# 潮间带大型海藻氮稳定同位素的环境指示作用

王玉珏<sup>1</sup>, 邸宝平<sup>1</sup>, 李 欣<sup>1,2</sup>, 刘东艳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)山东烟台 264003;2. 中国 科学院大学 北京 100049)

摘 要:通过对烟台潮间带大型海藻组织中总碳(TC)、总氮(TN)、氮稳定同位素(δ<sup>15</sup>N)和水环境参数的 分析,对氮营养盐来源进行了判定,并筛选了合适的指示性藻种。烟台潮间带大型海藻的δ<sup>15</sup>N 值均位于 6.18‰ ~ 10.99‰之间,指示了生活污水与养殖排放是海水氮营养盐的主要来源。其中月亮湾(S1)主要 受生活污水影响,养马岛(S3)受养殖排放影响更明显,而渔人码头(S2)同时受生活污水和养殖排放影响。 绿藻门的孔石莼(Ulva pertusa)和肠浒苔(Enteromorpha intestinalis)对氮营养盐有较好的吸收和贮存能力, 同时在利用氮营养盐的过程中分馏作用不明显,较适合于作为氮营养盐来源的指示藻种。

关键词:大型海藻; δ<sup>15</sup>N; 氮营养盐来源; 指示物; 烟台潮间带

中图分类号: Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2016) 02-0174-06 DOI:10.13634/j.cnki.mes.2016.02.003

## Environmental indication of macroalgal $\delta^{15}$ N values at intertidal zone

WANG Yu-jue<sup>1</sup>, DI Bao-ping<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1,2</sup>, LIU Dong-yan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;)

Abstract: The total carbon (TC) , total nitrogen (TN) and nitrogen stable isotope ratio ( $\delta^{15}$ N) in macroalgal tissue were analyzed in conjunction with environmental variables in seawater to study the nitrogen sources and select effective macroalgal species along the Yantai coast. The results showed that macroalgal  $\delta^{15}$ N values at the three sites were all between 6. 18% and 10.99%, indicating sewage effluent and /or aquaculture discharge being the dominant nitrogen sources. Sewage effluent was dominant factors affecting the nitrogen concentrations in the Moon Bay (S1). The nitrogen concentration at the Yangma Island (S3) was mainly related to aquaculture discharge and the Fisherman Wharf (S2) was affected by both sewage and aquaculture discharge. *Ulva pertusa* and *Enteromorpha intestinalis* in Chlorophyta are identified as effective indicators due to their high nitrogen uptake and minimal nitrogen fractionation. Key words: macroalgae;  $\delta^{15}$ N; nitrogen sources; indicator; Yantai coast

上世纪迅速增长的城市化进程和农业化肥的 大量使用给全球多数近岸海域带来了富营养化与 藻华爆发的生态问题<sup>[12]</sup>。已有研究发现,环境中 的氮营养盐尤其是溶解态无机氮(DIN)的浓度与 组成是影响初级生产者丰度的重要因素<sup>[3]</sup>。因 此,了解海水中 DIN 的陆、海来源,进入水体以及 被初级生产者利用的途径,对控制海岸带氮的排 放缓解近岸富营养化具有重要意义<sup>[4]</sup>。

由于氮同位素分馏引起自然界含氮物质δ<sup>15</sup>N 值的显著差异 因此 环境氮营养盐的不同氮同位

收稿日期:2015-05-18,修订日期:2015-08-21

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020405);中国科学院科技创新交叉与合作团队;国家自然科学基金(41106101, 41376121)

作者简介:王玉珏(1978-), 女,山东昌乐人,博士,主要从事藻类营养盐生理生态学研究, E-mail: yjwang@yic.ac. cn 通讯作者: 刘东艳,研究员,主要从事海洋藻类生态学研究, E-mail: dyliu@yic.ac. cn

素范围在一定程度上体现了不同来源的氮的输入。一些大型藻类由于在利用氮营养盐的过程中 有一定的累积作用且对氮的分馏不明显,可较好 的反应水体氮营养盐的 δ<sup>15</sup>N 值,被广泛应用于欧 美近岸水体中氮来源的示踪研究。如: 波罗的 海<sup>[54]</sup>,美国加利福尼亚海湾<sup>[74]</sup>、夏威夷海湾<sup>[10]</sup>、 法国 Marennes-Oléron 海湾<sup>[11]</sup>。我国对海藻氮稳 定同位素的研究相对较少<sup>[12]</sup>,尚未达到应用 阶段。

