

·研究简报·

贝藻混养生态系互利机制中的作用因子

韦 玮<sup>1,2</sup>, 方建光<sup>2</sup>, 董双林<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:**利用模拟养殖系统,在黄海水产研究所麦岛实验基地进行贝藻混养实验,选用栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)和海带(*Laminaria japonica* Aresch)作为研究对象,对其生态系中各生态因子在互利机制中的作用及其对养殖效果的影响进行分析。在本实验条件(水温6~12℃,盐度32~33,光照1500~4500 lx)下,各项作用因子对各养殖模式的影响从大到小依次为:营养条件综合指数、生活条件综合指数、环境条件综合指数、浮游植物可利用系数、浮游植物生产量、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DO;作用因子限制性较强的模式中影响力从大到小为:营养条件综合指数、生活条件综合指数、浮游植物生产量、环境条件综合指数、浮游植物可利用系数、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DO。

**关键词:**贝藻混养;互利机制;作用因子

**中图分类号:**S96 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8737-(2005)02-0220-05

基于生态养殖建立的混养生态系具有互利性,但这个互利机制的发挥是否充分,养殖结构是否合理,经济效益和环境效应是否显著,对于不同的混养模式是否可建立一个具有一定适用性的评价标准,都有待于更深入的探讨。本实验选用已取得较好经济效益,并有较系统研究的桑沟湾栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)和海带(*Laminaria japonica* Aresch)混养模式,通过最适配比,探讨其互利机制的评价指标,希望能为更深入地研究养殖生态系问题和优化混养系统提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验设计

实验在黄海水产研究所麦岛实验基地进行,扇贝笼养,海带平挂绳养。依据2001年在同一地点进行的混养实验结果<sup>[1]</sup>(栉孔扇贝壳高3.30 cm,密度10/m<sup>2</sup>;海带长约0.72 m,密度2/m<sup>2</sup>),结合本次养殖生物的规格,共设4个混养模式(SK1,SK2,SK3,SK4),每组设3次重复;同时设置单养扇贝S和单养海带K 2个对照。具体配比见表1。

表1 养殖生物及放养情况  
Tab.1 Experiment design

$\bar{X} \pm SE$

配比模式 Pattern	放养密度/(ind·m <sup>-2</sup> ) Stocking density		放养体重/(g·ind <sup>-1</sup> ) Stocking weight		放养规格/(g·ind <sup>-1</sup> ) Stocking size in wet weight	
	扇贝 Scallop	海带 Kelp	扇贝 Scallop	海带 Kelp	扇贝 Scallop	海带 Kelp
SK1	5.0	5.0	13.62±2.91	5.83±2.37	3.72±0.45	40.80±13.05
SK2	5.0	6.0	14.00±3.09	4.97±1.88	4.15±0.26	35.16±8.65
SK3	5.0	7.0	14.82±1.09	6.07±1.75	4.81±0.33	43.28±10.11
SK4	5.0	8.0	14.68±2.54	5.01±1.76	4.64±0.073	6.12±8.73
S	5.0	/	13.47±8.85	/	4.24±0.28	/
K	/	6.0	/	4.45±1.93	/	31.17±8.72

收稿日期:2004-07-08; 修订日期:2004-10-08.

基金项目:国家自然科学基金(30271021);“十五”国家重点科技攻关计划(2001BA505B04).

作者简介:韦 玮(1978-),女,硕士,从事水产养殖生态学方面研究,现在宁波大学工作. E-mail:weiwei@nbu.edu.cn

通讯作者:方建光. E-mail:fangjg@ysfri.ac.cn

利用水泵(功率130 W,流量4.5 m<sup>3</sup>/h和功率100 W,流量3.5 m<sup>3</sup>/h),使池水保持循环不分层,并保持贝类滤食的浮游生物分布均匀。实验为封闭式养殖系统。

1.2 实验管理

实验从2001年12月3日开始,此间水温6~12℃,盐度32~33,光照1500~4500 lx(测定时间10:00 am)。

1.3 观测项目及方法

1.3.1 常规测定 水温 T、盐度 S、水体中溶解氧 DO 及光照强度每日定时(10:00 am)测定,使用 YSI-885 仪器。

1.3.2 营养盐测定 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 用抗坏血酸还原磷钼蓝法, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 用重氮-偶氮法, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用铈-镉还原法, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用次氯酸钠氧化法,具体参照《海洋生物资源与环境调查规范》<sup>①</sup>,每7天取样分析1次,共进行6次。

