

doi: 10.7541/2023.2022.0329

白龙屿海洋牧场放养中华鲟幼鱼的潜在饵料资源及承载力估算

刘黄欣^{1,2} 冷小茜² 王谱渊^{2,3} 罗江² 仲嘉² 李君轶² 熊伟²
张立宁⁴ 王加新⁵ 王成和⁵ 杜浩^{1,2,3}

(1. 长江大学动物科学学院, 荆州 434025; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223; 3. 上海海洋大学, 上海 201306; 4. 浙江省海洋水产养殖研究所, 温州 325700; 5. 浙江东一海洋集团有限公司, 温州 325701)

摘要: 海洋保种是补充完善中华鲟(*Acipenser sinensis*)生活史, 实现陆海接力保种的重要举措, 为探究近海围栏是海洋牧场中华鲟幼鱼的潜在饵料资源及承载能力, 研究对浙江温州近海的白龙屿海洋牧场进行周年调查, 评估了海洋牧场中底栖动物及中下层生物资源量, 并通过放养中华鲟摄食生长状况和消化道内容物分析, 获得了海洋牧场中中华鲟幼鱼可摄食饵料种类, 同时估算了其最大资源承载力。结果表明, 白龙屿海洋牧场周年共采集到共47种饵料生物隶属于5门8纲, 其中底栖动物38种、中下层生物9种, 依据历史记录均为中华鲟可摄食种类; 根据消化道内容物实测分析, 放养中华鲟能够在海洋牧场中自主摄食, 验证其摄食了4门5纲共16种饵料生物, 其食物组成按相对重要性指数(IRI)大小排列: 甲壳纲(主要为虾蟹类)>腹足纲>鱼纲>瓣鳃纲>多毛纲, 摄食偏好按摄食选择系数大小排列: 甲壳纲>腹足纲>瓣鳃纲>多毛纲>鱼纲; 估算结果表明海域面积650亩的白龙屿海洋牧场中适合中华鲟摄食的饵料资源最大年产量约为818.389 kg, 仅靠这些天然饵料供给的情况下, 可供69尾中华鲟幼鲟正常生长发育。研究结果表明近海围栏式海洋牧场是中华鲟海洋保种的潜在模式, 下一步需要进一步研究人工补充天然饵料模式下如何提升海洋围栏保种的规模和效果, 为形成中华鲟陆海接力保种提供基础数据。

关键词: 海洋牧场; 饵料资源; 食物组成; 海洋保种; 中华鲟

中图分类号: S932.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)09-1488-09



中华鲟(*Acipenser sinensis*)是一种大型溯河产卵洄游性鱼类, 整个生命周期约95%以上的时间在海洋中度过^[1, 2]。近年来, 受人类活动的影响, 中华鲟野外自然种群规模急剧衰退, 在2017—2021年已连续5年未发生自然繁殖, 目前对中华鲟进行保护的方式主要为原位保护和迁地保护, 在原位保护实施困难的情况下, 迁地保护成为中华鲟物种延续的重要途径^[3]。全人工繁殖作为人工保种中最有效的措施已经获得了阶段性的突破^[4], 目前中华鲟人工保种均以淡水为主, 而全淡水养殖中华鲟海洋生活史的缺失可能是致使中华鲟成熟亲体体型偏小、性成熟比例偏低及繁殖后代患病率高的主要原因, 并成为制约自然群体延续的重要问题, 探索中华

鲟海洋保种模式成为迫切需求, 现已列入中华鲟拯救行动计划^[5-7]。

相比传统海水网箱保种, 近海围栏养殖保种是潜在可尝试的保种模式, 其具有养殖区域更大、水体通透性强、无底网和抗风浪能力强等特点。白龙屿围栏式海洋牧场位于东海近海, 东海海域在历史上是中华鲟重要的索饵场^[8], 是放养中华鲟理想场所。在半封闭的近海围栏养殖环境下, 因养殖区域较大、人类活动影响较小, 环境饵料资源成为了围栏中鱼类生存最重要的条件之一, 饵料资源的变动会对种群的数量动态乃至整个生态系统造成影响, 直接制约着鱼类的生长、发育及繁殖^[9-11], 对近海围栏中饵料资源量及其能放养中华鲟数量的

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1200304); 国家自然科学基金青年科学基金(32202940)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2021YFD1200304); National Natural Science Foundation Youth Science Foundation Project (32202940)]

作者简介: 刘黄欣(1997—), 男, 硕士研究生; 研究方向为中华鲟海水适应性行为研究。E-mail: liuhuangxin2@126.com

通信作者: 杜浩, 研究员; 主要从事濒危水生动物保护生物学研究。E-mail: duhao@yfi.ac.cn

研究, 是开展海洋保种的重要组成部分。海洋牧场放养中华鲟的潜在饵料资源量及承载力是影响其生长发育的关键因素之一, 但仅有少量研究^[12-14]描述了中华鲟在我国东南近海的洄游分布及食性, 对于近海围栏海洋保种模式下中华鲟的摄食生长情况及其环境承载能力的研究尚是空白。因此, 开展中华鲟潜在饵料资源及承载力的研究对中华鲟的海洋保种具有重要意义。

为评估白龙屿海洋牧场饵料资源状况及其放养中华鲟的潜在可能性, 本研究于2020—2021年进行了周年调查, 对白龙屿海洋牧场的中华鲟潜在饵料资源进行了评估, 同时开展了实验式放养, 通过对放养中华鲟进行周年监测并结合放养效果的方法, 综合评估海洋牧场的承载力, 为中华鲟近海围栏式保种模式探索提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验场地

