式的生命周期体系中最主要的潜在环境影响类型是富营养化潜势和全球变暖潜势。青蟹养殖模式中的环境性能从高到低依次为稻蟹综合种养>工厂化循环水单体养殖>沿海池塘虾蟹贝养殖>内陆盐碱地鱼虾蟹养殖。但需要注意的是研究只是从青蟹产出的角度探讨了几种青蟹养殖模式的环境效应，而非从系统总体产出能力计算。

在能源消耗环境影响类型中，工厂化养殖能源消耗贡献率最高的是基建材料73.61%，而稻蟹养殖、盐碱地养殖、虾蟹贝养殖中电能和饲料能源消耗占比最高，能源消耗贡献率均在45%波动。工厂化养殖中采用循环水，前期投入中消耗了大量基建材料。在高密度条件下也投入了较多的饲料和电能，使得能源消耗指数远高于稻蟹综合种养、盐碱地养殖、虾蟹贝养殖电能消耗引起的环境指数。稻蟹养殖中电能消耗主要是采用水泵抽水供应水稻生长和调节水质盐度利于青蟹生长。盐碱地养殖和虾蟹贝养殖主要用于供氧和改善水质。提高饲料利用率和增加清洁电能使用是降低各种环境影响潜值的关键点，也是改善环境污染程度，促进青蟹养殖模式绿色可持续发展的重要途径。

在全球变暖潜势环境影响类型中，温室气体是造成全球变暖潜势的主要影响因素，青蟹养殖过程中温室气体排放源主要来自饲料投喂和电能消耗。工厂化养殖基建材料产生的变暖潜势贡献率为59.59%，高于能源使用产生的变暖潜势24.98%。而稻蟹养殖、盐碱地养殖、虾蟹贝养殖中各养殖模式，饲料投喂产生的变暖潜势都高于能源使用产生

的变暖潜势，各变暖潜势贡献率均在50%以上，这表明饲料投喂量是引起全球变暖潜势的主要因素。在表4中，工厂化养殖和稻蟹养殖饲料消耗都比较少，由饲料引起的全球变暖潜势也低于其盐碱地和虾蟹贝养殖模式，这主要是由于工厂化循环水养殖模式中蟹类的摄食情况便于观察，能够及时调整饲料投喂量。稻田中富有多种螺类、昆虫、鱼类等可作为青蟹的生物饵料，在一定程度上也降低了饲料投入。因此，优化基建材料的投入使用将极大减少工厂化养殖中的温室气体排放，优化饲料投喂也能改善各养殖模式的温室气体排放。

在酸化潜势环境影响类型中，同上述能源消耗和全球变暖潜势环境影响相似，工厂化养殖中基建材料产生的酸化潜势贡献率48.07%，也高于该养殖饲料投喂和能源消耗产生的酸化潜势。通过调研河南盐津县的海泽情水产养殖基地得知，该盐碱地池塘养殖内水草生长，植物光合作用可吸收部分养殖活动造成的酸化潜势排放，但盐碱地养殖中 667 m^2 产青蟹(26 kg)、南美白对虾(134 kg)、罗非鱼(834 kg)和野生泥鳅(62 kg)、野生田螺混养，其生物量较高，且均为吃食性品种，因此，消耗较多的饲料。盐碱地、稻蟹和虾蟹贝养殖，都是由于饲料投喂造成 NH_3 的挥发过多，造成了较大的酸化潜势影响。

在富营养化潜势环境影响类型中，氮磷含量是造成富营养化潜势的主要影响因素。青蟹养殖过程中富营养化潜势的氮磷来源，主要与饲料投喂产生的氮磷排放量和养殖系统对氮磷吸收量有关。台州市蓝湾的工厂养殖中，由于采用蛋白分离器等水处理装置有效减少了氮磷排放量，因此，形成的富营养化潜势少于盐碱地和虾蟹贝养殖模式。在稻蟹养殖中，虽然饲料投喂导致了一定的氮磷输入，但稻蟹共生模式下，未投入人工化肥，饲料贡献率虽然高达81.39%，氮磷排放量却只有3.80%。因水稻吸收了大量的氮磷，极大减少该养殖的富营养化环境影响指数。通过调研宁波市蓝尚海洋科技养殖场得知，该虾蟹贝池塘养殖中 667 m^2 产青蟹(42 kg)、蛏子(325 kg)、日本对虾(32 kg)、野生脊尾白虾(5 kg)。在虾蟹贝池塘养殖中，滤食性贝类产量最高，为养殖系统的主产品。滤食性贝类滤食微藻，因此，将微藻吸收的大量营养盐转化为产品移出系统，减少了富营养化潜势。内陆盐碱地池塘养殖模式中，主产品南美白对虾、罗非鱼及青蟹均为吃食性种类，营养级较高，因此，提升了

富营养化潜势。与沿海虾蟹贝混养相比, 其养殖系统中缺乏滤食性贝类, 这导致系统中因饲料输入产生的氮磷难以转化为产品, 未来应考虑在内陆盐碱地池塘养殖模式中增加滤食性种类, 以增加营养盐回收比例。

参考文献:

- [1] 龚小敏, 许万涛, 骆其君. 坛紫菜筏架吊笼养殖青蟹试验 [J]. 科学养鱼, 2022 (1): 64-65.
- [2] 王福田, 向俊飞, 朱亚军, 等. 三种不同来源的养殖青蟹肌肉感官品质比较 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48 (8): 98-105, 112.
- [3] LISKA A, YANG H S, CASSMAN K, et al. Method for biofuel life cycle assessment: US20090326715 [P]. 2009-12-31.
- [4] 陈亮, 刘玫, 黄进. GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价原则与框架》国家标准解读 [J]. 标准科学, 2009 (2): 76-80.
- [5] 王国栋. 刺参陆基养殖系统的能值分析和生命周期评价 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [6] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 两种水稻生产方式的生命周期环境影响评价 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (9): 1992-1996.
- [7] SLEESWIJK A W, VAN OERS L F C M, GUINÉE J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000 [J]. Science of the Total Environment, 2008, 390 (1): 227-240.
- [8] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (5): 1127-1132.
- [9] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册-上册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [10] 王杰. 基于生命周期评价的大菱鲆水循环率研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [11] 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.
- [12] 钟全福. 罗非鱼为主多品种混养池塘氮磷收支 [J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39 (6): 48-53.
- [13] 张凯, 田相利, 董双林, 等. 三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和菲律宾蛤仔混养系统氮磷收支的研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45 (2): 44-53.

(责任编辑: 王新芳)