

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.00189

应用氮稳定同位素技术研究辽东湾海域主要渔业生物的营养级

孙明, 刘修泽, 李轶平, 董婧

辽宁省海洋水产科学研究院 辽宁省海洋生物资源与生态学重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 应用氮稳定同位素技术分析了 2010 年 6 月和 8 月辽东湾海域主要渔业生物的氮稳定同位素比值, 研究了 28 种鱼类和 26 种无脊椎动物的营养位置。结果表明, 辽东湾海域主要渔业生物的营养级处于 2.98 ~ 4.84, 集中在 3.70 ~ 4.56; 相比 6 月 $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析结果, 8 月有 50% 的鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加, 孔鲷(*Raja porosa*)增幅最大, 增加了 1.06‰; 9 种鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值减少, 鲷(*Platycephalus indicus*)减幅最大, 减少了 1.84‰, 可见鱼类样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化因种类而各异; 8 月有 87.5% 的无脊椎动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值减少, 其中, 减少幅度大于 1‰ 的有 6 种, 占 37.5%, 可见无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化较明显。通过对不同采样点同种生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的比较发现, 辽东湾近岸海域的 10 种无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均高于远岸海域, 差值范围为 0.05‰ ~ 1.49‰, 差异极显著($P < 0.01$), 说明人类活动引起的陆源污水排放使近岸海洋生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高。

关键词: 辽东湾; 氮稳定同位素; 营养级; 鱼类; 无脊椎动物

中图分类号: Q148, S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)01-0189-09

近年来, 稳定同位素技术被广泛应用于海洋生态系统的研究中, 为海洋生态学家研究海洋生物食性、食物网结构特征、生物之间的营养关系以及污染物示踪等问题提供了一条捷径^[1-4]。营养级研究是揭示海洋生态系统结构和功能变化规律的基础^[5-6]。传统的方法主要是胃含物分析法, 该方法需要的样品数量大, 分析时间长, 且仅能反映生物体被采集时的瞬时状态。氮稳定同位素由于富集因子较高(3‰~5‰), 常用来确定生物的营养层次^[7-8], 由于其检测快速、结果准确, 且可反映生物体长期新陈代谢的结果, 可以弥补传统胃含物分析法的许多缺陷^[9]。

辽东湾位于渤海东北部, 为中国北方传统渔业生产的重要渔场和渔业资源增殖放流的天然牧场。近些年, 辽东湾沿海城市经济得到快速发展,

沿海陆域排入近海的污染物迅速增加, 使辽东湾近岸海域水质恶化, 生态系统已受到严重威胁^[10]。目前针对辽东湾海域生态系统食物网的研究较少, 邓景耀等^[11]研究了渤海主要生物种间关系及食物网, 杨纪明^[12-13]研究了渤海鱼类和无脊椎动物的食性和营养级, 这些研究仅从传统的胃含物分析法对海洋食物网进行了初步研究, 而应用稳定同位素技术对辽东湾海域主要生物资源营养级的研究尚未见报道。本研究以 2010 年 6 月和 8 月在辽东湾海域进行的底拖网调查所获得的主要生物资源为研究对象, 应用氮稳定同位素技术分析了不同季节主要渔业生物的氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)变化, 研究了辽东湾主要鱼类和无脊椎动物的营养级, 并通过辽东湾近岸与远岸海域的同种生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的对比分析结果, 说明了人类活动

收稿日期: 2012-02-28; 修订日期: 2012-06-01.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403601); 海洋公益性行业科研专项项目(200905019); 中国近海海洋综合调查与评价-908 辽宁专项项目(LN-908-01-01-06)

作者简介: 孙明(1981-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋生物生态研究. E-mail: sunming0408@163.com.

通信作者: 董婧, 研究员. E-mail: dj660228@tom.com

对海洋生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响。研究结果有利于掌握辽东湾海洋生态系统现阶段的动态变化规律,旨在为对该海域做进一步生态系统研究与海洋环境保护提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

样品取自 2010 年 6 月和 8 月在辽东湾水域 ($39^{\circ}30'\text{N} \sim 40^{\circ}55'\text{N}$, $120^{\circ}30'\text{E} \sim 122^{\circ}16'\text{E}$) 进行的定点拖网调查(图 1)。调查海域水深在 5 ~ 30 m 之间。生物样品随机取样(每种至少 5 尾,5 尾以下的全部取样),样品冷冻保存带回实验室后化冻,鱼类取其背部肌肉,虾类取其腹部肌肉,蟹类取其第一鳌足肌肉,头足类取其腕部肌肉,螺类去壳取肌肉,贝类取闭壳肌。所有样品处理完后在电热鼓风干燥箱(DHG-9145A)中 70°C 烘干至恒重,用研钵磨碎,共 256 个生物样品,每个样品分别测氮值。研究共分析了 54 种海洋生物,其中 6 月和 8 月分别为 41 种和 47 种。

1.2 氮稳定同位素测定与数据分析

所有样品在中国科学院植物研究所生态与环

境科学稳定同位素实验室进行测定,稳定同位素质谱仪为菲尼根 Flash EA1112 元素分析仪与菲尼根 Delta V Advantage 同位素比率质谱仪相连而成。氮稳定同位素比值以国际通用的 δ 值表示,定义为:

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left[\frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{standard}}}{\delta^{15}\text{N}_{\text{standard}}} \right] \times 1000$$

式中, $\delta^{15}\text{N}$ 为生物的氮同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}$ 为样品氮同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{standard}}$ 为标准样氮同位素比值。 δ 值越小表示样品中同位素(^{15}N)含量越低, δ 值越大表示样品中同位素(^{15}N)含量越高, $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 营养级的计算

营养级计算公式如下:

$$\text{TL} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + 2$$

式中, TL 表示所计算生物的营养级, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为系统消费者氮稳定同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 则为该系统基准生物的氮稳定同位素比值, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为营养级的富集度。根据所关注的生态学问题,参考 Vender Zanden 等^[14-15]与徐军等^[16]对基准生物选择

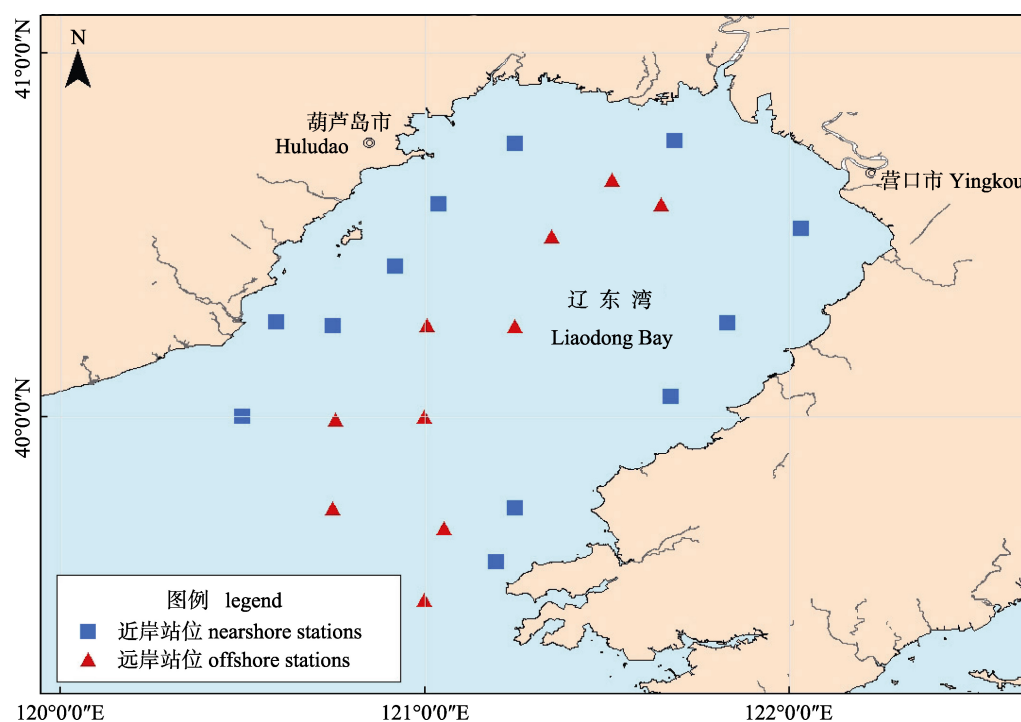


图 1 取样站位图

Fig. 1 Map of the sampling sites

的建议, 本研究采用初级消费者栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 闭壳肌的氮同位素比值(5.84‰)为氮稳定同位素基线值, 营养富集因子则同时采用 2.5‰和 3.8‰, 为两者的平均值, 其中 2.5‰来源于蔡德陵等^[17]在实验室控制饲养条件下所喂鳃与其饵料间的氮稳定同位素差值, 3.8‰为万祎等^[18]测定渤海湾水生食物网氮稳定同位素的富集因子。

采用 *t* 检验(成对双样本均值分析), 对辽东湾近岸与远岸海域的同种生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行差异分析, 对上述公式的计算和数据处理、分析均通过 Microsoft Excel 和 SPSS13.0 软件完成。实验数据用平均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm \text{SD}$)表示。

2 结果与分析

2.1 主要生物资源 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析

如表 1 所示, 6 月和 8 月共测定氮稳定同位素样品 256 个, 其中, 鱼类样品 28 种 127 尾, 分别隶属于 5 目 18 科, 无脊椎动物 26 种 129 个, 分别隶属于 9 目 18 科。鱼类氮稳定同位素范围为 9.87‰[斑尾复虾虎鱼(*Synechogobius ommaturus*)]~17.02‰[矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)]。无脊椎动物氮稳定同位素范围为 6.87‰[日本关公蟹(*Dorippe japonica*)]~16.35‰[日本枪乌贼(*Loligo japonica*)]。

6 月调查采集鱼类样品 22 种 57 尾, 分别隶属于 6 目 16 科, 无脊椎动物 19 种 57 个, 分别隶属于 9 目 16 科。鱼类氮稳定同位素范围为 11.28‰[绵鲷(*Zoarces elongatus*)]~17.02‰(矛尾虾虎鱼)。无脊椎动物氮稳定同位素范围为 8.78‰[毛蚶(*Sopharca subcrenata*)]~16.35‰(日本枪乌贼)。8 月调查采集鱼类样品 24 种 70 尾, 分别隶属于 6 目 16 科, 无脊椎动物 23 种 72 个, 分别隶属于 8 目 17 科。鱼类氮稳定同位素范围为 9.87‰(斑尾复虾虎鱼)~14.66‰(斑尾复虾虎鱼)。无脊椎动物氮稳定同位素范围为 6.87‰(日本关公蟹)~13.86‰[日本蟳(*Charybdis japonica*)]。