本实验的研究场地是浙江东一海洋集团有限公司白龙屿生态海洋牧场(图1), 位于浙江省温州市洞头区鹿西乡, 地处东海近海海域, 是于白龙屿和鹿西乡东白村南侧之间建设东、西口两条栅栏式堤坝, 并在堤坝两侧安装生态保护网(网目约8 cm), 形成的一个海域面积达650亩, 水体体积达 $2.42 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的纯天然海洋牧场。在进行中华鲟试养实验前, 海洋围栏中放养了约20000尾大黄鱼(*Larimichthys crocea*), 实验期间没有投喂外源性饲料。

通过对水样和沉积物样品质量检测, 确定了实验区域底质类型为全泥质底质, 且符合国家海水、沉积物一类质量标准(表1)。

1.2 生物饵料资源调查方法

2020年9至2021年12月期间, 根据季度变化, 每

3个月对白龙屿海洋牧场资源底栖动物及中下层生物饵料资源开展1次采样调查, 全年共调查6次。

底栖动物 根据海洋牧场环境特点, 选定9个采样位点(图1), 采用 0.045 m^2 的抓斗式采泥器, 每个位点每次采样两次, 经过 0.5 mm 网筛过滤并用75%酒精对样品当场进行固定, 之后进行物种分类以及生物学测量。

中下层生物 有研究表明中华鲟更习惯捕食中下层生物, 本研究的捕捞网具主要为地笼网, 其对中下层生物的捕获效果最好^[14, 16, 17], 根据海洋牧场环境特点, 选定4个采集位点(图1), 采用网目为 20 mm 、每个单元为 $40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的地笼网, 每次布设100个单元长约 50 m 持续捕捞24h, 收取后对地笼内的所有渔获物进行种类鉴定、生物学测量和统计, 资源量的统计通过产量模型计算单位时间内捕捞努力量, 以实际捕捞面积的5倍作为单位面积的平均生物量^[15, 16]。

1.3 放养中华鲟摄食评估

放养实验鱼规格 实验鱼选用中国水产科学研究院长江水产研究所荆州太湖中华鲟繁育基地提供的全人工淡水繁殖的子二代幼鱼。将海水驯化后适应海水环境的300尾实验鱼(平均体重 7.48 kg , 平均体长 93.65 cm)运送至实验区域放养。

回捕方法 在回捕前通过Bio Sonics DT-X多功能回声探测器对放养中华鲟密集区域进行初步定

表1 海水、沉积物质量检测结果

Tab. 1 Quality test results of seawater and sediment

	类别Category	含量Content	质量标准Quality standard
沉积物质量 Sediment quality	有机碳 OC (%)	0.57 ± 0.02	<2
	石油类Petroleum (mg/kg)	27.032 ± 14.585	<500
	铜Cu (mg/kg)	33.57 ± 2.28	<35
	铅Pb (mg/kg)	32.43 ± 3.00	<60
	镉Cd (mg/kg)	0.16 ± 0.02	<0.5
	锌Zn (mg/kg)	112.11 ± 6.30	<150
海水水质 Seawater quality	铜Cu ($\mu\text{g/L}$)	未检出	<0.005
	铅Pb ($\mu\text{g/L}$)	未检出	<0.001
	镉Cd ($\mu\text{g/L}$)	未检出	<0.001
	锌Zn ($\mu\text{g/L}$)	未检出	<0.02
	化学需氧量COD (mg/L)	0.55 ± 0.14	<2
	硝酸盐氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	0.407 ± 0.014	<10
	亚硝酸盐氮 $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	0.0148 ± 0.0007	<0.02
	氨氮 $\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	0.028 ± 0.002	<0.04
	活性磷酸盐 Ortho-P (mg/L)	0.0138 ± 0.0007	<0.015

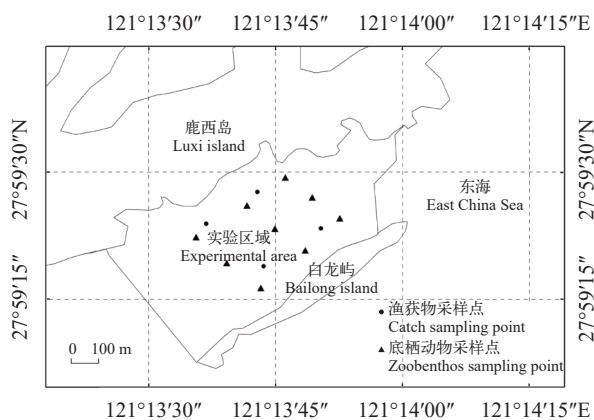


图1 实验区域及采样位点

Fig. 1 Experimental area and sampling points

位(未发表),于2021年5月在实验鱼密集区域布设特制大型网具(由两张大型拦河网组成)进行定点捕捞,持续72h。抽取回捕中华鲟5尾进行解剖采样分析。

潜在饵料种类判别 根据历史文献数据获取中华鲟摄食过的饵料生物种类,作为判断白龙屿海洋牧场中可供放养中华鲟摄食的潜在饵料种类的依据。

放养中华鲟摄食分析 通过对回捕的实验鱼进行生物学数据测量并解剖分析消化道内容物的方法,研究全人工淡水保种中华鲟在海洋牧场中的生长状况、自主摄食能力及主要摄食种类,综合分析放养中华鲟对海洋牧场环境的适应性。