1.3.3 浮游植物的测定 浮游植物初级生产力的测定参照文献[2],用黑白瓶法;浮游植物生物量用浓缩计数法。以上两项每10天测定1次,共进行4次。

1.4 评价指标

1.4.1 栉孔扇贝肥满度的判断<sup>[3]</sup> 有关参数根据公式(1)~(6)进行计算:

$$R_1 = W_D / W_F \times 100\% \quad (1)$$

$$R_2 = W_{DC} / W_F \times 100\% \quad (2)$$

$$R_3 = W_{DA} / W_F \times 100\% \quad (3)$$

$$I_1 = W_{IF} / W_{DC} \quad (4)$$

$$I_2 = W_{DI} / W_{DC} \quad (5)$$

$$I_3 = W_{DI} / W_{DC} \quad (6)$$

其中 R<sub>1</sub> 为干贝出成率(%), R<sub>2</sub> 为干内脏出成率(%), R<sub>3</sub>

为干肉柱出成率(%), I<sub>1</sub> 为干贝指数, I<sub>2</sub> 为干内脏指数, I<sub>3</sub> 为干肉柱指数, W<sub>DA</sub> 为干肉柱重, W<sub>D</sub> 为干贝重, W<sub>F</sub> 为鲜贝重, W<sub>DC</sub> 为干壳重, W<sub>DI</sub> 为干内脏重。

1.4.2 互利机制的作用因子的分析

(1) 环境条件指标为 DO 质量浓度 C<sub>DO</sub> (mg·L<sup>-1</sup>), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度 C<sub>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</sub> (μmol·L<sup>-1</sup>) 和环境条件综合指数 ECI。 ECI 值根据下列公式计算:

$$ECI = [C_{DO} \cdot (1/C_{NH_4^+-N})]^{1/2}$$

(2) 营养条件指标为浮游植物生产量 PP (mgC·L<sup>-1</sup>), 可利用系数 UC 和营养条件综合指数 NCI。 其计算公式为:

$$UC = N_1 \cdot N_2^{-1}$$

$$NCI = PP \cdot UC$$

式中, N<sub>1</sub> 观测到的浮游植物中扇贝主要的摄食藻类数, N<sub>2</sub> 代表观测到的浮游植物中扇贝可摄食的藻类数。

(3) 生活条件指标 LCI, 计算公式为:

$$LCI = (ECI \cdot NCI)^{1/2}$$

2 结果与分析

2.1 养殖生物的生长

2.1.1 栉孔扇贝的生长 各配比模式中栉孔扇贝的放养和收获时的生长情况见表1.2。 比较混养和单养模式的栉孔扇贝生长情况, SK1、SK2、SK3 和 SK4 较 S 在规格和重量上都有较大增长;但在4种配比模式之间,栉孔扇贝的生长量并不完全是随着海带放养密度的降低而增大。由表2.3 可看出, SK1 和 SK2 中栉孔扇贝的收获重量、规格及3种肥满度指数较 SK3、SK4 好, SK1、SK2 和 SK3、SK4 之间存在一定的差异。

表2 实验结束时栉孔扇贝的生长情况

配比模式 Pattern	收获体重/g Harvest weight	收获规格/(cm·ind <sup>-1</sup> ) Harvest size	干贝重/g Body weight(DW)	干肉柱重/(g·ind <sup>-1</sup> ) Adductor(DW)	软体部干重 Soft tissue(DW)
SK1	27.37 ± 5.49	6.42 ± 0.32	14.49 ± 1.76	1.06 ± 0.11	1.43 ± 0.44
SK2	27.38 ± 5.50	6.37 ± 0.52	13.81 ± 1.86	0.94 ± 0.20	1.54 ± 0.13
SK3	25.38 ± 4.71	5.83 ± 0.61	11.30 ± 3.73	0.65 ± 0.32	1.19 ± 0.46
SK4	26.83 ± 6.43	5.99 ± 0.35	13.71 ± 0.78	0.89 ± 0.18	1.66 ± 0.21
S	16.33 ± 3.61	5.39 ± 0.58	9.40 ± 2.46	0.57 ± 0.28	1.05 ± 0.34

