

北黄海虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*) 定居群体的生态适应性研究*

杨 钰^{1,2,3} 倪守胜^{2,3,4} 刘 毅² 柳淑芳^{2,3①} 庄志猛²

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 大连 116023; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 4. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306)

摘要 本研究选取山东长岛、辽宁海洋岛和獐子岛底播的虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)群体、人工选育的“獐子岛红”品种养殖群体、辽宁旅顺自然群体以及原产地日本青森县陆奥湾自然群体,运用稳定同位素技术探究虾夷扇贝不同地理群体的特征。结果显示,(1)虾夷扇贝各群体的闭壳肌和内脏团 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-20.47\text{‰}\pm 0.66\text{‰}$ 和 $-24.13\text{‰}\pm 2.41\text{‰}$; 闭壳肌和内脏团 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 $8.52\text{‰}\pm 1.32\text{‰}$ 和 $7.26\text{‰}\pm 0.49\text{‰}$ 。(2)基于 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的单因素方差分析(One-way ANOVA)显示,群体间各个取样点闭壳肌和内脏团的碳、氮稳定同位素比值差异显著($P<0.05$); 基于地理位置构建所有群体的碳氮稳定性同位素散点分布图,可以明显地区别中国群体和日本群体。(3)中国 8 个虾夷扇贝群体之间,只有长岛群体的碳、氮稳定同位素比值明显低于其他群体,而其余群体之间差异不显著($P>0.05$)。研究表明,虾夷扇贝中国群体与日本群体间已经存在较大的差异,且中国群体间因生长海域、水文环境的不同也呈现出分群现象。说明虾夷扇贝定居群体在不同的生态环境下已产生了不同程度的适应性改变。

关键词 虾夷扇贝; 地理群体; 稳定性同位素; 生态适应性

中图分类号 S931.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)03-0031-08

虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)为冷水性双壳贝类,原主要分布于日本北海道及本洲北部、朝鲜、俄罗斯千岛群岛南部水域。1982 年,辽宁省海洋水产研究所从日本北海道引入虾夷扇贝(王庆成等,1982),并在辽宁、山东等北方沿海展开大范围、规模化人工增养殖(张福绥等,1984)。因其品质好、价值高,经过 30 多年的养殖推广,虾夷扇贝已成为我国重要海洋经济贝类之一,并逐步适应渤海及黄海北部海域的生存环境且繁衍定居下来(常亚青等,2007;

李文姬等,2007; 周界衡,2012¹⁾)。

虾夷扇贝在引进和本地化过程中,其栖息环境和群体间关系发生较大变化。其原产地为日本青森、北海道及宫城等,地处 41°N 左右(刘永丰,1983),水温范围为 $5\text{--}20^{\circ}\text{C}$,最适生长温度为 $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ 。虾夷扇贝在中国的主要定居地山东长岛、獐子岛、海洋岛及旅顺等,地处 $37^{\circ}\text{--}39^{\circ}\text{N}$,该海域水温范围较大($1\text{--}27^{\circ}\text{C}$) (袁有宪等,2000; 张绪东等,2015)。栖息环境的变化直接影响贝类的摄食习性和生长发育(李文姬等,

* “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD18B03)和山东省泰山学者建设工程专项共同资助 [This work was supported by the National Scientific and Technological Projects in Rural Areas in 12th Five-Year (2012BAD18B03), and the Special Funds for Taishan Scholars Project of Shandong Province]. 杨 钰, E-mail: yy081521@163.com

① 通讯作者: 柳淑芳, 研究员, E-mail: liusf@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2017-04-05, 收修改稿日期: 2017-04-08

1) Zhou JH. Preliminary study on structure and characteristic of yesso scallop industry in Liaoning. Master's Thesis of Ocean University of China, 2012 [周界衡. 辽宁虾夷扇贝产业结构与特征的初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2012]

2012), 为了在新的生态环境中生存, 虾夷扇贝势必产生一系列的适应性进化, 但国内外尚无关于生态环境适应性研究报道。因此, 全面了解作为外来种的虾夷扇贝的生态适应过程, 摸清养殖过程中定居地满足其生长发育所需要的生态环境条件, 才能够更好地保障中国虾夷扇贝养殖业的健康可持续发展。