1.4 数据分析

白龙屿海洋牧场承载力估算 有研究提出用平均生物量及P/B系数来估算生物生产力,P/B系数又称为周转率,是指在一定时间内种群或群落的生产力与平均生物量的比,该值与生物的营养级相关且会随温度的升高而升高,其数值存在一定误差但亦可作指示作用^[17-20]。本研究下中层生物与实验鱼营养级相近故年平均P/B系数计为1;历史数据显示东海大型底栖动物的年平均P/B系数为1.41^[22],本研究区域水深较浅实际温度偏高,故实际值偏高,底栖动物的年平均P/B系数计为2。通过计算出海洋牧场中华鲟潜在饵料的持续产量对其最大持续供饵能力进行估算,并假设本实验放养中华鲟能将潜在饵料资源充分利用,以此估算海洋牧场的理论最大承载力。最大持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)估算采用公式:

$$Y=0.5B \times C$$

式中, Y 为某种群或群落的最大持续产量; B 为某种群或群落的平均生物量; C 为P/B系数,是一定时间内某一种群或群落的生产力与平均生物量的比值。

白龙屿海洋牧场放养中华鲟的理论最大承载力估算采用公式:

$$N=Y/(G \times E)$$

式中, N 为理论可放养的中华鲟数量; Y 为MSY最大持续产量; G 为自然条件下鱼体的年增重量; E 为饵料系数。

统计分析方法 实验所有数据在Microsoft Excel中分析处理,对中下层生物及底栖动物生物学数据进行统计并进行定量分析,归纳其种类组成并计算生物量。物种优势度分析采用相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)进行判定,其公式为:

$$IRI=(N+W) \times F$$

式中, N 为某一种群的数量占总数量的百分比; W 为某一种类的质量占总质量的百分比; F 为某一种类出现的位点数占总位点数的百分比,食物组成分析则为摄食实验鱼的尾数占总尾数的百分比。

消化道内食物分析方法 在Microsoft Excel中分析处理,统计分析其数量、重量并进行归纳分类,以相对重要性指数(IRI)及摄食选择系数作为判断放养中华鲟摄食偏好的依据,摄食选择系数的计算采用公式:

$$E=r_i/p_i$$

式中, E 为选择系数; r_i 为食物 i 在消化道中的相对丰度; p_i 为食物 i 在环境中的相对丰度。 $E=1$ 表示无选择性; $E<1$ 表示无摄食偏好; $E>1$,表示有摄食偏好。

2 结果

2.1 白龙屿海洋牧场天然饵料种类组成及中华鲟潜在饵料资源判别

白龙屿海洋牧场底栖动物种类组成 2020—2021年在白龙屿海洋牧场内共采集到底栖动物38种(表2),隶属于4门6纲,其中多毛纲(Polychaeta)6种,寡毛纲(Oligochaeta)3种,腹足纲(Gastropoda)13种,瓣鳃纲(Lamellibranchia)6种,甲壳纲(Crustacea)5种,蛇尾纲(Ophiuroidea)1种,春秋两季采集到的种类最为丰富,其中腹足纲在全年的重量比例最高,占总量的40.53%,其次为瓣鳃纲及甲壳纲。因采集到的底栖动物总量较少,以各种类数量作为优势度判断依据,其中主要优势种为薄云母蛤(*Yoldin similis* Kuroda et Habe)、异足索沙蚕(*Lumbriconereis heteropoda*)、额刺裂虫(*Ehlersia cornuta*)和小荚蛭(*Siliqua minima*)。

白龙屿海洋牧场中下层生物种类组成 2020—2021年在海洋牧场中共采集到9种中下层渔获物(表3),隶属于6目9科9属,共计369尾(只),其中鱼类262尾,甲壳类及软体动物107只,采集到鱼类包括的中国花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、叫姑鱼(*Johnius grypotus*)、绿鳍马面鲀(*Thamnaconus modestus*)、黄鳍东方鲀(*Takifugu xanthopterus*)和牙鲆(*Paralichthys olivaceus*),共5种,甲壳类及软体动物包括口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)、中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)、日本螯(*Charybdis japonica*)和金乌贼(*Sepia esculenta*),共4种。分析各种类占全部渔获物的数量比例及重量比例,叫姑鱼数量比例最高及重量比例均最高,其次为日本螯及中华管鞭虾,本海洋牧场中主要优势物种为叫姑鱼,其次为日本

蠕及中华管鞭虾, 其他种类存在一定的季节差异。

中华鲟摄食的潜在饵料种类 根据历史文献数据^[8, 14, 21, 22], 白龙屿海洋牧场采集到的47种饵料生物种类(38种底栖动物、9种中下层生物)均可被中华鲟摄食, 本研究采集到的生物饵料种类均可作为放养中华鲟的潜在饵料资源, 体长在4—17 cm的生物饵料更符合本研究放养中华鲟幼鲟的摄食选择^[8], 叫姑鱼作为主要优势物种50.72%的个体超过了这个范围, 采集到的日本蟳个体体长差异较大, 26.32%的个体也超过了这个范围。

2.2 白龙屿海洋牧场放养中华鲟生长及摄食分析

放养中华鲟生长状况 于白龙屿海洋牧场共放养300尾子二代中华鲟幼鱼, 实验中持续捕捞

72h, 共捕获5尾放养中华鲟幼鱼(表4)。生物学测量结果显示五尾实验鱼体重较放养前均减小, 减重范围为0.6—5.0 kg, 平均减重2.4 kg, 解剖分析消化道显示肠道充塞度普遍为1—2级。

捕捞中华鲟幼鱼食物组成及可摄食种类验证 解剖分析5尾实验鱼消化道内容物, 发现均自主摄食了养殖区域内的天然生物饵料。因捕捞上的鱼个体较小且摄食到的种类个体较小, 统计数量的标准以被吞食动物的结构的套件来计数^[14]。结果显示, 5尾实验鱼共摄食16种饵料生物共计28只(尾), 隶属于4门5纲, 其中多毛纲4只, 瓣鳃纲4只, 腹足纲3只, 甲壳纲11只、鱼纲2尾。其中甲壳纲即虾蟹类为主要的饵料类群, 所占数量比例及重