表3 不同模式中栉孔扇贝的肥满度

Tab.3 Condition indexes of *C. farreri* in different patterns

肥满度指标 Condition index	SK1	SK2	SK3	SK4	S
R <sub>1</sub> /%	53.61	51.09	51.08	51.43	58.95
I <sub>1</sub>	1.14	1.13	1.12	1.12	1.13
R <sub>2</sub> /%	2.68	2.30	2.29	2.87	3.01
I <sub>2</sub>	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04
R <sub>3</sub> /%	3.82	3.42	3.40	3.36	3.69
I <sub>3</sub>	0.08	0.08	0.07	0.06	0.07

注: R<sub>1</sub>—干贝出成率, R<sub>2</sub>—干内脏出成率, R<sub>3</sub>—干肉柱出成率, I<sub>1</sub>—干贝指数, I<sub>2</sub>—干内脏指数, I<sub>3</sub>—干肉柱指数。

Note: R<sub>1</sub>—Ratio of body weight(DW) to body weight(FW); R<sub>2</sub>—Ratio of soft tissue weight(DW) to body weight(FW); R<sub>3</sub>—Ratio of adductor weight(DW) to body weight(FW); I<sub>1</sub>—Index of shell weight(DW); I<sub>2</sub>—Index of soft tissue weight(DW); I<sub>3</sub>—Index of adductor weight(DW).

① 中国专著经济区和大陆架勘测专项生物资源调查项目技术专家组. 海洋生物资源与环境调查规范[M]. 1997.

把混养配比看作1个处理,4种配比模式即是其4个水平,以S为对照组,对SK1、SK2、SK3和SK4中栉孔扇贝的规格进行单因子方差分析。F检验结果差异显著( $P=0.02 < 0.05$ ),说明不同模式间栉孔扇贝的规格差异不是由实验误差所造成,是由于混养配比的不同造成的。在本实验条件下,综合养殖系统中的混养配比情况对养殖主要生物的生长

有着显著影响。从多重比较结果看,SK2与其他处理间存在显著差异。

**2.1.2 海带的生长** 不同配比模式中海带的放养和收获时的生长情况见表1.5。各模式中海带都有明显的生长,在养殖期间内,未有病症出现。

表4 实验结束时海带的生长情况

Tab.4 Growth of *Laminaria japonica* at harvest

配比模式 Pattern	收获体重/(g·ind <sup>-1</sup> ) Harvest weight	收获规格/(cm·ind <sup>-1</sup> ) Harvest size(FW)	干重/(g·ind <sup>-1</sup> ) (DW)
SK1	8.00 ± 3.50	52.33 ± 13.20	0.41 ± 0.10
SK2	7.25 ± 3.89	45.50 ± 14.85	0.38 ± 0.13
SK3	10.00 ± 5.94	55.00 ± 16.09	0.62 ± 0.09
SK4	8.01 ± 2.47	47.00 ± 14.24	0.40 ± 0.08
K	10.25 ± 3.18	53.50 ± 12.36	0.39 ± 0.12

注:海带的干重测定从距根处量起10 cm位置取3 cm×3 cm样品进行。

Note: Kelp dried was sampled 3 cm×3 cm area 10 cm from the root to determine the DW.

## 2.2 作用因子指标与贝类产量的关系

**2.2.1 单相关分析** 将所设立各配比模式互利机制的作用因子指标与贝类产量进行单相关分析的结果见表6。总体看,SK系列和S中贝类产量与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水平呈负相关,与其他各项作用因子指标呈正相关。这再次证实了环境条件中与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水平正相关的NH<sub>3</sub>对养殖动物自身有毒<sup>[4]</sup>。贝类产量与DO值的相关系数S较SK系列大,说明在混养生态系统中混养藻类为贝类生长提供了必需的O<sub>2</sub>,增加了养殖水体的DO含量,在一定程度上减轻了环境中溶氧水平对贝类生长的限制;SK3中营养条件指标的3个具体作用因子指标较其他SK系列的相关性都较强;浮游植物可利用系数和营养条件综合指数达到显著相关,浮游植物生产量甚至达到极显著相关水平。另外,该混养模式中生活条件综合指数与贝类产量的关系极显著相关。从统计分析结果看,浮游植物在该混养生态系统中扮演了极重要的角色,其生物量和群落组成情况对贝类生长的影响是直接而且巨大的。混养栉孔扇贝密度较大的SK4中,浮游植物生产量和营养条件综合指数达到显著相关水平;在这一配比模式中,浮游植物对贝类产量也起着相当重要的作用。