动物组织的碳、氮稳定同位素结果可以反映动物在生命过程中由于摄取的不同食物经过新陈代谢、消化吸收的累积, 及其所处海域环境因素的差异对其自身产生的影响(蔡德陵等, 2002、2005)。稳定同位素示踪技术(Stable isotope tracer technique)已经广泛用于人类和动物的营养学、临床医学和生态系统学研究等诸多领域(Deniro *et al.*, 1977; 蔡德陵等, 2002; 李忠义等, 2005; Benstead *et al.*, 2006)。大量研究表明, 碳稳定同位素与群体的可食用性代谢源有直接的关系, 消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其食物源相似, 平均富集度约为 0–1‰, 可用作食物来源的良好示踪参数(Peterson *et al.*, 1987; 蔡德陵等, 2005; 郭旭鹏等, 2007); 氮稳定同位素每经一个营养级的传递将发生 2‰–4‰ 的富集, 可用作分析食物来源的参考(Peterson *et al.*, 1987; Hobson *et al.*, 1992)。因此, 研究不同群体间的碳、氮稳定同位素水平, 不仅能反映出生物体本身的食物来源, 也能间接体现出其生活环境的差异乃至摄食习性的不同(Hobson *et al.*, 1992), 就如同天然的标签, 直接代表了该群体生活海域的生态环境(纪炜炜等, 2013)。本研究拟通过测定中国虾夷扇贝定居群体、底播增殖群体、人工选育群体及原产地日本群体的碳、氮稳定同位素值, 分析不同生活海域的

虾夷扇贝群体间的食性差异和环境条件差异, 以期阐明虾夷扇贝在中国北黄海定居的生态适应过程, 为提升中国虾夷扇贝养殖产业的经济效益和促进产业的可持续发展提供有益借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

虾夷扇贝样品分别取自中国北黄海海域的辽宁獐子岛、山东长岛、辽宁海洋岛等地的底播群体, 辽宁旅顺自然群体以及“獐子岛红”人工选育群体, 原产地日本青森县陆奥湾自然群体(表 1)。样本采集后, 冰冻保存、运输至实验室, -20°C 保存。每个取样地点随机选取 10 个虾夷扇贝样品进行解剖处理, 取闭壳肌及内脏团组织, 分别放入 5 ml EP 管中, -20°C 保存, 以备后续实验使用。

每个取样点取 20 mg 闭壳肌, 并将 10 份样品混合, 经蒸馏水清洗后, 60°C 烘干 48 h 脱水, 干燥样品用研钵充分研磨成粉状(可过 100 目筛), 于干燥器中常温保存待测。虾夷扇贝内脏团样品做相同处理。

1.2 碳、氮稳定同位素的测定

本研究采用相对测量法检测样品中的稳定同位素, 所测样品的同位素比值与国际标准做比较, 结果为样品的同位素比率, 定义为样品与标准物之间偏差的千分数(‰), 并以国际通用的 δ 值形式($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)表示(金鑫, 2011)¹⁾。样品的稳定性同位素分析采用 Isoprime-100 稳定同位素质谱仪进行测定, 待测样

表 1 虾夷扇贝样品的基本信息

Tab.1 Basic information of *P. yessoensis* samples

序号 Number	代码 Code	采样地点 Sampling place	采样时间 Sampling time	年龄 Age	样品类型 Sample type	样品数量(个) Sample size(ind)
1	CD1	长岛 Changdao	2015-08	4	底播增殖 Bottom sowing culture	10
2	CD2	长岛 Changdao	2015-08	3	底播增殖 Bottom sowing culture	10
3	HYD	海洋岛 Haiyangdao	2015-07	3	底播增殖 Bottom sowing culture	10
4	ZZD1	獐子岛 Zhangzidao	2015-07	5	底播增殖 Bottom sowing culture	10
5	ZZD2	獐子岛 Zhangzidao	2015-07	4	底播增殖 Bottom sowing culture	10
6	ZZD3	獐子岛 Zhangzidao	2015-07	2	底播增殖 Bottom sowing culture	10
7	ZZH	獐子岛 Zhangzidao	2015-07	3	人工选育 Artificial breeding	10
8	LS	旅顺 Lvshun	2015-07	2	自然定居 Natural colonized	10
9	JP	日本 Japan	2016-03	4	原产地 Origin	10

1) Jin X. Plankton food web analysis of the East China Sea and the Yellow Sea using analyses of fatty acids and stable isotopes. Master's Thesis of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011 [金鑫. 黄东海浮游食物网的初步研究——基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士研究生学位论文, 2011]

品在仪器中经气化、纯化、电离等分析,每份样品均重复测定5次作为平行实验:

$$\delta X(\%) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 10^3$$

式中, X 为 ^{13}C 或 ^{15}N , $R_{\text{样品}}$ 为所测样品的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $R_{\text{标准}}$ 为标准物同位素比值。

1.3 数据分析与处理

对各个取样点虾夷扇贝闭壳肌及内脏团稳定同位素数据分别进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 采用 SNK (Student-Newman-Keuls) 检验, 判别各个群体间的关系, 并以碳、氮同位素比值为指标进行聚类分析, 判别各站位的相关关系, 以获得聚类分析的结果。所有数据分析均由 SPSS 17.0 软件完成, $P < 0.05$ 为差异显著。本研究中, 日本和中国虾夷扇贝生长海域环境因素差异情况参考已有文献报道(陈思行, 1988; 张雪, 2013¹⁾; 张绪东等, 2015), 本研究未测定其实际的环境因子。