与 6 月分析结果相比较, 8 月鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加的有黄鲛鰈(*Lophius litulon*)、细纹鲷子鱼(*Liparis tanakae*)、大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)、方氏

云鲷(*Enedrias fangi*)、红狼牙虾虎鱼(*Odonamblyopus rubicundus*)、李氏鲷(*Callionymus richardsoni*)、中华栉孔虾虎鱼(*Ctenotrypauchen chinensis*)、孔鲷(*Raja porosa*)和绵鲷(*Zoarces elongatus*)9 种, 占可比较的鱼类种类数的 50%, 最大增加 1.06‰(孔鲷)。而在 $\delta^{15}\text{N}$ 值减少的 9 种鱼类中, 最大减少值为 1.84‰[鲷(*Platycephalus indicus*)]。可见鱼类样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化因种类而各异。无脊椎动物可比较的种类有 16 种, 其中仅有泥脚隆背蟹(*Carcinoplax vestita*)和脉红螺(*Rapana venosa*)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 8 月比 6 月略有增加, 仅占可比较的无脊椎动物种类数的 12.5%, 且 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加较小(脉红螺 0.08‰; 泥脚隆背蟹 0.1‰)。其余 14 种无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均有减少, 占可比较的无脊椎动物种类数的 87.5%, 其中, 减少幅度大于 1‰的有 6 种, 占 37.5%, 最大为日本关公蟹, 减少 4.95‰。可见无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化较明显。

2.2 营养位置

图 2 列出了两个航次所采集的 28 种鱼类和 26 种无脊椎动物共 54 种生物的营养级。辽东湾生态系统主要渔业生物的营养级位于 2.98~4.84 之间, 集中在 3.70~4.56 之间。营养级大于 4.00 的生物种类数量占了总生物种类数量的 64.81%, 营养级处于 3.00~3.99 的生物种类数量占了总生物种类数量的 33.33%。其中, 鱼类营养级范围在 3.80~4.84 之间, 无脊椎动物营养级范围在 2.98~4.50 之间。

2.3 辽东湾近岸与远岸海域主要鱼类和无脊椎动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析比较

从上述主要渔业生物种类中选取辽东湾近岸和远岸站位的样品数量均大于 2 的活动能力较弱种类, 进行同种类间海域差异比较, 结果表明, 辽东湾近岸海域 10 种生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 10.09‰(脉红螺)~13.43‰[口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)], 平均值为 12.10‰。远岸海域 10 种生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 9.59‰(脉红螺)~13.27(口虾蛄), 平均值为 11.49‰。经检验, 近岸与远岸海域的这 10 种生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异极显著($P < 0.01$)。由

表 1 辽东湾主要渔业生物的氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)、样品全长(L)及样品数量(n)
 Tab. 1 Stable nitrogen isotope ratio($\delta^{15}\text{N}$), length(L) and numbers(n) for the main fishery organisms in Liaodong Bay