表2 2020—2021年白龙屿海洋牧场底栖动物种类组成

Tab. 2 Species composition of benthos in Bailong island marine ranch from 2020 to 2021

底栖动物 Zoobenthos	种数Species number					重量比例Weight proportion (%)				
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	总种数 Total	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均值 Average
多毛纲Polychaeta	4	4	5	4	6	9.91	10.55	10.12	18.54	11.89
寡毛纲Oligochaeta	2	2	1		3	4.68	1.65	5.06	4.49	4.04
腹足纲Gastropoda	8	3	9	7	13	33.96	47.27	41.99	40.17	40.53
瓣鳃纲Lamellibranchia	2	1	3	1	6	20.26	26.81	18.37	13.06	19.75
甲壳纲Crustacea	5	1	4	3	5	29.39	12.45	17.15	19.24	19.75
蛇尾纲Ophiuroidea	1	1	1	1	1	1.45	1.27	6.19	1.97	3.00
其他Other	3	—	4	2	4	0.33	—	1.12	2.53	1.04
总计Total	25	16	27	12	38	100	100	100	100	100

注: 以上种类均可作为放养中华鲟潜在饵料(表6)

Note: The above species can be used as potential bait for stocking Chinese sturgeon (Tab. 6)

表3 2020—2021年白龙屿海洋牧场中下层生物种类组成

Tab. 3 Species composition of middle-lower biological in Bailong island marine ranch from 2020 to 2021

物种 Species	数量比例 Quantity proportion (%)					重量比例 Weight proportion (%)					平均体长 Average body length (cm)
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均值 Average	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均值 Average	
叫姑鱼 <i>Johnius grypotus</i>	49.99	80.28	50.14	44.52	56.22	43.30	78.21	62.50	37.12	55.28	16.01±4.21
中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	4.55	—	0.48	—	1.26	9.43	—	2.14	—	2.89	19.5±1.50
牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	—	—	—	3.85	0.96	—	—	—	26.59	6.65	24.25±4.02
黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i>	—	—	16.20	—	4.05	—	—	11.89	—	2.97	10.27±2.38
绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i>	—	—	0.48	—	0.12	—	—	0.61	—	0.15	8.33±3.21
中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>	27.27	16.9	21.74	28.20	23.53	5.15	5.07	10.34	5.69	6.56	7.04±2.03
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	4.55	1.41	2.09	2.38	2.61	6.92	1.46	1.60	2.76	3.19	9.61±1.61
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	13.64	1.41	8.42	17.22	10.17	35.20	15.27	10.02	26.27	21.69	11.97±9.33
金乌贼 <i>Sepia esculenta</i>	—	—	0.48	3.85	1.08	—	—	0.92	1.59	0.62	11.25±1.92

注: 以上种类均可作为放养中华鲟潜在饵料(表6)

Note: The above species can be used as potential bait for stocking Chinese sturgeon (Tab. 6)

量比例最高, 鱼类相对较少。且根据摄食选择系数显示, 本次捕获的放养中华鲟偏向于摄食甲壳类生物(表 5)。

本研究采集到的食物种类可作为判断白龙屿海洋牧场中华鲟潜在饵料种类的摄食证据, 验证了 5 个纲共 16 种潜在饵料生物(表 6)。

2.3 白龙屿海洋牧场潜在饵料资源量及中华鲟可放养量估算

在白龙屿海洋牧场共进行了 6 次采样调查, 底栖动物的年平均生物量为 $(0.866 \pm 0.134) \text{ g/m}^2$, 秋季底栖动物生物量最为丰富, 冬季生物量最为匮乏; 中下层生物的年平均生物量为 $(2.043 \pm 0.773) \text{ g/m}^2$, 资源量在秋季最为丰富, 冬季最为稀少(表 7)。

本研究通过 P/B 系数与生物量对海洋牧场承载力进行估算。养殖区域面积为 650 亩, 则底栖动物总生物量为 375.46 kg, 年生产量为 750.912 kg; 中下层生物总生物量为 885.865 kg, 年生产量为 885.865 kg。本海洋牧场内中华鲟的承载力以潜在饵料资源年持续生产量作为标准, 则理论年最大持续产量 818.389 kg。以中华鲟幼鲟自然条件下的年均生长量(约 8.9 kg/a)^[23] 作为理论年均生长量对环境可放养中华鲟数量进行估算, 天然饵料的饵料系数计 1.34^[24], 结果表明白龙屿海洋牧场可供 69 尾中华鲟幼鲟以自然条件下的生长率生长至性成熟(表 7)。

表 4 回捕中华鲟生物学数据

Tab. 4 Biological data of recapture *Acipenser sinensis*

序号 Order	全长 Total length (cm)	体长Body length (cm)	放养前 体重 Pre-weight (kg)	体重 Weight (kg)	肠道充 塞度 Fillness
1	140	115	13.2	8.2	1级
2	117	98	8.9	8.3	2级
3	122	101	10.4	7.8	1级
4	112	98	8.2	6.6	2级
5	130	98	9.9	7.5	1级
平均值 Average	124.2	102	10.1	7.7	

3 讨论

3.1 温州近海海洋牧场中华鲟天然饵料资源特征

底栖动物特征 本研究主要通过抓斗式采泥器定点采样调查的方式对白龙屿海洋牧场中的底栖动物进行常规性的定量分析, 研究结果反映了该海洋牧场中底栖动物群落的季节性变化, 调查过程中共采集到大型底栖动物 38 种。在秋季采集到的底栖动物最为丰富, 共采集到 28 种, 生物量为 1.067 g/m^2 , 占总种数量的 73.68%, 其种类数与生物量显著高于冬季。根据统计分析可知海洋牧场内主要优势物种为博云母蛤、异足索沙蚕、额刺裂虫和小莢蛭, 除冬季优势种主要为异足索沙蚕, 其他季节差异不大, 且春秋两季种类重合率较高, 结果与主要优势种的繁殖季节基本相符, 采集到的底栖动物以腹足纲为主, 其次为甲壳纲, 回捕的实验鱼对两种生物种类均表现出相对较高的选择性。

在历史研究中, 环境温度、流速、底质类型及水质状况对底栖动物群落结构都有不同程度的影响, 并且在自然开放水体环境下如江、海, 流速是影响底栖动物群落数量及结构变化的主要因素, 且影响机制多为流速变化引起的水体交换^[25-27]。因本研究所在的环境为半封闭的大型水体同时采用定点采泥的方式对底栖动物进行采集, 海洋牧场为全泥底质, 其流速主要受大风大浪影响, 同时底质类型为泥质容易受到水体交换影响, 故在秋季台风较频繁经常引起的大型水体交换的前提下, 能采集到较多的种类。而生物量的变化多受季节导致的温度变化影响, 这与李子孟等^[28]的研究结果较为一致, 主要的差异是其在秋季统计的温州近海自然水体中的底栖动物生物量比海水围栏区域高, 这表明海洋围栏中饵料生物持续供给能力较自然水体相对偏弱, 这在很大程度上制约了保种规模。

中下层生物特征 本研究一共采集到 9 种中下层生物, 隶属于 6 目 9 科 9 属, 共计 369 尾(只), 其中鱼类 262 尾, 甲壳类及软体动物 107 只。其中主要优势物种为叫姑鱼, 其数量及重量分别占总量的 56.22%

表 5 食物种类组成

Tab. 5 Food species composition

食物种类 Food species	种数 Species number	数量 Quantity	数量比例 Quantity proportion (%)	重量比例 Weight proportion (%)	相对重要性指数 IRI	摄食选择系数 Feeding selectivity
环节动物门 Annelida 多毛纲 Polychaeta	1	3	10.71	3.46	28	1.09
软体动物门 Mollusks 瓣鳃纲 Lamellibranchia	4	5	17.86	11.34	81	1.15
腹足纲 Gastropoda	6	8	28.57	29.23	668	1.44
节肢动物门 Arthropod 甲壳纲 Crustacea	3	10	35.71	32.13	1148	3.25
脊椎动物门 Vertebrate 鱼纲 Pisces	2	2	7.1	23.84	89	0.72

和55.28%, 且在夏季所占数量及重量比例最高, 这很大程度上影响了夏季生物量; 其次为日本鳎及中华管鞭虾, 其中日本鳎个体较大重量比占比较高为26.27%, 而中华管鞭虾数量比较高占23.53%; 而黄鳍东方鲀、绿鳍马面鲀仅在秋季捕获到, 牙鲆仅在冬季被捕获到。夏秋季渔获物的生物量最高且秋季生物量最为丰富, 而夏季捕获到的种类数较少, 其种类组成以叫姑鱼为主, 这可能与叫姑鱼的繁殖及牧场内黄鱼的摄食有关。可见中下层生物存在较为明显的季节性差异, 在秋季最丰富。在董静瑞等^[29]的研究发现温州南部沿岸海域的鱼类种类变化与溶解氧、温度、盐度呈极显著关系, 故本研究中引起渔获物季节差异的主要环境因素极可能是温度。值得注意的是采集的中下生物中主要优势类

群大多体长较大, 这极大程度上影响了实验鱼的摄食选择, 极可能是导致鱼体减重的主要原因之一。

本研究采集到的中下层渔获物种类结构组成及主要优势种与温州南部近海^[30]存在一定差异, 主要有以下几个原因: (1)本实验区域为半封闭水体, 围栏中大型生物组成结构较为稳定, 在进行放养前主要为大黄鱼放养区域, 因此与外部环境存在一定差异; (2)本研究采用了网目为20 mm的地笼网与历史研究使用的捕捞网具不同, 捕捞网具的不同也可能是造成差异的原因。

3.2 温州近海海洋牧场放养中华鲟的可行性

潜在饵料资源及承载力分析 中华鲟是典型的底栖性鱼类, 其口下位, 摄食时采取把口伸长成圆桶状吸入食物的方式, 属于吸吮型摄食, 因此,

表 6 中华鲟可摄食种类验证

Tab. 6 Verification of edible species of Chinese sturgeon

项目 Item	采集种类 Sampling species	摄食种类 Feeding species		参考文献 Reference		
		本研究 This study	历史数据 Historical data			
环节动物门Annelida	多毛纲Polychaeta	√	√	[8, 21, 22]		
	寡毛纲Oligochaeta	—	√	[8, 21, 22]		
软体动物门Mollusks	瓣鳃纲Lamellibranchia	√	√	[8, 21, 22]		
	腹足纲Gastropoda	√	√	[8, 21]		
节肢动物门Arthropod	头足纲Cephalopoda	金乌贼 <i>S. esculenta</i>	√	[8, 21]		
	甲壳纲Crustacea	中华管鞭虾 <i>S. crassicornis</i>	√	√	[14, 21, 22]	
		口虾蛄 <i>O. oratoria</i>	√	√	[8, 14, 21]	
		日本鲆 <i>C. japonica</i>	√	√	[8, 14, 21]	
		棘皮动物门Echinodermata	蛇尾纲Ophiuroidea	—	√	[8, 21]
		脊椎动物门Vertebrate	鱼纲Pisces	叫姑鱼 <i>J. grypotus</i>	√	√
中国花鲈 <i>L. maculatus</i>	√			√	[22]	
牙鲆 <i>P. olivaceus</i>	—			√	[14, 21]	
黄鳍东方鲀 <i>T. xanthopterus</i>	—			√	[22]	
绿鳍马面鲀 <i>T. modestus</i>	—			√	[22]	