烟台潮间带是我国受多种人类活动影响的典 型海岸带之一,上世纪60年代随着人口的迅速增 长,近岸无机氮营养盐呈现快速上升趋势<sup>[13]</sup>,使 得该海域生态环境发生明显变化。自上世纪90 年代以来,赤潮、绿潮、水母等灾害频发,严重影响 了烟台旅游、养殖等的经济发展<sup>[14-15]</sup>。因此,了 解烟台近海环境中氮营养盐的来源,对控制烟台 营养盐排放,制定合适的管理措施具有重要意义。 烟台潮间带从北到南分布着红藻、绿藻、褐藻等多 种大型海藻<sup>[16]</sup>,因此,可以应用大型海藻δ<sup>15</sup>N值 指示氮营养盐来源。

本研究通过对大型海藻组织氮稳定同位素组 成的分析,探讨烟台潮间带主要的氮营养盐来源, 以期为潮间带环境管理策略的制定提供重要的资 料支持,也为我国其他近岸水体人类活动氮营养 盐输入的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集和现场参数测定

于 2011 年 5 月在烟台月亮湾(S1)、渔人码头 (S2) 和养马岛(S3) 3 个潮间带,开展了大型海藻 采集以及水体环境参数的测定工作(图1)。其 中 S1 周围有两个较大的污水排放口,S2 周围有 多个小的污水排放口且近海有贝类养殖,S3 位于 自然保护区内,有海参养殖,受人类活动影响相对 较弱。

大型海藻采集在低潮期间 3 个潮间带的潮滩 上进行。现场取整株藻体,每种藻取 2 ~ 3 个平 行样,置于有冰袋的保温箱内,带回实验室分析。 250 mL 水样现场经 0.45 µm 醋酸纤维滤膜过滤 后,置于-20℃保存,每个采样点取 3 个平行样。 海水温度和盐度在现场用 YSI(600QSBCR,美国) 测定。



图1 烟台潮间带采样站位

Fig. 1 Sampling sites along the Yantai coastline

1.2 样品测定

参考《中国海藻志》《中国黄渤海海藻》等相 关资料 在显微镜下(日本,奥林巴斯,CKX41)对 大型海藻进行物种鉴定。三个采样点共鉴定大型 海藻3门12目46种,其中红藻门7目22种,褐 藻门4目7种,绿藻门1目4种。

大型海藻先后用过滤海水和 Milii-Q 水冲洗 掉藻体表面附着的有机物并冷冻干燥(Christ AL-PHA 1-4 LSC,德国)。干燥后的整株藻体研磨混 匀后  $\mathbbm 0.5 \sim 1 \mod 2$ 样进行碳氮组成及氮稳定 同位素分析。氮稳定同位素用稳定同位素质谱仪 (Delta V Advantage,热电,德国)进行测定,结果 以大气中  $N_2$ 的氮同位素比值( $^{15}N/^{14}N$ )为标准的 相对值,计算公式为:

 $\delta^{15} N_{\mbox{$\#$B}} \%_{0} = [( {}^{15} N / {}^{14} N_{\mbox{$\#$B}} ) / ( {}^{15} N / {}^{14} N_{\mbox{$\#$\pi$}} ) - 1 ] \times 1000$ 

总碳(TC)和总氮(TN)用元素分析仪(Flash EA1112 热电,意大利)测定。

溶解态无机营养盐利用营养盐自动分析仪 (AA3,Bran + Luebbe,德国)测定,NH<sub>4</sub>-N采用 水杨酸钠显色法测定,其他营养盐依据《海洋调 查规范》(GB/T 12763.4-2007)进行测定。DIN 为 NO<sub>3</sub>-N NO<sub>2</sub>-N 与 NH<sub>4</sub>-N 的浓度之和,溶解有机氮 (DON) 为总溶解态氮减去 DIN。