种类 species	6 月 June			8 月 August			$\Delta\delta^{15}\text{N}$
	$\delta^{15}\text{N}\pm\text{SD}/\text{‰}$	L/mm	n	$\delta^{15}\text{N}\pm\text{SD}/\text{‰}$	L/mm	n	
黄鲛鰈 <i>Lophius litulon</i>	13.94	380	1	14.42 $\pm$ 0.18	123–162	5	0.47
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	14.44 $\pm$ 1.69	94–180	5	13.55 $\pm$ 1.55	103–178	5	–0.90
牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	13.55	465	1	—	—	—	—
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	13.80 $\pm$ 1.05	120–149	5	12.93 $\pm$ 0.49	101–137	5	–0.87
斑纹狮子鱼 <i>Liparis maculatus</i>	—	—	—	13.31 $\pm$ 0.68	150–195	5	—
日本枪乌贼 <i>Loligo japonica</i>	14.35 $\pm$ 2.83	71–95	2	12.15 $\pm$ 0.11	82–84	2	–2.20
金乌贼 <i>Sepia esculenta</i>	—	—	—	13.24	166	1	—
银鲳 <i>Stromateoides argenteus</i>	13.20 $\pm$ 0.31	107–112	2	—	—	—	—
细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i>	12.76 $\pm$ 0.18	193–198	2	13.34 $\pm$ 0.28	110–180	4	0.58
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengeri</i>	13.77 $\pm$ 0.48	134–170	5	12.01 $\pm$ 0.80	78–158	3	–1.76
鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	14.24 $\pm$ 0.34	233–335	3	12.39 $\pm$ 0.67	130–180	5	–1.84
赤鼻棱鲷 <i>Thrissa kammalensis</i>	—	—	—	13.05	135	1	—
半滑舌鲷 <i>Cynoglossus semilaevis</i>	13.51 $\pm$ 0.22	220–347	2	12.58 $\pm$ 0.89	196–245	2	–0.94
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	13.54 $\pm$ 1.00	110–145	2	12.59 $\pm$ 1.15	90–105	4	–0.95
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	12.73 $\pm$ 0.75	65–263	5	13.09 $\pm$ 0.46	112–205	4	0.37
方氏云鲷 <i>Enedrias fangi</i>	12.86 $\pm$ 0.33	168–169	2	12.91	160	1	0.05
脊尾白虾 <i>Palaemon carinicauda</i>	—	—	—	12.89 $\pm$ 0.76	46–64	2	—
小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyactis</i>	13.15 $\pm$ 0.68	140–200	5	12.56 $\pm$ 0.85	87–176	5	–0.59
黑斑狮子鱼 <i>Liparis choanus</i>	12.98	150	1	12.70	123	1	–0.28
香螺 <i>Neptunea arthritica cumingii</i>	12.92 $\pm$ 0.79	80–85	2	12.65	81	1	–0.27
焦氏舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i>	12.99 $\pm$ 1.71	110–197	5	12.61 $\pm$ 0.83	122–165	5	–0.37
红狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus rubicundus</i>	12.42 $\pm$ 0.38	99–105	2	13.12 $\pm$ 0.64	135–200	2	0.71
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	13.08 $\pm$ 0.88	55–60	5	12.44 $\pm$ 0.46	32–67	5	–0.63
日本螯 <i>Charybdis japonica</i>	13.06 $\pm$ 0.98	55–83	5	12.38 $\pm$ 1.41	33–65	5	–0.68
中华虎头蟹 <i>Orithya sinica</i>	13.80	72	1	11.63	50	1	–2.17
斑尾复虾虎鱼 <i>Synechogobius ommaturus</i>	—	—	—	12.72 $\pm$ 1.93	155–195	5	—
脊腹褐虾 <i>Crangon affinis</i>	13.52 $\pm$ 0.31	62–68	2	12.29 $\pm$ 0.38	56–67	4	–1.24
许氏平鲉 <i>Sebastes schlegeli</i>	12.98 $\pm$ 0.87	125–221	5	12.37 $\pm$ 0.67	65–175	5	–0.61
李氏鲈 <i>Callionymus richardsoni</i>	12.40 $\pm$ 0.17	113–115	2	13.18	102	1	0.78
石鲈 <i>Platichthys bicoloratus</i>	12.66	225	1	—	—	—	—
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	—	—	—	12.46 $\pm$ 0.44	57–65	5	—
中华栉孔虾虎鱼 <i>Ctenotrypauchen chinensis</i>	12.18	100	1	12.65	105	1	0.47
孔鲷 <i>Raja porosa</i>	11.92 $\pm$ 0.82	222–325	3	12.98	250	1	1.06
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	12.75	145	1	11.56 $\pm$ 1.35	21–65	2	–1.19
红线黎明蟹 <i>Matuta planipes</i>	—	—	—	11.96	40	1	—
泥脚隆背蟹 <i>Carcinoplax vestita</i>	11.75 $\pm$ 1.22	24–32	4	11.85 $\pm$ 0.34	18–23	5	0.10
绵鲷 <i>Zoarcetes elongatus</i>	11.28	233	1	12.22	157	1	0.94
斑鲷 <i>Clupanodon punctatus</i>	—	—	—	11.75	117	1	—

续表 1

种类 species	6 月 June			8 月 August			$\Delta\delta^{15}\text{N}$
	$\delta^{15}\text{N}\pm\text{SD}/\text{‰}$	L/mm	n	$\delta^{15}\text{N}\pm\text{SD}/\text{‰}$	L/mm	n	
裸项栉虾虎鱼 <i>Ctenogobius gymnauchen</i>	—	—	—	11.71 $\pm$ 0.31	85–91	2	—
短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>	—	—	—	11.59 $\pm$ 1.28	108–152	2	—
黄盖鲽 <i>Pseudopleuronectes yokohamae</i>	11.28	105	1	—	—	—	—
鲜明鼓虾 <i>Alpheus heterocarpus</i>	11.44 $\pm$ 0.19	50–68	5	11.09 $\pm$ 0.41	50–70	5	–0.35
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	11.55 $\pm$ 1.00	48–52	2	11.01 $\pm$ 0.42	50–60	5	–0.54
木叶鲽 <i>Pleuronichthys cornutus</i>	—	—	—	11.16	180	1	—
中国明对虾 <i>Fenneropenaeus chinensis</i>	—	—	—	11.13 $\pm$ 0.69	141–180	5	—
长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	11.50 $\pm$ 1.01	62–915	5	10.69 $\pm$ 1.07	340–840	4	–0.81
扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>	11.14 $\pm$ 0.89	28–35	5	10.05	30	1	–1.09
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	—	—	—	10.54	39	1	—
毛蚶 <i>Soapharca subcrenata</i>	10.32 $\pm$ 1.90	20–36	4	—	—	—	—
密鳞牡蛎 <i>Ostrea denselamellosa</i>	10.01	68	1	—	—	—	—
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	9.85 $\pm$ 0.68	100–142	5	9.93 $\pm$ 1.37	70–99	5	0.08
饼干镜蛤 <i>Veneridae dosinia biscocta</i>	9.40	39	1	—	—	—	—
魁蚶 <i>Soapharca broughtonii</i>	9.15	100	1	8.86 $\pm$ 0.49	90–105	3	–0.30
日本关公蟹 <i>Dorippe japonica</i>	12.10	22	1	7.14 $\pm$ 0.38	22–25	2	–4.95

注: “—”表示因未采集到样品而未测量的数据。
Note: “—”denotes no samples.