2 结果与分析

2.1 不同取样部位的碳、氮稳定同位素含量

本研究对虾夷扇贝定居地及其原产地不同群体分别进行了碳、氮稳定同位素比值的测定, 结果发现(表 2 和表 3), 虾夷扇贝各群体的闭壳肌 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20.47\% \pm 0.66\%$, 内脏团的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-24.13\% \pm 2.41\%$; 闭壳肌的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $8.52\% \pm 1.32\%$, 内脏团的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $7.26\% \pm 0.49\%$ 。

2.2 群体间碳、氮稳定同位素差异

依据 HSD 检验法(忠实显著性差异)检验分析结果, 对虾夷扇贝 9 个地理群进行群组划分。结果显示, 依据内脏团 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 9 个取样点可以明显的分为 5 个群组, 第 1 群组包括 HYD 群体、ZZD1 群体和 LS 群体, 该组的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低。第 2 群组的 2 个群体中, LS 群体为与第 1 群组所共有, ZZD2 群体为与第 3 群组所共有。第 3 群组包括 ZZD2 群体、ZZH 和 ZZD3 群体。CD1 和 CD2 群体单独划分为第 4 群组, 为中国群体中 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高的群组。JP 群体单独成为第 5 群组, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于其余群组。依据内脏团 $\delta^{15}\text{N}$ 值可以将 9 个取样点划分为 6 个群组, CD1 群体单独为第 1 群组, 为所有群体中 $\delta^{15}\text{N}$ 值最小的群体, 其余包含 JP 群体在内的 8 个群体, 相互差异均较小,

虽然在 0.05 显著性水平下呈现为 5 个不同的群组, 但是各个群组相互间均有同质性的群体交叉于 2 个群组存在(表 2)。

根据闭壳肌碳稳定同位素划分, JP 群体独自为群组 1, 为所有群体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小的群体, 中国 8 个群体间则呈现出较高的一致性, 仅 CD1 群体、ZZD1 群体分别与其余各群体间差异显著($P < 0.05$), 各自形成单独的群组, 其余的 6 个中国群体间差异不显著($P > 0.05$), 形成 1 个群组。闭壳肌氮稳定同位素的群体间差异相对较明显, 9 个群体在 0.05 的显著性水平下可划分为 6 个群组, 群组 1 仅有 JP 群体 1 个群体, 且其 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低。CD1 和 CD2 2 个群体间没有明显差异, 为第 2 群组。ZZD3 和 LS 群体间没有明显差异, 为第 3 群组, HYD 群体单独为第 4 群组, ZZH 群体和 ZZD2 群体为第 5 群组, ZZD1 群体为第 6 群组, 且其 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高(表 3)。

2.3 基于地理位置的群体间 ANOVA 分析

基于地理位置对 9 个群体进行单因素方差分析, 结果显示, 虾夷扇贝闭壳肌和内脏团碳、氮稳定性同位素比值的变化受到地理位置的影响较大(表 4 和表 5)。99.23% 的内脏团碳稳定同位素比值的差异可以由地理位置来解释, 地理位置因素的主效应显著($F = 579.068$, $P < 0.001$); 94.36% 的内脏团氮稳定同位素比值差异可以由地理位置因素解释, 地理位置因素的主效应显著($F = 75.218$, $P < 0.001$)。97.89% 的闭壳肌稳定同位素比值差异可以由地理位置因素解释, 地理位置的主效应显著($F = 259.914$, $P < 0.05$); 99.57% 的闭壳肌稳定同位素氮比值差异可以由地理位置因素解释, 地理位置的主效应显著($F = 1043.140$, $P < 0.001$)。说明虾夷扇贝样品测得的碳氮稳定同位素比值体现的差异性呈现明显的地理相关性, 各虾夷扇贝群体具有明显的地理群体差异。

2.4 虾夷扇贝的群体划分和地理判别

根据虾夷扇贝每个取样点所测得数据, 构建碳、氮稳定同位素比值的散点分布图(图 1 和图 2)。闭壳肌和内脏团碳、氮分析中, 日本群体均独自形成明显的分群, 说明日本群体和中国群体间的群体结构差别较大。综合 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析(表 2 和表 3), 日本群体和中国群体间的内脏团稳定性同位素的差异性在 $\delta^{13}\text{C}$ 值上表现较为明显, 而闭壳肌稳定同位素在 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值上与中国群体间差异均较为明显。

1) Zhang X. Study on phytoplankton community structure and the relationship with feeding habits of *Patinopecten yessoensis* in the waters adjacent to Zhangzidao Island. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2013 [张雪. 獐子岛邻近水域浮游植物群落结构及其与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)食性关系的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2013]

表 2 虾夷扇贝内脏团碳氮稳定同位素及 HSD 检测

Tab.2 Stable isotopes in the visceral mass of *P. yessoensis* and its HSD determination