用单因素方差分析中的 Turkey HSD(0.05) 对采样点之间的差异性进行分析(SPSS 11.5)。

2 结果与讨论

2.1 潮间带海水环境参数比较

3 个潮间带采样点海水温度和盐度相差不 大,平均值范围分别为17~19℃和33.4~33.7。 营养盐浓度和结构如表1所示。表层海水DIN浓 度为S1 > S2 > S3,其中S1中DIN以NO<sub>3</sub>-N为 主要存在形态,占总DIN的77.56%,而S3中以 NH<sub>4</sub>-N为主要存在形态,占总DIN的80.40%。 DON浓度三个站点差别不大,S1水体中略低于 S2和S3。PO<sub>4</sub>-P浓度为S1高于S3和S2,后两者 差别不大,其浓度均高于0.1 $\mu$ M,对藻类的生长 不存在绝对限制(表1)。 类活动等外源营养盐输入的影响较 S1 和 S2 小。 已有的研究表明,烟台近海 DIN 受陆源输入和养 殖的影响。NH<sub>4</sub>-N 是扇贝等养殖生物的主要排泄 物,而排污等陆源输入主要带来 NO<sub>3</sub>-N 浓度的增  $m^{[17-9]}$ 。S3 存在较高的 NH<sub>4</sub>-N 比例,可能主要 受到海参等养殖的影响。S1 相对低的 NH<sub>4</sub>-N 浓 度和高的 NO<sub>3</sub>-N 组成表明其主要受陆源输入的 影响。S2 中氮营养盐的结构表明该点同时受养 殖和生活污水排放的影响。

以上结果表明 S3 位于自然保护区内 受人 殖利

表 1 三个采样点海水营养盐浓度(μM)和结构(摩尔比)比较

Tab. 1	Nutrient	concentrations	(μM)	and	structures	of	seawater	at	three	sites
--------	----------	----------------	------	-----	------------	----	----------	----	-------	-------

采样点		NO <sub>2</sub> -N	$NH_4$ –N	NO <sub>3</sub> -N	DIN	DON	$PO_4$ -P
S1	范围	0.11 ~ 0.15	1.84 ~ 1.95	2.31 ~ 15.59	4.37 ~ 17.58	16.60 ~ 17.04	0.19 ~ 0.26
	平均值	0.14	1.94	7.19	9.27	16.80	0.21
S2	范围	$0.14 \sim 0.24$	2.53 ~ 4.52	2.68 ~ 7.05	6.77 ~ 9.82	15.63 ~ 18.25	0.13 ~ 0.16
	平均值	0.17	3.67	4.30	8.15	17.29	0.15
S3	范围	$0.08 \sim 0.14$	1.50 ~ 4.57	0.30 ~ 1.08	1.94 ~ 5.78	16.07 ~ 18.64	0.14 ~ 0.18
	平均值	0.11	2.83	0.58	3.52	17.35	0.16

2.2	三个采样点大型海藻 TC、TN、C: N 和 $\delta^{D}$ N	I
	值的比较	

3 个采样点大型海藻 TC、TN、C: N 和  $\delta^{15}$ N 值 的范围和平均值如表 2 所示。TC 和 TN 平均值分 別呈现 S3 > S1 > S2 和 S3 > S2 > S1 的空间特征, 而 C: N 呈现与 TN 相反的特征为 S1 > S2 > S3。3 个采样点大型海藻 δ<sup>15</sup> N 的范围为 6.18‰ ~ 10.99‰,分布特征为 S1 > S2 > S3(表2)。

表 2 三个采样点大型海藻 TC、TN、C: N 和 δ<sup>15</sup>N 值( n 为藻种数)

Tab. 2 TC , TN , C: N and  $\delta^{15}N$  of macroalgal tissue at three sites ( n: the number of species)

		TC/(%)	TN/ (%)	C: N	$\delta^{15}$ N / ( ‰)
S1 ( n = 18)	范围	18.1 ~ 40.7	1.44 ~ 5.45	8.38 ~ 15.3	6.18 ~ 11.0
	平均值	35.4	3.34	11.34	8.06
S2 ( $n = 17$ )	范围	28.7 ~ 40.5	2.52 ~ 4.32	8.38 ~ 12.8	6.83 ~ 9.13
	平均值	35.1	3.42	10.5	7.88
S3 ( $n = 11$ )	范围	18.6 ~ 42.1	1.36 ~ 5.62	7.25 ~ 13.7	6.70 ~ 8.90
	平均值	37.0	4.14	9.65	7.76