注: √表示摄食; —表示未摄食

Note: √ means predation; — means not predation

表 7 白龙屿海洋牧场中华鲟潜在饵料资源量及理论可放养量

Tab. 7 Potential bait resources and theoretical stocking capacity of *Acipenser sinensis* in Bailong island marine ranch

潜在饵料资源量 Potential bait resources	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	平均值 Average	最大持续产量 MSY (kg/a)	放养量 Stocking rate
底栖动物 平均生物量 Zoobenthos biomass (g/m ²)	0.898±0.076	0.787±0.091	1.067±0.145	0.712±0.138	0.866±0.134	375.456	31
中下层生物 平均生物量 Lower-middle biological biomass (g/m ²)	1.576±0.372	2.090±0.394	3.273±0.186	1.232±0.432	2.043±0.773	442.933	38
总计Total (g/m ²)	2.474±0.448	2.877±0.485	4.340±0.331	1.944±0.570	2.909±0.903	818.389	69

底层生物可能是中华鲟的主要饵料来源^[8]。研究结果显示白龙屿海洋牧场中华鲟幼鱼摄食以底栖动物为主,且主要捕食种类为甲壳类,与历史研究的中华鲟幼鱼食性相似^[21,22],部分研究^[14]还表明海水环境下的中华鲟能摄食底层鱼类,且规格较大的中华鲟食物组成多以底层鱼类为主。本研究在周年调查中共采集到5门8纲共48种饵料生物,历史数据显示采集到的物种均可作为中华鲟的潜在饵料,在实验鱼消化道中仅验证了多毛纲、甲壳纲(虾蟹类)、瓣鳃纲(贝类)、腹足纲(螺类)和鱼纲共16种饵料生物,其主要原因可能是捕捞的样本较少且放养实验鱼规格与历史研究存在差异^[19,20],其实际摄食情况还需继续监测。

本研究通过P/B系数计算近海海洋牧场天然饵料的的生产力并估算了其放养中华鲟的承载力。估算结果显示海洋牧场理论最大可放养中华鲟数量约为实际放养量的1/3,这极大地加重了环境中自然饵料资源的负担,为保证正常的生长发育可适当人工投饵并调整放养密度。

中华鲟放养后的摄食适应性 本实验共放养了300尾约2.24吨全人工淡水保种的子二代中华鲟,于2021年5月回捕了5尾中华鲟幼鲟(平均体重7.68 kg,平均体长102 cm),5尾鱼健康状态正常但均有不同程度的减重现象,分析发现肠充塞度普遍偏低,综合饵料资源现状及中华鲟摄食情况分析,造成这种情况的主要原因有以下2点:(1)本研究放养的中华鲟幼鲟以摄食底栖动物为主,通过生物量计算结果可知海洋牧场原始底栖生物较东海近海资源相对匮乏^[30]。实验结果显示海洋牧场潜在饵料资源的理论可供养中华鲟数量约为实际放养量的1/3,放养密度较大同样是天然饵料资源持续供应能力不足的成因,饵料资源持续供给能力不足极可能是导致鱼体减重的重要因素之一;(2)鱼类的摄食选择对其生长发育有非常大的影响,回捕鱼的摄食表现出不喜欢摄食鱼类,这可能与海洋围栏中鱼类的体长有关,长江口近海区域中华鲟幼鱼(最大体长为112.7 cm)捕食饵料生物体长在4.5—17.0 cm^[8,30],本研究采集到的大部分鱼类超过了这个区间,且现有研究^[31—34]显示除了部分大型鲟科幼鱼偏向于摄食鱼类外,其他的鲟科幼鱼主要摄食底栖动物。本研究中海洋牧场中下层生物的物种结构显示叫姑鱼为主要优势物种,但捕捞上的50.72%的个体体长均在17 cm以上,而日本鳎作为次要优势物种且属于实验鱼的主要摄食种类,26.32%被地笼网捕捞上的个体平均体长甚至超过了20 cm。这些大型的饵料生物并不符合中华鲟幼鲟的摄食选择。

历史研究显示^[8]中华鲟野生群体95%以上的生活史都在海洋中进行,且东海海域是中华鲟重要的索饵场^[35]。白龙屿海洋牧场地处东海近海,本研究结果显示全人工淡水保种的子二代中华鲟能够在海洋牧场内自主摄食。同时综合分析了海洋牧场饵料资源的供给能力,初步证明该海洋牧场具有海水养殖中华鲟的环境基础,目前的主要问题是实验鱼有减重现象,中华鲟海水养殖方案还需进一步探究。