内脏团碳稳定同位素 $\delta^{13}C$ of visceral mass						内脏团氮稳定同位素 $\delta^{15}N$ of visceral mass											
代码 Code	范围 Range	标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	Alpha=0.05					标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	Alpha=0.05						
				1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	6	
HYD	-25.84~-25.56	0.12	-25.706	**						0.13	6.324	**					
ZZD1	-25.31~-24.73	0.24	-25.598	**						0.06	6.802	**					
LS	-24.92~-24.59	0.13	-25.450	**	**					0.12	6.984	**	**				
ZZD2	-25.96~-25.00	0.42	-25.016	**	**	**				0.15	7.158	**	**	**			
ZZH	-25.55~-25.25	0.12	-24.776	**	**	**				0.14	7.386	**	**	**			
ZZD3	-24.80~-24.47	0.12	-24.662	**	**	**				0.04	7.588	**	**	**			
CD2	-24.58~-23.72	0.34	-24.146				**			7.69	7.694	**					
CD1	-24.28~-23.80	0.2	-23.920				**			0.15	7.698	**					
JP	-17.99~-17.86	0.05	-17.910				**			0.19	7.736	**					
Significance				0.679	0.087	0.268	0.802	1.000				1.000	0.375	0.434	0.131	0.247	0.643

注：同一列**标注为同一分组，下同

Note: The same column marked with ** indicated the same group, the same as below

表 3 虾夷扇贝闭壳肌碳氮稳定同位素及 HSD 检测

Tab.3 Stable isotopes in the adductor muscle of *P. yessoensis* and its HSD determination

闭壳肌碳稳定同位素 $\delta^{13}C$ of adductor muscle						闭壳肌氮稳定同位素 $\delta^{15}N$ of adductor muscle											
代码 Code	范围 Range	标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	Alpha = 0.05					标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	Alpha=0.05						
				1	2	3	4	1			2	3	4	5	6		
JP	-22.26~-21.74	0.21	-21.922	**						0.18	5.398	**					
CD1	-21.28~-21.15	0.05	-21.226		**					0.07	7.980	**					
CD2	-20.32~-20.22	0.05	-20.270			**				0.05	8.158	**					
LS	-20.24~-20.13	0.04	-20.266			**				0.09	8.676	**	**				
ZZD2	-19.91~-19.87	0.02	-20.198			**				0.09	8.734	**	**				
HYD	-20.30~-20.09	0.08	-20.182			**				0.09	9.036	**	**	**			
ZZH	-20.32~-20.21	0.04	-20.168			**				0.02	9.300	**			**		
ZZD3	-20.27~-20.06	0.09	-20.142			**				0.06	9.478	**	**	**			
ZZD1	-20.27~-20.08	0.08	-19.886			**	**			0.08	9.908	**			**		
Significance				1.000	1.000	0.254	1.000					1.000	0.083	0.983	1.000	0.083	1.000

表 4 虾夷扇贝内脏团碳稳定性同位素 ANOVA 分析
Tab.4 ANOVA analysis of stable isotopes in the visceral mass of *P. yessoensis*

Source	内脏团稳定性同位素碳 $\delta^{13}\text{C}$ of visceral mass					内脏团稳定性同位素氮 $\delta^{15}\text{N}$ of visceral mass				
	Type III sum of square	df	Mean square	F	Sig.	Type III sum of square	df	Mean square	F	Sig.
Corrected model	232.996 ^a	8	29.125	579.068	0	9.513 ^a	8	1.189	75.218	0
Intercept	26204.939	1	26204.939	521018.975	0	2374.021	1	2374.021	150169.978	0
Places	232.996	8	29.125	579.068	0	9.513	8	1.189	75.218	0
Error	1.811	36	0.050			0.569	36	0.016		
Total	26439.746	45				2384.103	45			
Corrected total	234.807	44				10.082	44			

a. adjusted $R^2=0.992$ a. adjusted $R^2=0.931$

表 5 虾夷扇贝闭壳肌碳稳定性同位素 ANOVA 分析
Tab.5 ANOVA analysis of stable isotopes in the adductor muscle of *P. yessoensis*

Source	闭壳肌碳稳定性同位素 $\delta^{13}\text{C}$ of adductor muscle					闭壳肌稳定性同位素氮 $\delta^{15}\text{N}$ of adductor muscle				
	Type III sum of square	df	Mean square	F	Sig.	Type III sum of square	df	Mean square	F	Sig.
Corrected model	17.291a	8	2.161	259.914	0	69.793a	8	8.724	1043.140	0
Intercept	18862.082	1	18862.082	2268288.860	0	3265.546	1	3265.546	390459.826	0
Places	17.291	8	2.161	259.914	0	69.793	8	8.724	1043.140	0
Error	0.299	36	0.008			0.301	36	0.008		
Total	18879.672	45				3335.640	45			
Corrected total	17.590	44				70.094	44			