图 3 可知, 相对远岸海域, 辽东湾近岸海域 10 种生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均有所增加, 增加幅度为 0.05‰[泥脚隆背蟹 (*Carcinoplax vestita*)]~1.49‰[扁玉螺 (*Neverita didyma*)], 平均为 0.61‰。由此可见, 辽东湾近岸海域活动能力较弱生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均高于远岸海域。

3 讨论

3.1 氮稳定同位素值的季节变化

已有研究表明, 有的鱼类饵料组成的季节变化较明显, 有的则变化不明显^[19]。本研究结果表明, 鱼类样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化因种类而各异, 变化较大的有皮氏叫姑鱼、鲷和孔鳐等, 均为主要摄食小型鱼类、虾类和头足类的底栖中级消费者^[11, 13, 20]。其饵料生物的季节消长可能是导致这些鱼类 $\delta^{15}\text{N}$ 值季节变化的主要原因。张雅芝^[21]研究表明, 东山湾叫姑鱼夏季摄食短尾类、蛇尾类和鱼类的比例均比春季有所增加, 摄食瓣鳃类增加幅度较大, 摄食端足类、多毛类和人工钓饵

则明显减少。皮氏叫姑鱼的食物组成随季节的不同而有显著的差异^[22]。鲷和孔鳐饵料生物的季节变化未见报道, 今后有待进一步研究印证。无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随季节的变化较明显, 变化较大的有脊腹褐虾、日本枪乌贼、扁玉螺、三疣梭子蟹、中华虎头蟹和日本关公蟹等底栖生物食性的次级或中级消费者, 多为食性较杂的广食性种类^[12, 23], 其 $\delta^{15}\text{N}$ 值的季节变化可能主要与饵料生物的种类变化有关。还应考虑到这几种无脊椎动物的采集数量均较少, 样本量过低所引起的随机误差亦可能是导致此现象的重要因素。此外, 许多研究已表明生物体大小对其 $\delta^{15}\text{N}$ 有一定的影响^[24–25], 因为随着生物体的不断增长, 不仅其体内 $\delta^{15}\text{N}$ 值会不断富集^[26], 有些种类也会因其口器大小的变化和食物喜好的选择差异等原因而使其体内 $\delta^{15}\text{N}$ 值发生变化^[27], 但并不是所有的生物种类都遵循这些规律^[28]。因此, 无论是生物个体、种群、群落还是整个食物网的稳定同位素特征都存在着时间与空间的动态变化^[29–31]。由于本研究对比的季节

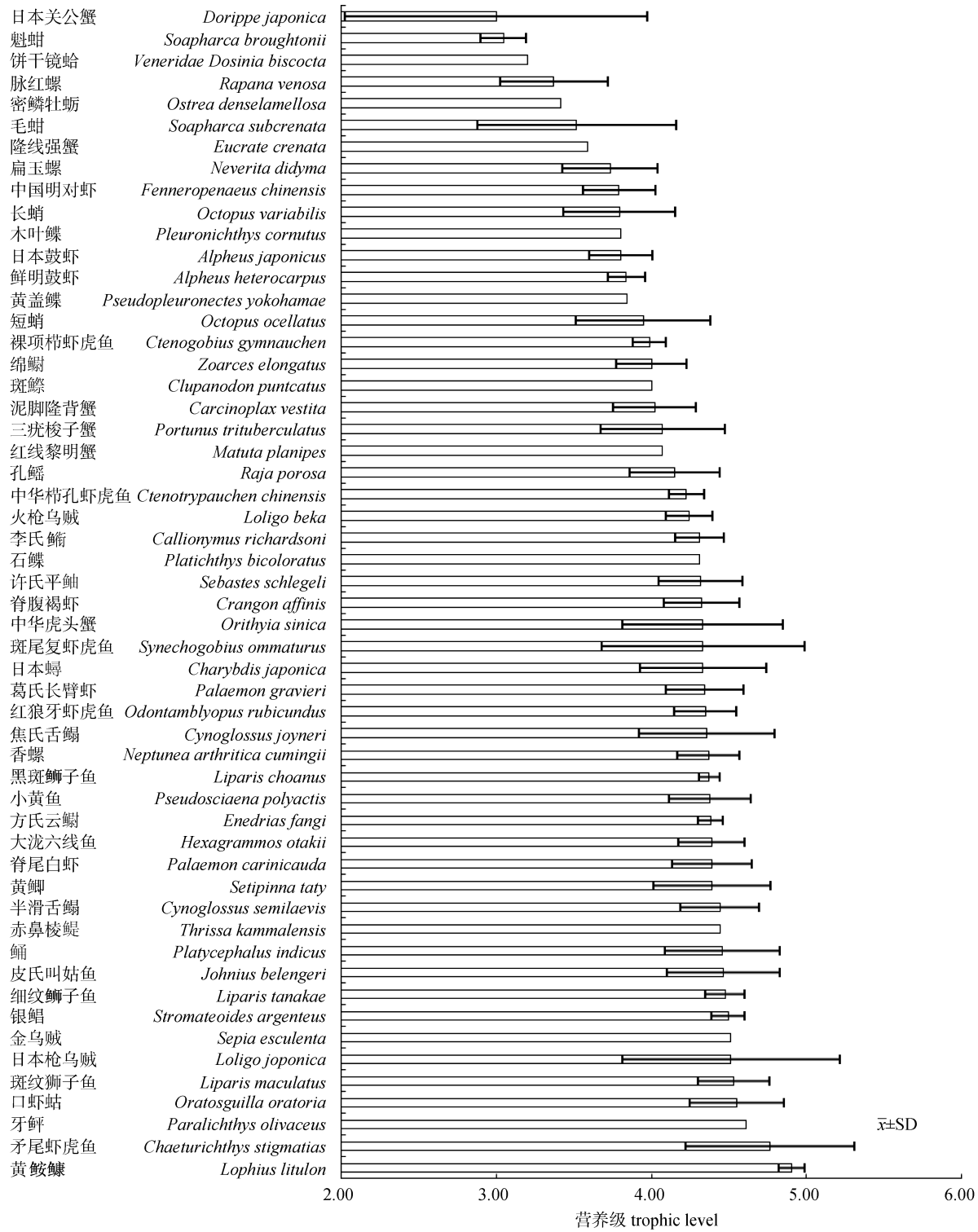
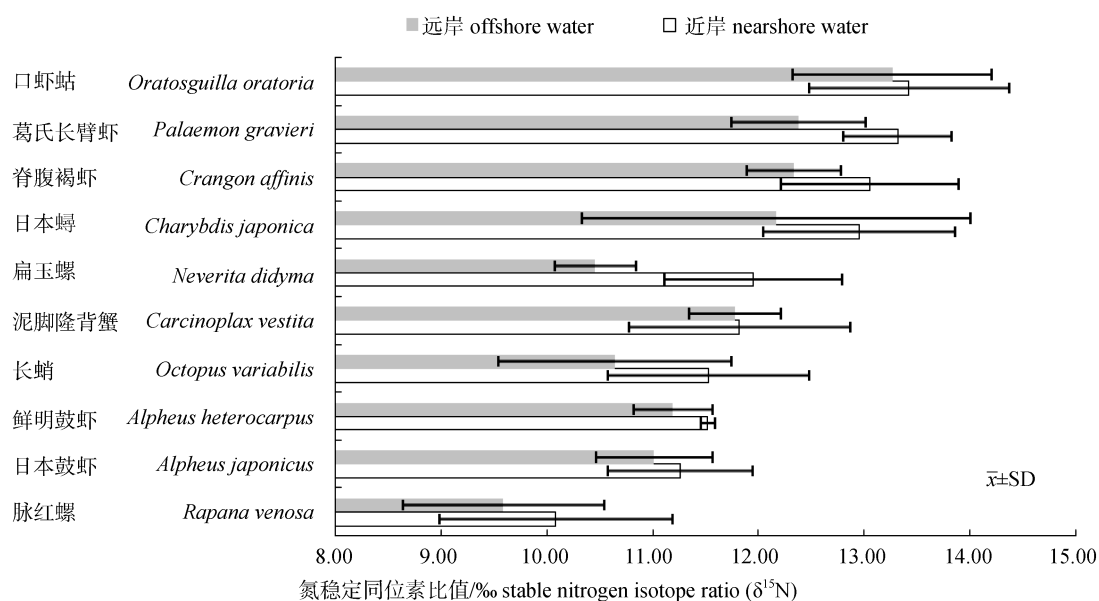


图 2 辽东湾主要渔业生物的营养级
Fig. 2 Trophic level(TL) for the main fishery organisms in Liaodong Bay

时间相差较短, 部分生物种类采集数量较少, 在今后的研究中还需累积生物种类数量, 进一步针对各种类海洋生物稳定同位素的季节变化做长期连续的分析研究。

3.2 生物相对营养位置
基准生物的正确选择及其基准同位素的准确性对研究不同层次与尺度的生态学问题至关重要^[16, 30]。本研究对象以底栖生物食性的中下层鱼

图 3 辽东湾近岸与远岸海域 10 种无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比较Fig. 3 $\delta^{15}\text{N}$ value comparison of selected invertebrate in nearshore water and offshore water of Liaodong Bay

类和无脊椎动物为主, 针对所研究的生态学问题, 选择栉孔扇贝作为基准生物, 主要因为栉孔扇贝作为营养位置较低的初级消费者, 相对于其他生物, 其具有生命周期较长, 对环境变化响应缓慢, 活动范围较小以及分布广泛的特征, 能综合反映初级生产者的同位素特征, 可用作环境中营养关系水平的中长期综合指示生物^[30]。将本研究结果与杨纪明等^[12-13]用胃含物分析法对渤海主要鱼类和无脊椎动物营养级的研究结果进行对比, 发现本研究中, 鲷和孔鲷的营养级略有下降, 其他可比较的 13 种鱼类和 10 种无脊椎动物的营养级均相对较高, 其中, 斑鲷、赤鼻棱鳀和脊腹褐虾超过 1 个营养级。鲷和孔鲷均为主要摄食小型鱼类、虾类、蟹类等底栖生物的中级肉食性鱼类^[11]。斑鲷和赤鼻棱鳀以浮游生物或有机碎屑为主要饵料^[11, 13, 32-33], 脊腹褐虾主要摄食双壳类、甲壳类等底栖生物^[12], 它们均为低级肉食性生物。比较结果表明, 多数低级肉食性生物营养级增加, 个别中级肉食性鱼类的营养级略有下降。邓景耀等^[11]报道, 1992—1993 年低级肉食性鱼类营养级较 10 年前有所增加, 中、高级肉食性鱼类营养级则降低, 本研究结果与之相一致。此外, 分析方法的的不同也可能造成结果的差异。由于渤海范围内

可进行比较的文献较少, 将本研究结果与李忠义等^[34]用稳定同位素法对南黄海主要拖网渔获物的营养级研究结果进行对比, 发现有 5 种鱼类和 3 种无脊椎动物的营养级相差不大, 范围为 0.01~0.57。

3.3 人类活动对海洋生态系统的影响

许多研究都指出, 人类活动产生的污水排放会引起食物网中生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高^[35-37]。Nixon 等^[35]研究表明, 相对居住人口密度小的上游流域, 加纳泻湖下游人口高密流域中鱼(*Liza falcipinnis*、*Sarotherodon melanothron*)、虾(*Penaeus notialis*)、蟹(*Callinectes latimanus*)等生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均较高。王玉玉等^[37]应用碳、氮稳定同位素研究了鄱阳湖枯水末期水生食物网结构, 发现江西鄱阳湖国家级自然保护区受人类活动干扰少, 核心区生物 $\delta^{15}\text{N}$ 相对较低, 而周边人类活动频繁的星子、都昌两县附近水域生物体内的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏高。本研究将近岸与远岸海域 10 种活动能力较弱的无脊椎动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行了分析比较, 发现辽东湾近岸海域的这些生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值均偏高, 尤其是扁玉螺和脉红螺这两种低周转率生物的近岸海域 $\delta^{15}\text{N}$ 值比远岸海域高 1.49‰和 0.49‰, 差异极显著($P < 0.01$), 反映其生境差异明显。研究结果反映了人类活动

引起的陆源污水排放对海洋生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响。辽东湾近岸有辽河、双台子河、大小凌河和六股河等多条河流直接注入,近 10 多年来,伴随着环渤海地区经济的迅猛发展,城市化进程不断加快,陆源排放入海的工农业、养殖业以及城市生活污水不断增加^[10],导致河口附近的海域无机氮超标现象严重^[38-41],大凌河口海域最高达 0.671 mg/L^[42],近岸水域富营养化加剧,赤潮现象频发,严重危害了辽东湾海洋生态环境的健康发展。

本研究仅对辽东湾主要渔业生物进行了 $\delta^{15}\text{N}$ 值的季节变化和营养级的研究,今后可以开展多季节或年际连续采样,增加悬浮物、浮游生物等稳定同位素比值分析,帮助建立辽东湾整个生态系统食物网连续营养谱的建立。

致谢:感谢辽宁省海洋水产科学研究院王文波、王彬、李玉龙、王爱勇、付杰、于旭光、郭栋等同事协助外业调查和样品鉴定等工作。

参考文献:

- [1] 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): 2249-2257.
- [2] Kang C K, Choy E J, Son Y, et al. Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean Peninsula determined by C and N stable isotope analyses[J]. *Mar Biol*, 2008, 153(6): 1181-1198.
- [3] 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[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052-3060.
- [4] 彭士明, 施兆鸿, 尹飞, 等. 利用碳氮稳定同位素技术分析东海银鲳食性[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1565-1569.
- [5] Pauly D, Watson R. Background and interpretation of the 'Marine Trophic Index' as a measure of biodiversity[J]. *Phil Trans R Soc B*, 2005, 360(1454): 415-423.
- [6] 陈作志, 邱永松, 贾晓平, 等. 基于 Ecopath 模型的北部湾生态系统结构和功能[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(3): 460-468.
- [7] Deniro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen in animals[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45(3): 341-351.
- [8] Cabana G, Rasmussen J B. Modelling food chain structure and contaminant bioaccumulation using stable nitrogen isotopes[J]. *Nature*, 1994, 372: 255-257.
- [9] 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.
- [10] 袁宇, 朱京海, 侯永顺, 等. 辽东湾入海污染物调查及海域水质安全分析[J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(2): 12-16.
- [11] 邓景耀, 姜卫民, 杨纪明, 等. 渤海主要生物种间关系及食物网的研究[J]. *中国水产科学*, 1997, 4(4): 1-7.
- [12] 杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(9): 8-16.
- [13] 杨纪明. 渤海鱼类的食性和营养级研究[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(10): 10-19.
- [14] Vender Zanden M J, Rasmussen J B. Variation in the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies[J]. *Limnol Oceanogr*, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [15] Vender Zanden M J, Chandra S, Allen B C, et al. Historical food web structure and restoration of native aquatic communities in the Lake Tahoe (California-Nevada) basin[J]. *Ecosystems*, 2003, 6(3): 274-288.
- [16] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8-20.
- [17] 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[J]. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123-130.
- [18] 万祎, 胡建英, 安立会, 等. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次[J]. *科学通报*, 2005, 50(7): 708-711.
- [19] 张波. 中国近海食物网及鱼类营养动力学关键过程的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [20] 韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(2): 182-192.
- [21] 张雅芝. 东山湾叫姑鱼食性研究[J]. *厦门水产学院学报*, 1996, 18(1): 25-31.
- [22] 薛莹, 金显仕, 张波, 等. 南黄海三种石首鱼类的食性[J]. *水产学报*, 2005, 29(2): 178-187.
- [23] 程济生, 朱金声. 黄海主要经济无脊椎动物摄食特征及其营养层次的研究[J]. *海洋学报*, 1997, 19(6): 102-108.
- [24] Jennings S, Greenstreet S P R, Hill L, et al. Long-term trends in the trophic structure of the North Sea fish community: evidence from stable isotope analysis, size-spectra and community metrics[J]. *Mar Biol*, 2002, 141(6): 1085-1097.
- [25] 张丹, 闵庆文, 成升魁, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物的食物网结构和营养级关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6734-6742.
- [26] Grey J. Ontogeny and dietary specialization in brown

- trout(*Salmo trutta* L.) from Loch Ness, Scotland, examined using stable isotopes of carbon and nitrogen[J]. *Ecol Freshw Fish*, 2001, 10(3): 168–176.
- [27] Power M, Power G, Caron F, et al. Growth and dietary niche in *Salvelinus alpinus* and *Salvelinus fontinalis* as revealed by stable isotope analysis[J]. *Environ Biol Fish*, 2002, 64: 75–85.
- [28] Wilson R M, Chanton J, Lewis G, et al. Isotopic variation($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{34}\text{S}$)with body size in post-larval estuarine consumers[J]. *Estu Coast Shelf Sci*, 2009, 83(3): 307–312.
- [29] Cabana G, Rasmussen J B. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93(20): 10844–10847.
- [30] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [31] Rubenstein D R, Hobson K A. From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes[J]. *Trends Ecol Evol*, 2004, 19(5): 256–263.
- [32] 郭学武, 唐启升, 孙耀, 等. 斑鲈的摄食与生态转换效率[J]. *海洋水产研究*, 1999, 20(2): 17–25.
- [33] 郭学武, 唐启升. 赤鼻棱鳀的摄食与生态转换效率[J]. *水产学报*, 2000, 24(5): 422–427.
- [34] 李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海海域春季拖网渔获物的营养级[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(1): 103–109.
- [35] Nixon S W, Buckley B A, Granger S L, et al. Anthropogenic enrichment and nutrients in some tropical lagoons of Ghana, West Africa[J]. *Ecol Appl*, 2007, 17(5): S144–S164.
- [36] Bannon O R, Roman T C. Using stable isotopes to monitor anthropogenic nitrogen inputs to estuaries[J]. *Ecol Appl*, 2008, 18(1): 22–30.
- [37] 王玉玉, 于秀波, 张亮, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究鄱阳湖枯水末期水生食物网结构[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1881–1888.
- [38] 李建军, 冯慕华, 喻龙. 辽东湾浅水区水环境质量现状评价[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(3): 42–45.
- [39] 田金, 宋伦, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域营养状况与趋势评价[J]. *海洋通报*, 2007, 26(6): 113–118.
- [40] 赵军, 穆云侠. 锦州湾近岸海域富营养化趋势的探讨[J]. *辽宁城乡环境科技*, 2000, 20(3): 3–5.
- [41] 曲丽梅, 姚德, 丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J]. *环境科学*, 2006, 27(2): 263–267.
- [42] 宛立, 王年斌, 周遵春, 等. 辽东湾北部海域夏季水质的综合评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2007, 114(4): 87–92.

Trophic level analysis of key species in Liaodong Bay using stable nitrogen isotopes

SUN Ming, LIU Xiuze, LI Yiping, DONG Jing

Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Key Laboratory of Marine Biological Resources and Ecology, Liaoning Province, Dalian 116023, China

Abstract: The stable nitrogen isotope ratio ($\delta^{15}\text{N}$) provides a powerful tool for estimating the trophic positions of consumers in food webs. We measured $\delta^{15}\text{N}$ in 28 fish species and 26 invertebrate species that were collected from Liaodong Bay in June and August, 2010. The trophic levels of these organisms ranged from 2.98 to 4.84, but were generally within the range of 3.70–4.56. $\delta^{15}\text{N}$ values changed in a large proportion (50%) of fish between July and August, suggesting that $\delta^{15}\text{N}$ values vary among species and seasonally. The largest increase was in *Raja porosa* (1.06‰) and the biggest decrease was in *Platycephalus indicus* (1.84‰). Furthermore, $\delta^{15}\text{N}$ values decreased in 87.5% of the invertebrates in August. The decrease in 6 invertebrate species was $> 1\text{‰}$ (37.5%), suggesting that invertebrates exhibit greater seasonal variation in $\delta^{15}\text{N}$ than fish. We compared the $\delta^{15}\text{N}$ values for 10 invertebrate species in the nearshore waters and offshore waters of Liaodong Bay to determine whether the inshore seawater environment and ecosystem is influenced by anthropogenic nitrogen inputs.

Key words: Liaodong Bay; stable nitrogen isotope ratio; trophic level; fish; invertebrate

Corresponding author: DONG Jing. E-mail: dj660228@tom.com