3.3 海洋牧场放养中华鲟建议

本研究为今后海洋牧场放养中华鲟主要提出以下2点建议:(1)在放养过程中应根据饵料资源的规格适当选择中华鲟的规格搭配,同时根据海洋牧场的承载力调整养殖密度。(2)在后续的日常管理中应适当人工投喂天然饵料对其环境资源量进行补充。同时,海洋牧场放养中华鲟的实时监测、定期捕捞、有效增重等方案有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Wei Q, Ke F E, Zhang J, *et al.* Biology, fisheries, and conservation of sturgeons and paddlefish in China [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1997, **48**(1-4): 241-255.
- [2] Li L X, Zhang H, Wei Q W, *et al.* Occurrence time and amount variation of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* at Xupu, Changshu section of Yangtze River after closure of Three Gorges Dam [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(3): 611-618. [李罗新, 张辉, 危起伟, 等. 长江常熟溆浦段中华鲟幼鱼出现时间与数量变动 [J]. 中国水产科学, 2011, **18**(3): 611-618.]
- [3] Yang H L, Wei Q W. Suppressive and active protective actions in aquatic wildlife conservation [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 1-10. [杨海乐, 危起伟. 论水生野生动物的主动保护与被动保护 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 1-10.]
- [4] Wei Q W, Li L X, Du H, *et al.* Research on technology for controlled propagation of cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), 2013, **20**(1): 1-11. [危起伟, 李罗新, 杜浩, 等. 中华鲟全人工繁殖技术研究 [J]. 中国水产科学, 2013, **20**(1): 1-11.]
- [5] Zhang S H, Nie P, Shu S W, *et al.* Mycobacteriosis in cultured F₂ generation Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and relevant blood physiological and biochemical indices [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, **24**(1): 136-145. [张书环, 聂品, 舒少武, 等. 子二代中华鲟分枝杆菌感染及血液生理生化指标的变化 [J]. 中国水产科学, 2017, **24**(1): 136-145.]
- [6] Luo J, Du H, Wei Q W, *et al.* Reproductive biology of an artificial population of endangered Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(3): 269-276. [罗江, 杜浩, 危起伟, 等. 濒危中华鲟人工群体的繁殖生物学 [J]. 中国水产科学,

- 2020, **27**(3): 269-276.]
- [7] Wei Q W. Conservation of Chinese sturgeon(*Acipenser sinensis*) based on its life history: dilemma and breakthrough [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1297-1319. [危起伟. 从中华鲟(*Acipenser sinensis*)生活史剖析其物种保护: 困境与突围 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1297-1319.]
- [8] Zhao F, Wang S K, Zhang T, *et al.* Food composition of *Acipenser sinensis* in the coastal waters of the Yangtze Estuary in spring [J]. *Marine Fisheries*, 2017, **39**(4): 427-432. [赵峰, 王思凯, 张涛, 等. 春季长江口近海中华鲟的食物组成 [J]. *海洋渔业*, 2017, **39**(4): 427-432.]
- [9] Chen D G. Fishery Resource Biology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997: 80-99. [陈大刚. 渔业资源生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 80-99.]
- [10] Ross R. The pathogenesis of atherosclerosis-an update [J]. *The New England Journal of Medicine*, 1986, **314**(8): 488-500.
- [11] Kiran B R, Puttaiah E T. Food and feeding habits of *Salmostoma untrahi* from Bhadra Reservoir, Karnataka [J]. *Indian Journal of Fisheries*, 2004, **51**(3): 335-344.
- [12] Chen J H, Zhuang P, Wu J H, *et al.* Migration and distribution of released *Acipenser sinensis* in the sea based on Pop-up Archival Tag technique [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(2): 437-442. [陈锦辉, 庄平, 吴建辉, 等. 应用弹式卫星数据回收标志技术研究放流中华鲟幼鱼在海洋中的迁移与分布 [J]. *中国水产科学*, 2011, **18**(2): 437-442.]
- [13] Wang C Y, Du H, Liu M, *et al.* Migrations and distributions of Chinese sturgeon released in the sea of Xiamen [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2016, **46**(3): 294-303. [王成友, 杜浩, 刘猛, 等. 厦门海域放流中华鲟的迁移和分布 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, **46**(3): 294-303.]
- [14] Wang Z M. A preliminary report on the feeding habits of Chinese sturgeon during the sea life stage [J]. *Marine Fisheries*, 1986, **8**(4): 160-161. [王者茂. 中华鲟在海中生活时期的食性初报 [J]. *海洋渔业*, 1986, **8**(4): 160-161.]
- [15] Sun M C. Marine Fishery Technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [孙满昌. 海洋渔业技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.]
- [16] Ren J Q, Huang L Y, Xu Q C, *et al.* Analysis and comparison of catch performance of cage net with different mesh sizes in Laizhou Bay in spring [J]. *Fishery Modernization*, 2021, **48**(1): 41-47. [任建钦, 黄六一, 许庆昌, 等. 莱州湾海域春季不同网目尺寸地笼网渔获性能分析比较 [J]. *渔业现代化*, 2021, **48**(1): 41-47.]
- [17] Gong Z J, Xie P, Yan Y J. Theories and methods of studies on the secondary production of Zoobenthos [J]. *Journal of Lake Science*, 2001, **13**(1): 79-88. [龚志军, 谢平, 阎云君. 底栖动物次级生产力研究的理论与方法 [J]. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 79-88.]
- [18] Waters T F. Annual production, production/biomass ratio, and the ecotrophic coefficient for management of trout in streams [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1992, **12**(1): 34-39.
- [19] Mann R H K, Penczak T. Fish production in rivers: a review [J]. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 1986(33): 233-247.
- [20] Li X Z, Wang J B, Wang H F, *et al.* Secondary production of macrobenthos from the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, **11**(4): 459-462. [李新正, 王金宝, 王洪法, 等. 东海大型底栖生物次级生产力研究 [J]. *应用与环境生物学报*, 2005, **11**(4): 459-462.]
- [21] Luo G, Zhuang P, Zhang L Z, *et al.* Diet composition and feeding habits of juvenile *Acipenser sinensis* in Yangtze River Estuary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(1): 144-150. [罗刚, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口中华鲟幼鱼的食物组成及摄食习性 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(1): 144-150.]
- [22] Sun L, Zhao F, Wang S, *et al.* Growth and feeding ecology of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze Estuary [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2019, **35**(1): 47-53.
- [23] The Biology of the Sturgeons in Changjiang and Their Artificial Propagation [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1988. [四川省长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1988.]
- [24] Feng G P, Zhuang P, Zhang L Z, *et al.* Feed conversion efficiency and growth characteristics of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(12): 2526-2531. [冯广朋, 庄平, 章龙珍, 等. 人工养殖中华鲟幼鱼摄食不同饵料的转化效率与生长特性 [J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(12): 2526-2531.]
- [25] Pinto R, Patrício J, Baeta A, *et al.* Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition [J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(1): 1-25.
- [26] Peng S Y, Li X Z. Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(17): 5274-5285. [彭松耀, 李新正. 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(17): 5274-5285.]
- [27] Ma Y X, Yao W L, Yuan S B, *et al.* Community structure and environmental analysis of macrozoobenthos in Yichang-Anqing reaches of the Yangtze mainstem [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(3): 634-642. [马雅雪, 姚维林, 袁赛波, 等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(3): 634-642.]
- [28] Li Z M, Ying Z Z, Wang H, *et al.* Investigation on autumn eco-environment in Wenzhou coastal area [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, **48**(21): 246-248. [李子孟, 应忠真, 王姮, 等. 温州沿海海域秋季生态环境调查研究 [J]. *山东化工*, 2019, **48**(21): 246-248.]
- [29] Dong J R, Hu C Y, Shui Y Y, *et al.* Fish community

- structure and its relationships with environmental factors in the southern inshore waters of Wenzhou [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, **24**(2): 209-219. [董静瑞, 胡成业, 水玉跃, 等. 温州南部沿岸海域鱼类群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *中国水产科学*, 2017, **24**(2): 209-219.]
- [30] Yan Y R, Lu H S, Jin X S. Marine fish feeding ecology and food web: progress and perspectives [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, **35**(1): 145-153. [颜云榕, 卢伙胜, 金显仕. 海洋鱼类摄食生态与食物网研究进展 [J]. *水产学报*, 2011, **35**(1): 145-153.]
- [31] Mason W T, Clugston J P. Foods of the gulf sturgeon in the suwannee river, Florida [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1993, **122**(3): 378-385.
- [32] Johnson J H, Dropkin D S, Warkentine B E, *et al.* Food habits of Atlantic sturgeon off the central new jersey coast [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1997, **126**(1): 166-170.
- [33] Carlson D M, Simpson K W. Gut contents of juvenile shortnose sturgeon in the upper Hudson Estuary [J]. *Copeia*, 1987(3): 796-802.
- [34] Billard R, Lecointre G. Biology and conservation of sturgeon and paddlefish [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2000, **10**(4): 355-392.
- [35] Labropoulou M, Machias A, Tsimenides N, *et al.* Feeding habits and ontogenetic diet shift of the striped red mullet, *Mullus surmuletus* Linnaeus, 1758 [J]. *Fisheries Research*, 1997, **31**(3): 257-267.

ESTIMATION OF POTENTIAL BAIT RESOURCES AND CARRYING CAPACITY OF JUVENILE CHINESE STURGEON (*ACIPENSER SINENSIS*) IN BAILONG ISLAND MARINE RANCH

LIU Huang-Xin^{1,2}, LENG Xiao-Qian², WANG Pu-Yuan^{2,3}, LUO Jiang², ZHONG Jia², LI Jun-Yi², XIONG Wei², ZHANG Li-Ning⁴, WANG Jia-Xin⁵, WANG Cheng-He⁵ and DU Hao^{1,2,3}

(1. College of animal science, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 3. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325700, China; 4. Zhejiang Dongyi Ocean Group Co., Ltd, Wenzhou 325701, China; 5. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Mariculture conservation is an important initiative to complement the life history of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and implement land-sea relay conservation. In order to investigate the potential bait resources of Chinese sturgeon in offshore marine pastures and the ability of marine enclosures, we conducted an annual survey of the Bailong island marine ranch off the coast of Wenzhou, Zhejiang Province, and assessed the amount of benthic and lower-middle biological resources in the marine ranch. Through the analysis of the feeding and growth status of the Chinese sturgeon and the contents of the digestive tract, the types of food that the Chinese sturgeon can eat in the marine pasture were obtained and verified, and the maximum resource carrying capacity of the Chinese sturgeon was estimated. The results showed that a total of 47 species of prey organisms were collected from the Bailong island marine ranch, belonging to 5 phyla and 8 classes, including 38 species of benthic animals and 9 species of lower-middle organisms. According to historical literature data, all of them could be eaten by Chinese sturgeon; According to the analysis of the contents of the digestive tract, the stocked Chinese sturgeon was adapted to the marine ranch and feed on their own. It is verified that it has ingested a total of 16 species of prey organisms collected from 4 phyla and 5 classes. The food composition was arranged according to the relative importance index (IRI): Crustacea (mainly shrimp and crabs) > Gastropoda > Fish > Pleurobranchia > Polychaete, and the feeding preference was arranged according to the size of the feeding selection coefficient: Crustacea > Belly Foot class > Petalbranch class > Polychaete > Fish. The annual maximum sustainable yield of potential bait resources of Chinese sturgeon in Bailong island marine ranch is about 811.389 kg, which can be used for 69 Chinese sturgeon juveniles to grow to sexual maturity. The results of this study indicate that the offshore fenced marine ranch is a potential model for marine conservation of Chinese sturgeon. In the next step, it is necessary to further study how to improve the scale and effect of marine fence conservation under the mode of artificial supplementation of natural bait, so as to provide basic data for the formation of Chinese sturgeon land-sea relay conservation.

Key words: Marine ranch; Bait resources; Food composition; Marine conservation; *Acipenser sinensis*