a. adjusted $R^2=0.983$ a. adjusted $R^2=0.995$

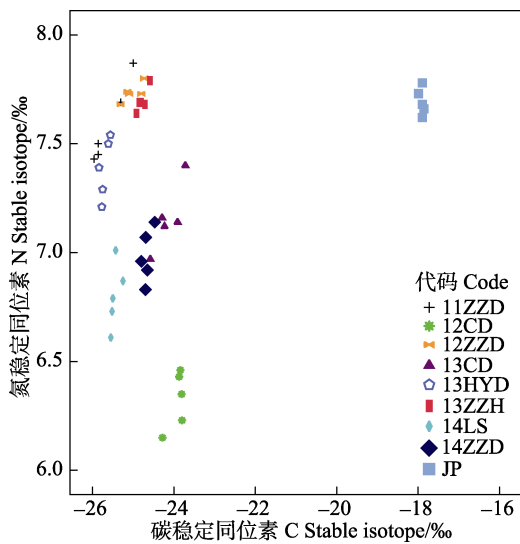


图 1 内脏团碳、氮稳定同位素散点图
Fig.1 $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ of the visceral mass of *P. yessoensis* across all locations

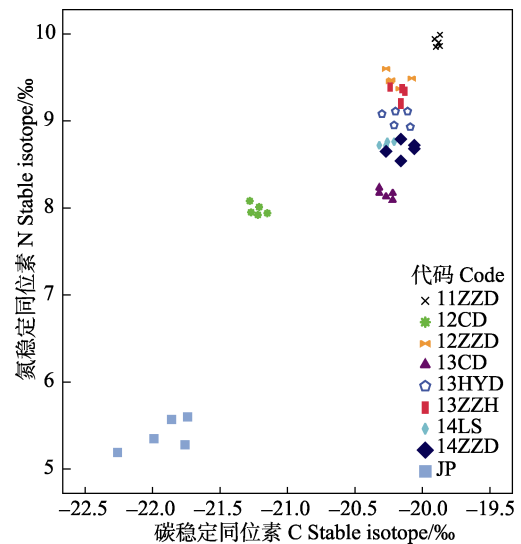


图 2 闭壳肌碳、氮稳定同位素散点图
Fig.2 $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ of the adductor muscle of *P. yessoensis* across all locations

说明虾夷扇贝日本群体与中国群体在相应的生活海域其食性已经发生较大改变。对于中国各群体而言, 群体间的差异性较小, 呈现较高的混杂性, 旅顺自然群体相对于中国各养殖群体并未出现明显的差别, 且与獐子岛海域养殖群体相似度较高。

3 讨论

3.1 稳定同位素技术对群体划分和地理判别的有效性

本研究分析了中国定居的虾夷扇贝的 7 个人工增殖养殖群体及 1 个自然群体的群体稳定性同位素组

成, 并对比其原发群(日本自然群体)。经单因素方差分析、样本 SNK 检验, 结果显示, 在 0.05 的显著性水平下, 9 个虾夷扇贝群体间的差异性相对较为明显, 数值上呈现出一定的分组现象, 且组内呈现较高的同质性($P>0.05$)、组间则具有明显的差异性($P<0.05$)。基于地理位置对 9 个群体的碳、氮稳定同位素值分别进行单因素方差分析, 以确定群体间稳定性同位素值出现差异是否由地理位置不同所导致, 确定地理位置作为效应因素时的效应性。结果表明, 无论是闭壳肌还是内脏团的碳、氮稳定性同位素比值, 其地理位置因素的主效应性均表现为显著水平($P<0.05$), 最少 94.36% 的差异性可由地理位置不同来解释。Wang 等(2016)对小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)群体的地理位置识别研究得出相同的结论; Killingley 等(1980)利用 $\delta^{18}\text{O}$ 研究加利福尼亚灰鲸(*Eschrichtius gibbosus*)在不同海域的生活情况, 也得出类似的结论。然而, 本研究的虾夷扇贝闭壳肌和内脏团稳定同位素比值却并非完全呈现一致的规律性。其主要原因可能是: 一方面稳定同位素测定过程中容易受取样时所摄入未来得及消化的食物影响, 从而对测定结果产生一定的影响; 另一方面, 内脏团组织更新时间短, 而闭壳肌组织更新时间长, 能够反应生物体较长时间甚至一生中食物中稳定同位素的同化率(颜云榕等, 2012)。

3.2 原发群与定居群碳、氮稳定同位素组成差异

针对虾夷扇贝闭壳肌和内脏团, 分别构建碳、氮稳定同位素分布散点图(图 1 和图 2), 从图中可以看出, 虾夷扇贝日本群体和中国群体间的稳定同位素碳、氮的差异显著, 可以明显区分二者。已有研究表明, 动物组织的同位素组成除受食物来源的影响外, 气候、生活环境和代谢类型等因素同样会对同位素营养富集度产生较大的影响, 从而导致不同地域来源的动物组织同位素组成存在差异, 这些差异直接代表群体间的生活环境的差异(Adams *et al.*, 2000; McCutchan *et al.*, 2003)。据此可推断, 虾夷扇贝在引入中国后其摄食习性已经发生了改变。姜涛等(2015)采用稳定同位素碳、氧分析长江口不同群体的刀鲚(*Coilia nasus*)时得出结论表明, $\delta^{13}\text{C}$ 值的不同反映不同群体的个体在生活史过程中饵料组成条件上有所不同, 分析认