**2.2.2 各作用因子指标与贝类产量关系的相对重要性** 通过偏回归分析,SK2、SK3两模式中的各作用因子指标与贝类产量的关系及其重要程度结果见表6。两种模式中,贝类产量都与DO呈负相关,都与浮游植物可利用系数、环境条件综合指数、生活条件综合指数和营养条件综合指数呈显著正相关。同时,SK3的浮游植物生产量这项作用因子指标也与贝类产量呈显著正相关。

SK2中,各作用因子指标对贝类产量的相对重要性从大到小为:营养条件综合指数、生活条件综合指数、环境条件综

合指数、浮游植物可利用系数、浮游植物生产量、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水平、DO水平。SK3为:营养条件综合指数、生活条件综合指数、浮游植物生产量、环境条件综合指数、浮游植物可利用系数、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水平、DO水平。

## 3 讨论

### 3.1 从作用因子探讨贝藻混养的互利机制

从环境条件分析可看出,单养栉孔扇贝模式较其他所有混养模式扇贝产量对DO的相关性强,受其影响相对较大;混养模式中由于混养藻类的存在,水环境的DO水平并未成为限制性因子。DO水平的高低是衡量养殖环境优劣的一个重要指标,同时对养殖生物的各种生理活动有着很大的影响力<sup>[2]</sup>。在本实验中,随着混养光合生物海带的加入,减弱了DO这一作用因子的限制力。同时,从表5的分析结果看,无论是单养还是混养模式,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N与贝类产量均呈负相关。说明即使在生态养殖中,有意识地控制NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的情况下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N对养殖环境的不利作用仍然存在。在设置混养模式时,对混养生态系的营养盐循环(主要是氮循环)的设计和控制问题需要作为一个重要的问题进行考虑。利用海带等可利用氮生物<sup>[6]</sup>控制环境中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N水平,具有一定的可行性;但也需要考虑到选择混养生物进行混养的实际可行性。

从营养条件分析,在本实验研究中,选作代表营养水平的3项作用因子指标与贝类产量都有着不同程度的(甚至是显著或极显著)正相关性;在作用因子限制性较强的SK3(见表4)中此种情况相对更为明显。在本实验条件下,浮游植物生产量、可利用系数和营养条件综合指数对贝类更好地生长有一定的限制作用。浮游植物既作为贝类的主要饵料提

表5 作用因子指标与贝类产量的相互关系  
Tab.5 Relationships between effect indexes and output of *C. farreri*

养殖模式 Pattern	作用因子( $n=3$ ) Effective factor( $n=3$ )	$r$	$P$
SK1	DO	0.47	>0.05
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.45	>0.05
	ECI	0.36	>0.05
	PP	0.50	>0.05
	UC	0.91	<0.05
	NCI	0.49	>0.05
	LCI	0.42	>0.05
SK2	DO	0.24	>0.05
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.39	>0.05
	ECI	0.52	>0.05
	PP	0.83	>0.05
	UC	0.59	>0.05
	NCI	0.78	>0.05
	LCI	0.81	>0.05
SK3	DO	0.28	>0.05
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.58	>0.05
	ECI	0.56	>0.05
	PP	0.97	<0.01
	UC	0.95	<0.05
	NCI	0.88	<0.05
	LCI	0.96	<0.01
SK4	DO	0.32	>0.05
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.20	>0.05
	ECI	0.19	>0.05
	PP	0.93	<0.05
	UC	0.57	>0.05
	NCI	0.92	<0.05
	LCI	0.53	>0.05
S	DO	0.55	>0.05
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.30	>0.05
	ECI	0.04	>0.05
	PP	0.44	>0.05
	UC	0.20	>0.05
	NCI	0.42	>0.05
	LCI	0.17	>0.05

注: ECI—环境条件综合指数; PP—浮游植物生产量; UC—浮游植物可利用系数; NCI—营养条件综合指数; LCI—生活条件综合指数。

Note: ECI—environment composite index; PP—phytoplankton production; UC—utilization coefficient of phytoplankton; NCI—nutrient composite index; LCI—livable composite index.