由于 3 个采样点大型海藻的数目和组成不 同,为排除藻的生长速率及对营养盐吸收和代谢 过程的差异性对采样点大型藻 TC、TN、C:N 和  $\delta^{15}$ N 平均值的影响,更准确的进行采样点间的对 比,本文进一步对三个采样点共有的大型海藻的 TN 和  $\delta^{15}$ N 值进行比较(图 2,图 3)。结果表明, 与平均值的结果一致,除小珊瑚藻(*Corallina pilulifera*)在 S1 和 S3 均呈现出低的 TC 和 TN 值外, 其他藻 TN 值均呈现 S3 高于 S1 和 S2 特征; 红藻 的 TN 值在 S1 高于 S2,而褐藻和绿藻的 TN 值则 为 S2 大于等于 S1(图 2)。作为藻体碳氮含量的 主要影响因子,海区高的氮、磷营养盐通常伴随着 高的藻体 TN 值<sup>[20]</sup>。本研究在水体 DIN 和 PO<sub>4</sub>-P 浓度最高的 S1 点大型海藻 TN 的值最低,而营养 盐浓度最低的 S3 点大型海藻呈现最高的 TN 值 (表1 图2)。类似的结果也出现 Piñón-Gimate 等 (2009)在加利福尼亚潮间带的研究中<sup>[7]</sup>。这可 能与大型藻在吸收氮营养盐过程中的生长和氮储 存机制有关。尽管大型海藻在生长前期会贮存氮 营养盐 .但氮的长期贮存主要发生在营养盐满足 生长需求后<sup>[21]</sup>。本研究中藻体吸收的氮营养盐 的可能主要用于藻体生长 .S1 点低的 TN 值可能 与高的 藻体 生长速 率对 组 织 内 氮 的 稀 释 有关<sup>[22-23]</sup>。

δ<sup>15</sup>N的分析表明 除绿藻的两个藻种呈现 S1 > S2 和 S3 的规律外,红藻和褐藻不同藻种缺乏 明显的地点变化规律(图 3)。表明不同藻氮营养 盐代谢过程的差异会导致其对环境变化响应的 差异。 图 2



三个采样点共有大型海藻 TN 比较





Fig. 3  $\delta^{15}$  N values of same macroalgal species of three sites

### 2.3 氮营养盐来源的判断

不同来源氮营养盐  $\delta^{15}$  N 的范围不同,如生活 污水和生物排泄物  $\delta^{15}$  N 值通常较高,范围约 7‰ ~ 51‰,大气中的氮气一般为 0 左右,农业氮肥 中的  $\delta^{15}$  N 范围约 - 7.5‰ ~ 6.6‰<sup>[10,24-26]</sup>。本研 究中烟台潮间带 3 个点大型海藻组织  $\delta^{15}$  N 基本 位于 6.18 ~ 10.99‰范围内,且单因素方差分析 (Turkey HSD)表明空间差异性不明显(*P* > 0.05),均体现了生活污水和养殖排放的影响。

采样点 S1 和 S2 均位于烟台市居民生活区, 两个采样点附近均有排污口,生活排污带来的营 养盐输入是影响水质环境的主要因素<sup>[27]</sup>。除生 活污水外,S2 还受到贝类养殖过程中氨氮排放的 影响,呈现相对高的氨氮浓度<sup>[1749]</sup>(表1)。S3 位 于养马岛西北侧自然保护区内,尽管该点低的营 养盐浓度表明其营养盐污染较 S1 和 S2 弱(表 1)。但大型海藻组织  $\delta^{15}$ N 的范围仍体现出生活 污水和养殖排放的影响。采样点周围海参等养殖 排放和岛上居民生活排污可能是水体氮营养盐的 主要贡献者,氨氮为主的 DIN 结构表明养殖排放 的影响更明显<sup>[17-9]</sup>。该现象应该引起相关环保 部门的关注并及时加以控制。同时,这也提醒我 们,对近岸水体环境的判断需同时结合营养盐浓 度和来源两个方面,才能综合污染源、污染状况及 后期可能的影响制定合理的管理措施。

# 2.4 大型海藻的种间差异性比较及氮营养盐来 源指示性藻种的挑选

在用大型海藻的 δ<sup>15</sup> N 值指示水体氮营养盐 来源时,合适的指示藻种需满足两个条件:(1)具 备对氮营养盐快速吸收和同化的能力,可以及时 反映环境水体中氮营养盐的变化;(2)在吸收氮 营养盐的过程中基本上不发生分馏,可如实反映 水体氮营养盐的 δ<sup>15</sup> N 值<sup>[10]</sup>。

鉴于不同藻种氮吸收和同化的差异,我们对 相同环境下大型海藻 TC、TN、C:N 和 δ<sup>15</sup>N 值的种 间差异性进行了比较,并进一步对烟台潮间带适 于指示氮营养盐来源的大型海藻进行了挑选。对 红藻、褐藻和绿藻 3 个门的对比发现 *3* 个采样点 大型海藻 TC 值差异性不大且无明显变化规律, 而 TN 值均呈现红藻和绿藻明显高于褐藻的特 征,C:N 呈现与 TN 值相反的特征(表 3)。表明 相同环境下褐藻对营养盐的吸收和贮存能力较红 藻和绿藻低,即红藻和绿藻更能及时反映水体氮 营养盐的输入。

 $δ^{15}$ N 的比较发现 β 个采样点均为绿藻 大于 红藻和褐藻 ,后两者差别不大(表 3)。相同环境 下大型海藻  $δ^{15}$ N 的差异主要是由于藻体在吸收 和利用氮营养盐的过程中发生的同位素分馏导 致 ,尤其是在富营养盐环境中 ,分馏范围可达 2% ~ 4‰<sup>[7,28]</sup>。氮吸收过程中的同位素分馏过程 会降低藻体的  $δ^{15}$ N 值。本研究中的两种绿藻孔 石莼(*Ulva pertusa*)和肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*)在三个采样点呈现出较高的  $δ^{15}$ N 值 ,表明 其分馏相对不明显 ,相较于红藻和褐藻能更真实 反应水体氮营养盐的  $δ^{15}$ N 值。进一步证明了已 有研究提到的浒苔属和石莼属藻在高浓度氮营养 盐环境中基本不存在分馏 ,更适于指示氮营养盐 来源的结果<sup>[11,29-30]</sup>。

综合可见,本研究中的两种绿藻由于具备对 氮营养盐较好的吸收和贮存能力,且在利用氮营 养盐的过程中分馏作用不明显,能较好的反映现 场氮营养盐的来源,适于用作氮营养盐来源的指 示藻种。

表3	不同门大型海藻 TC、TN、C: N 和 $\delta^{15}$ N 的比较( $n$ 为	藻种数)
----	-------------------------------------------------	------

Tab. 3 TC , TN , C: N and  $\delta^{15}$ N of macroalgal tissue in the three phyla (n: the number of species)

采样点	СÌ		TC/(%)	TN/ (%)	C: N	δ <sup>15</sup> N/( ‰)
S1	红藻	范围	18.1 ~ 40.1	1.44 ~ 5.44	6.41 ~ 12.96	6.10 ~ 9.00
	(n = 11)	平均值	34.7	3.71	9.77	7.54
	褐藻	范围	35.8 ~ 39.9	2.00 ~ 3.16	12.61 ~ 18.64	6.18 ~ 8.20
	( <i>n</i> = 4)	平均值	37.6	2.43	15.87	7.46
	绿藻	范围	33.6 ~ 36.4	2.84 ~ 3.42	10.63 ~ 11.83	10.53 ~ 10.99
	(n = 3)	平均值	35.3	3.22	11.04	11.44
S2	红藻	范围	28.7 ~ 36.9	3.22 ~ 4.32	8.7 ~ 10.70	6.84 ~ 8.61
	(n = 10)	平均值	34.7	3.66	9.48	7.65
	褐藻	范围	30.7 ~ 38.4	2.14 ~ 3.75	9.67 ~ 15.26	6.83 ~ 7.92
	(n = 4)	平均值	34.2	2.85	12.44	7.44
	绿藻	范围	33.9 ~ 40.5	2.81 ~ 3.78	10.73 ~ 12.81	9.07 ~ 9.56
	(n = 3)	平均值	37.9	3.40	11.45	9.25
S3	红藻	范围	18.6 ~ 42.1	1.36 ~ 5.62	7.25 ~ 13.72	6.70 ~ 8.90
	(n = 8)	平均值	36.4	4.45	8.76	7.72
	褐藻	范围	36.8 ~ 38.7	2.97 ~ 3.54	12.04 ~ 12.40	7.26 ~ 7.68
	(n = 4)	平均值	37.8	3.25	12.22	7.47
	绿藻	范围	39.9	3.41	11.71	8.64
	( n = 1)	平均值	39.9	3.41	11.71	8.64

## 3 结论

(1)烟台潮间带大型海藻 δ<sup>15</sup>N 的值主要位于 6.18‰ ~ 10.99‰的范围内,结合水体 DIN 结构 的分析表明,生活污水排放是 S1(月亮湾)氮营养 盐的主要来源; S2(渔人码头)同时受生活污水和 养殖排放的影响;养殖排放是影响 S3(养马岛)氮 营养盐浓度的主要原因。

(2)相较于红藻和褐藻,两种绿藻孔石莼和 肠浒苔由于具备对氮营养盐较好的吸收和贮存能 力,且在利用氮营养盐的过程中分馏作用不明显, 能较好的反映现场氮营养盐的来源,适于用作氮 营养盐来源的指示藻种。

#### 参考文献:

- [1] ANDERSEN J H , SCHLÜTER L ,ÆRTEBJERG G. Coastal eutrophication: Recent developments in definitions and implications for monitoring strategies [J]. Journal of Plankton Research , 2006 , 28(7): 621-628.
- [2] BRICKER S B, LONGSTAFF B, DENNISON W, et al. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: A decade of change [J]. Harmful Algae, 2008, 8(1):21-32.
- [3] THORNBER C S , DIMILLA P , NIXON S W , et al. Natural and anthropogenic nitrogen uptake by bloom-forming macroalgae [J]. Marine Pollution Bulletin , 2008 , 56(2) : 261-269.
- [4] ROGERS K M. Stable carbon and nitrogen isotope signatures indicate recovery of marine biota from sewage pollution at Moa Point, New Zealand [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46

(7):821-827.

- [5] DEUTSCH B , VOSS M. Anthropogenic nitrogen input traced by means of δ<sup>15</sup>N values in macroalgae: Results from in-situ incubation experiments [J]. Science of the Total Environment , 2006 , 366(2/3):799-808.
- [6] SCHUBERT P R, KAREZ R, REUSCH T B H, et al. Isotopic signatures of eelgrass (*Zostera marina* L.) as bioindicator of anthropogenic nutrient input in the western Baltic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin , 2013, 72(1):64-70.
- [7] PIÑÓN-GIMATE A, SOTO-JIMÉNEZ M F, OCHOA-IZAGU-IRRE M J, et al. Macroalgae blooms and δ<sup>15</sup> N in subtropical coastal lagoons from the Southeastern Gulf of California: discrimination among agricultural, shrimp farm and sewage effluents [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(8):1144-1151.
- [8] OCHOA-IZAGUIRRE M J, SOTO-JIMÉNEZ M F. Evaluation of nitrogen sources in the Urías lagoon system, Gulf of California, based on stable isotopes in macroalgae [J]. Ciencias Marinas, 2013, 39(4):413-430.
- [9] OCHOA-IZAGUIRRE M J, SOTO-JIMÉNEZ M F. Variability in nitrogen stable isotope ratios of macroalgae: Consequences for the identification of nitrogen sources [J]. Journal of Phycology, 2015, 51(1):46-65.
- [10] DAILER M L , KNOX R S , SMITH J E , et al. Using  $\delta^{15}$  N values in algal tissue to map locations and potential sources of anthropogenic nutrient inputs on the island of Maui , Hawai' i , USA [J]. Marine Pollution Bulletin , 2010 , 60(5) : 655-671.
- $\label{eq:states} \begin{array}{l} \mbox{[11] RAIMONET M , GUILLOU G , MORNET F , et al. Macroalgae} \\ & \delta^{15}\,N \mbox{values in well-mixed estuaries: Indicator of anthropogenic} \\ & nitrogen \mbox{ input or macroalgae metabolism? [J]. Estuarine , \\ & Coastal \mbox{ and Shelf Science , 2013 , 119: 126-I38.} \end{array}$

[12]俞志明, WASER N A D, HARRISON P J. 不同氮源对海洋

微藻氮同位素分馏作用的影响 [J]. 海洋与湖沼,2004,35 (6):524-529.

- [13] WANG Y J , LIU D Y , DONG Z J , et al. Temporal and spatial distributions of nutrients under the influence of human activities in Sishili Bay , northern Yellow Sea of China [J]. Marine Pollution Bulletin , 2012 , 64(12) : 2708-2719.
- [14] HAO Y J , TANG D L , YU L , et al. Nutrient and chlorophylla anomaly in red-tide periods of 2003-2008 in Sishili Bay , China
  [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology , 2011 , 29 (3):664-673.
- [15] DONG Z J , LIU D Y , WANG Y J , et al. A report on moon jellyfish Aurelia aurita bloom in Sishili bay , northern Yellow Sea of China in 2009 [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management , 2012 , 15(2) : 161-167.
- [16] 庄树宏,陈礼学.烟台月亮湾岩岸潮间带底栖海藻群落结构 的季节变化[J].青岛海洋大学学报,2003,33(5): 719-726.
- [17] 赵卫红, 焦念志, 赵增霞. 烟台四十里湾养殖水域氮的存在 形态研究 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(1):53-59.
- [18]赵卫红,焦念志,赵增霞.烟台四十里湾养殖水域营养盐的 分布及动态变化[J].海洋科学,2000,24(4):30-34.
- [19]周 毅. 滤食性贝类筏式养殖对浅海生态环境影响的基础研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所,2000.
- [20] CPIVAK A C , CANUEL E A , DUFFY J E , et al. Nutrient enrichment and food web composition affect ecosystem metabolism in an experimental seagrass habitat [J]. PLoS One , 2009 , 4 (10): e7473.
- [21] FONG P , FONG J J , Fong C R. Growth , nutrient storage , and release of dissolved organic nitrogen by *Enteromorpha intestinalis* in response to pulses of nitrogen and phosphorus [J]. Aquatic Botany , 2004 , 78(1):83-95.
- [22] FONG P, BOYER K E, KAMER K, et al. Influence of initial tissue nutrient status of tropical marine algae on response to ni-

trogen and phosphorus additions [J]. Marine Ecology Progress Series , 2003 , 262: 111-123.

- [23] LIN D T , FONG P. Macroalgal bioindicators (growth , tissue N ,  $\delta^{15}$  N) detect nutrient enrichment from shrimp farm effluent entering Opunohu Bay , Moorea , French Polynesia [J]. Marine Pollution Bulletin , 2008 , 56(2) : 245-249.
- [24] OWENS N J P. Natural variations in  $\delta^{15}\,N$  in the marine environment [ J ]. Advances in Marine Biology , 1987 , 24: 390-451.
- [25] MACKO S A , OSTROM N E. Pollution studies using stable isotopes [M]//LAJTHA K , MICHENER R H (Eds.) , Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science. Oxford , UK: Blackwell Scientific Publications , , 1994: 45-62.
- [26] VITÒRIA L, OTERO N, SOLER A, et al. Fertilizer characterization: isotopic data (N, S, O, C, and S) [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(12): 3254-3262.
- [27] HAN Q Y , LIU D Y. Temporal and spatial variations in the distribution of macroalgal communities along the Yantai coast , China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology , 2014 , 32(3):595-607.
- [28] PETERSON B J , FRY B. Stable isotopes in ecosystem studies [J]. Annual Review of Ecology and Systematics , 1987 , 18: 293-320.
- [29] COHEN R A , FONG P. Experimental evidence supports the use of δ<sup>15</sup>N content of the opportunistic green macroalga Enteromorpha intestinalis (Chlorophyta) to determine nitrogen sources to estuaries [J]. Journal of Phycology , 2005 , 41 (2): 287-293.
- [30] AGUIAR A B, MORGAN J A, TEICHBERG M, et al. Transplantation and isotopic evidence of the relative effects of ambient and internal nutrient supply on the growth of *Ulva lactuca* [J]. Biological Bulletin, 2003, 205(2): 250-251.