为, 这可能是由于其生长海域水体饵料组成和丰度的差异以及地理位置的不同所导致的。

3.3 定居地各群体间碳、氮稳定同位素组成规律

在中国 8 个群体中, 仅长岛 2 个群体稳定性同位素比值与其他 6 个群体有较大差异, 其闭壳肌碳、氮稳定同位素比值均明显低于其余中国群体。这可能与实际地理位置分布中相应的水文环境的差异有着直接的关系, 长岛海域与獐子岛和旅顺相比, 纬度较低, 水温较高, 在面对高温的长期本地化过程中, 一定程度上会导致其摄食速率及代谢速率的降低。而獐子岛 3 个群体、海洋岛养殖群体、“獐子岛红”人工选育品种养殖群体以及旅顺自然群体在稳定性同位素比值上并未呈现明显的差别, 究其原因, 一方面, 獐子岛 3 个群体生长海域相近, 水文环境相同, 且“獐子岛红”人工选育品种的养殖区就位于獐子岛海域, 旅顺海域与獐子岛海域纬度相似、水温相近, 两处海域海流活动密切、海洋环境相似(李文姬等, 2008); 另一方面, 旅顺自然群体虽然在地理位置上与长岛、獐子岛、海洋岛海区有一定的差别, 但是旅顺海区原非虾夷扇贝产区、无虾夷扇贝苗种存在, 现有的虾夷扇贝自然群体本质上来源于附近的养殖海域(李文姬等, 2008)。

3.4 虾夷扇贝在迁移和定居过程的生态适应

虾夷扇贝从其原产地进入中国, 并逐渐演变成为定居种, 面对不同的生存环境, 在适者生存、优胜劣汰的过程中, 为了更好的在定居地实现定居过程, 其生理生化特征也相应发生了一系列的改变。据报道, 獐子岛海域 2011–2012 年浮游植物的浮游细胞数量平均值为 1.1×10^4 个/L, 其中, 硅藻(Bacillariophyta)和甲藻(Dinoflagellate)占浮游植物总数量的大多数(张雪, 2013)¹⁾, 而虾夷扇贝中国群体目前主要摄食硅藻(姜绪, 2013)²⁾, 所以虾夷扇贝定居群体可以较为容易的获得所需营养水平的饵料。研究表明, 虾夷扇贝定居群体内脏团碳稳定同位素低于其原发群, 而闭壳肌碳稳定同位素则呈现为定居群高于原发群的现象。究其原因, 可能是由于定居地环境温度相对高于原产地, 导致其摄食率、代谢水平下降, 而在适应性进化中, 其吸收率却出现了一定程度的上升, 以保证足够的营养来源。有研究认为, 温度变化会对虾夷扇

1) Zhang X. Study on phytoplankton community structure and the relationship with feeding habits of *Patinopecten yessoensis* in the waters adjacent to Zhangzidao Island. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2013 [张雪. 獐子岛邻近水域浮游植物群落结构及其与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)食性关系的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2013]

2) Jiang X. Study on the growth, food source, oxygen consumption and ammonia excretion of scallop *Patinopecten yessoensis* Jay. Master's Thesis of Nanjing Agricultural University, 2013 [姜绪. 底播虾夷扇贝的生长、食物来源及呼吸代谢研究. 南京农业大学硕士研究生学位论文, 2013]

贝的耗氧率、氨氮排泄率及代谢水平产生影响, 当超过 23℃ 时虾夷扇贝基本处于不摄食状态(徐东等, 2010a; 郝振林等, 2014); 然而温度升高会促使其体内消化酶活性增强, 生理代谢处于较高水平, 相应地导致吸收率的增加(徐东等, 2010b)。另外, 个体较小的扇贝具有更强的高温耐受性(袁有宪等, 2000), 这也可能是虾夷扇贝中国定居群体在适应性进化过程中表现出个体小型化的原因。

本研究结果显示, 虾夷扇贝定居地群体与原发地群体相比, 其闭壳肌氮稳定同位素较高, 且均接近已有报道中不同营养级间的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集度平均值(3.4‰)(宋固等, 2014), 表明作为定居种的虾夷扇贝在中国海域其营养生态位已经发生了较大的改变。究其原因, 一方面, 定居地初级生产力的营养组成、饵料组成与原发地不同, 导致其营养层次发生改变; 另一方面, 虾夷扇贝定居群体面对不同的生态环境, 其食性改变、生态效率较低, 也会导致其营养等级的变化。

参 考 文 献

- Adams TS, Sterner RW. The effect of dietary nitrogen content on trophic level ^{15}N enrichment. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 601–607
- Benstead JP, March JG, Fry B, *et al.* Testing isosource: Stable isotope analysis of a tropical fishery with diverse organic matter sources. *Ecology*, 2006, 87(2): 326–333
- Cai DL, Li HY, Tang QS, *et al.* The continuous nutrition spectrum of ecosystem food web in the Yellow Sea and the East Sea. *Science in China Ser. C Life Sciences*, 2005, 35(2): 123–130 [蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 等. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立: 来自碳氮稳定同位素方法的结果. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123–130]
- Cai DL, Zhang SF, Zhang J. Applications of stable carbon and nitrogen isotope methods in ecological studies. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(2): 287–295 [蔡德陵, 张淑芳, 张经. 稳定碳、氮同位素在生态系统研究中的应用. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(2): 287–295]
- Chang YQ, Chen XX, Ding J, *et al.* Genetic diversity in five scallop populations of the Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1145–1152 [常亚青, 陈晓霞, 丁君, 等. 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*) 5 个群体的遗传多样性. *生态学报*, 2007, 27(3): 1146–1152]
- Chen SX. The culture of scallop in Mutsu Bay. *China Fisheries*, 1988(5): 40 [陈思行. 日本陆奥湾的扇贝养殖. *中国水产*, 1988(5): 40]
- Deniro MJ, Epstein S. Mechanism of carbon isotope fractionation associated with lipid synthesis. *Science*, 1977, 197(4300): 261–263
- Guo XP, Li ZY, Jin XS, *et al.* Feeding habit study of anchovy (*Engraulis japonicus*) in the central and southern part of the Huanghai Sea with stable isotope techniques. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2): 98–104 [郭旭鹏, 李忠义, 金显仕, 等. 采用碳氮稳定同位素技术对黄海中南部鳀鱼食性的研究. *海洋学报*, 2007, 29(2): 98–104]
- Hao ZL, Tang XJ, Ding J, *et al.* Survival rate, oxygen consumption rate and immune enzymetic activity of *Mizuhopecten yessoensis* at high temperature. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1580–1586 [郝振林, 唐雪娇, 丁君, 等. 不同高温水平对虾夷扇贝存活率、耗氧率和体腔液免疫酶活力的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1580–1586]
- Hobson KA, Welch HE. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 84(1): 9–18
- Ji WW, Jiang YZ, Ruan W, *et al.* Stable isotope analysis on the feeding character of representative fishes during spring in central and northern East China Sea and South Yellow Sea. *Marine Fisheries*, 2013, 35(4): 415–422 [纪炜炜, 姜亚洲, 阮雯, 等. 基于稳定同位素方法分析东海中北部及黄海南部春季主要鱼类的食性特征. *海洋渔业*, 2013, 35(4): 415–422]
- Jiang T, Liu HB, Yang J. Characteristics of C and O stable isotope in otolith of juvenile *Coilia nasus* from the Changjiang River Estuary. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 48–53 [姜涛, 刘洪波, 杨健. 长江口刀鲚幼鱼耳石碳、氧同位素特征初报. *海洋科学*, 2015, 39(6): 48–53]
- Killingley JS. Migrations of California gray whales tracked by oxygen-18 variations in their epizoic barnacles. *Science*, 1980, 207(4432): 759–760
- Li WJ, Teng WM, Wang XY, *et al.* The gonadal development and life cycle in Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* in northern Yellow Sea. *Fisheries Science*, 2012, 31(12): 703–707 [李文姬, 滕炜鸣, 王笑月, 等. 黄海北部虾夷扇贝性腺发育及繁殖规律研究. *水产科学*, 2012, 31(12): 703–707]
- Li WJ, Xue ZF, Li HL, *et al.* Research on the source of yesso scallop *Patinopecten yessoensis* larvae along the coast of Bohai in Dalian. *Fisheries Science*, 2008, 27(11): 588–591 [李文姬, 薛真福, 李华琳, 等. 大连旅顺渤海侧沿海虾夷扇贝幼虫来源调查. *水产科学*, 2008, 27(11): 588–591]
- Li WJ, Xue ZF, Li HL, *et al.* Scallop (*Patinopecten yessoensis*) larva collection from sea. *Fisheries Science*, 2007, 26(5): 259–262 [李文姬, 薛真福, 李华琳, 等. 虾夷扇贝海区采苗技术初步研究. *水产科学*, 2007, 26(5): 259–262]
- Li ZY, Jin XS, Zhuang ZM, *et al.* Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3052–3060 [李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052–3060]
- Liu YF. The culture of *Patinopecten yessoensis* in Japan. *Fisheries Science*, 1983, (1): 14–19 [刘永丰. 日本的虾夷扇贝养殖. *水产科学*, 1983(1): 14–19]
- McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C, *et al.* Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 2003, 102(2): 378–390
- Peterson BJ, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987(18): 293–320
- Song G, Hu MH, Liu QG. Study on the feeding habits and trophic levels of the gillnet catches of Qiandao Lake in autumn by stable isotope technology. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(1): 117–122 [宋固, 胡梦红, 刘其根. 运用稳定同位素技术研究千岛湖秋季刺网渔获物的食性和营养级. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(1): 117–122]
- Wang QC, Liu YF. The artificial seed-rearing of *Patinopecten yessoensis*. *Fisheries Science*, 1982(2): 1–9 [王庆成, 刘永峰. 虾夷扇贝人工育苗的试验. *水产科学*, 1982(2): 1–9]
- Wang Y, Huang J, Tang X, *et al.* Stable isotopic composition of otoliths in identification of stock structure of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(6): 29–33

- Xu D, Zhang JH, Wang WQ, *et al.* Effects of temperature elevation on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Patinopecten yessoensis*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010a, 17(5): 1101–1106 [徐东, 张继红, 王文琪, 等. 温度变化对虾夷扇贝耗氧率和排氨率的影响. *中国水产科学*, 2010a, 17(5): 1101–1106]
- Xu D, Zhang JH, Wang WQ, *et al.* Research on feeding physiology of scallop *Patinopecten yessoensis*. *Progress in Fishery Sciences*, 2010b, 31(4): 85–91 [徐东, 张继红, 王文琪, 等. 虾夷扇贝的摄食生理研究. *渔业科学进展*, 2010b, 31(4): 85–91]
- Yan YR, Zhang WK, Lu HS, *et al.* Using stable isotopes to analyze feeding habits and trophic position of Hairtail (*Trichiurus lepturus*) from the Beibu Gulf, South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(1): 192–200 [颜云榕, 张武科, 卢伙胜, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究北部湾带鱼(*Trichiurus lepturus*)食性及营养级. *海洋与湖沼*, 2012, 43(1): 192–200]
- Yuan YX, Qu KM, Chen JF, *et al.* Adaptability of *Chlymys farreri* to environment—Effects of temperature on survival, respiration, ingestion and digestion. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, 7(3): 24–27 [袁有宪, 曲克明, 陈聚法, 等. 栉孔扇贝对环境变化适应性研究——温度对存活、呼吸、摄食及消化的影响. *中国水产科学*, 2000, 7(3): 24–27]
- Zhang FS, He YC, Ma JH, *et al.* The introduction of the Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis* (Jay), into China, its spat-rearing and experimental cultivation. *Marine Sciences*, 1984, 8(5): 38–45 [张福绥, 何义朝, 马江虎, 等. 虾夷扇贝的引种、育苗及试养. *海洋科学*, 1984, 8(5): 38–45]
- Zhang XD, Zhang WL, Li YB. Characteristics of the sea temperature in the North Yellow Sea. *Marine Forecasts*, 2015, 32(5): 89–97 [张绪东, 张菀伦, 李云波. 北黄海水温分布变化的数值模拟分析. *海洋预报*, 2015, 32(5): 89–97]

(编辑 马瑾艳)

Ecological Adaptability of Different Geographical Populations of *Patinopecten yessoensis* in the Northern Yellow Sea

YANG Yu^{1,2,3}, NI Shousheng^{2,3,4}, LIU Yi², LIU Shufang^{2,3①}, ZHUANG Zhimeng²

- (1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071; 4. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

Abstract *Patinopecten yessoensis* is a cold-water bivalve commonly found in northwestern Pacific area including northern Japan, the Far East of Russian and the northern Korean Peninsula. It was introduced to China from the Mutsu Bay (Aomori Prefecture, Japan) and was aqua-farmed in the coast of the Bohai Sea and the north of the Yellow Sea in 1982. In this study, we applied stable isotope tracer technique on samples from different geographical populations of *P. yessoensis* to characterize their ecological adaptability in the northern Yellow Sea of China. Samples were collected from the bottom sowing population from Shandong Changdao, Liaoning Haiyangdao and Zhangzidao, the artificial population of Zhangzidao-Red, the natural colonized population in Liaoning Lvshun and the original natural population in the Aomori Mutsu Bay of Japan. The results showed that the $\delta^{13}\text{C}$ value of the adductor muscle and the visceral mass of *P. yessoensis* were $-20.47\text{‰}\pm 0.66\text{‰}$ and $-24.13\text{‰}\pm 2.41\text{‰}$ respectively; the $\delta^{15}\text{N}$ values of the two tissues were $8.52\text{‰}\pm 1.32\text{‰}$ and $7.26\text{‰}\pm 0.49\text{‰}$ respectively. Analysis of variance (ANOVA) indicated significant variances in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of the visceral mass and the adductor muscle among different populations; the scatter plot of $1\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ for the two tissues across all samples showed apparent difference between the Chinese and Japanese populations. Among the 8 populations in China, the value of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ of the Changdao population was lower than those of other groups. These results indicated that significant divergences emerged between the Chinese and Japanese populations of *P. yessoensis*, as well as between different populations in China. This phenomenon could be explained by the ecological adaptability developed during the settlement in different environments. Our study helped understand the ecological adaptation process of the scallop *P. yessoensis* in the Yellow Sea, and provided useful information for promoting the economic benefits and sustainable development of the scallop culture industry in China.

Key words *Patinopecten yessoensis*; Geographical population; Stable isotope; Ecological adaptability

① Corresponding author: LIU Shufang, E-mail: liusf@ysfri.ac.cn