表6 贝类产量与作用因子指标的偏相关分析结果  
Tab.6 Partial analysis results of effect factors and output of *C. farreri*

作用因子 Effective factor	SK2		SK3	
	偏相关系数 Coefficient of partial relationship	$P$	偏相关系数 Coefficient of partial relationship	$P$
DO	-0.6501	>0.05	-0.5745	>0.05
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.2852	>0.05	0.6759	>0.05
ECI	0.8135	>0.05	0.8685	>0.05
PP	0.5262	>0.05	0.9582	<0.05
UC	0.7913	>0.05	0.7882	>0.05
NCI	0.8954	>0.05	0.9789	<0.05
LCI	0.8349	>0.05	0.9595	<0.05

注: ECI—环境条件综合指数; PP—浮游植物生产量; UC—浮游植物可利用系数; NCI—营养条件综合指数; LCI—生活条件综合指数。

Note: ECI—environment composite index; PP—phytoplankton production; UC—utilization coefficient of phytoplankton; NCI—nutrient composite index; LCI—livable composite index.

供者,又在混养生态系中与大型藻类共同提供溶氧和吸收氮源,是混养生态系中需要认真对待的关键成分之一。混养互利机制对环境条件的改善,在一定程度上减弱了其限制力,从而使营养条件成为一个相对较重要的影响养殖效果的因素。在一种混养生物与另一种混养生物的食物供应者处于同一生态位的情况下,营养条件的改善,需要兼顾两者的共同利益出发。

### 3.2 互利机制中作用因子对养殖效果的影响力

从表6结果分析,SK2和SK3两个混养系统中,环境条件综合指数与贝类产量的相关性均较其营养、生活条件综合指数小,说明混养生态系的环境质量较好;营养条件则成为影响贝类产量的主要因素。具体比较SK2和SK3中3项综合指数,发现其相关性从大到小依次为:营养条件综合指数、生活条件综合指数、环境条件综合指数。从1.4.2“互利机制中作用因子指标的设置”可知,混养使环境条件好转(其综合指数相关性相对下降),在一定程度上减弱了生活条件综合指数的相关性。而这两个混养系统的初级生产力相对较另两个混养系统高,即浮游植物种类结构和数量更为合理,能够为贝类生长提供较多的食物源。结合以上两方面,可以解释为虽然在混养生态系统中营养条件对养殖效果的影响加大,但同时较高的初级生产力也保证了混养贝类能获得较多的食物源,混养生态系统自身互利机制的发挥能较好地解决这一问题,这也正是互利机制的一个主要作用途径。

致谢:李德尚教授在本文的写作过程中给予了悉心指导,谨致谢忱。

## 参考文献:

- [1] 韦 玮,方建光,董双林.贝藻混养互利机制的初步研究[J].海洋水产研究,2002,23(3):20-25.
- [2] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:标准出版社,2000.
- [3] 杨红生,王 健,周 毅,等.烟台浅海区不同养殖系统养殖效果的比较[J].水产学报,2000,24(2):140-145.
- [4] 汪心沅.泥螺和菲律宾蛤仔对环境中的氨的耐受力[A].90年代最新海水养殖技术[M].北京:中国农业出版社,1990.453-458.
- [5] Stéphane Puvion. Ecophysiological model of growth and reproduction of the black pearl oyster, *Pinctada margaritifera*: potential applications for pearl farming in French Polynesia[J]. Aquaculture, 2000, 186: 117-144.
- [6] Orléan Alain, Royan J., Petrell & Paul J Harrison. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm[J]. Journal of Applied Phycology, 1998, 10: 333-340.

## Main factors of mutually beneficial mechanism in the polyculture-ecosystem of scallop (*Chlamys farreri*) and kelp (*Laminaria japonica*)

WEI Wei<sup>1,2</sup>, FANG Jian-guang<sup>2</sup>, DONG Shuang-lin<sup>1</sup>

(1. Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Three kinds of effective factors were designed at environmental, nutrient and livable levels to evaluate the mutually beneficial mechanism in polyculture-ecosystem of scallop *Chlamys farreri* and kelp *Laminaria japonica*. The relationship between the effect factors and cultural output was analyzed. Moreover, the optimized pattern of the first stage was checked to seek for more suitable ratio of fish to kelp for polyculture. Under the conditions of the experiment, the output is more than other patterns in Pattern SK2 and effect factors in Pattern SK3 limited cultural output more than those in other patterns. On the effect-factors level, the order of relative importance between each effective factor and cultural output is as follow: nutrient composite index, livable composite index, environment composite index, utilization coefficient of phytoplankton, production of phytoplankton, livable composite index,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , DO; in Pattern SK2, nutrient composite index, production of phytoplankton, environment composite index, utilization coefficient of phytoplankton,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , DO.

**Key words:** polyculture; mutually beneficial mechanism; effective factor

**Corresponding author:** FANG Jian-guang. E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn