

$^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ 比值在海洋生态系统 营养关系研究中的应用

——海洋植物的同位素组成及其影响因素的初步探讨*

蔡德陵 毛兴华 韩贻兵

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

提要 于1993年2月—1995年5月,采用生物显微镜鉴定并计数和高温氧化的方法,对崂山湾海洋植物的种类组成及其有机碳同位素组成的季节性变化作了5个季度月的研究。结果表明,该区网采浮游植物全年以硅藻为主,甲藻在夏季也可成为优势种之一。浮游植物的碳同位素组成在夏季较重,冬季和春季较轻,并与海水温度有弱的正相关性。浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 -25.9×10^{-3} — -19.2×10^{-3} ,全年平均值为 $(-23.2 \pm 2.4) \times 10^{-3}$ 。该生态系统的另一碳源为底栖藻类,其 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-18.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$,明显区别于浮游植物。对除温度以外的其它影响海洋植物同位素组成的因素,诸如植物种类组成、海水中溶解无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 CO_2 供应速率以及 CO_2 固定过程中不同羧化酶的同位素分馏作用等也作了初步探讨。

关键词 碳同位素 食物网 植物

学科分类号 Q948.885.3

在特定的生态系统中,各生物种群的摄食关系、营养物质和能量的流动途径是生态学研究的一个难题。通常很难直接观测生态系统中动物间的摄食关系,而采用检查分析动物消化道中食物残片或粪便等非直接方法也不十分理想。50年代以来,稳定同位素技术的发展为解决这一生态学难题提供了新的研究手段(Parker *et al*, 1970; De Niro *et al*, 1978)。海洋植物是近海生态系统食物网的主要碳源之一,因此,研究海洋植物的同位素组成及其影响因素,有助于应用同位素法研究海洋生态系统食物网的营养结构。国外对此已作了较多研究(Wong *et al*, 1978; Deines, 1980; Fry *et al*, 1984; Sackett, 1989; Goering *et al*, 1990; Boon *et al*, 1994),但目前尚未见有关中国近海生态系统此类研究的报道。本文报告对崂山湾海洋植物的种类及其有机碳同位素组成的季节性变化的研究结果,以期为中国近海生态系统食物网的营养结构提供资料。

1 材料与方法

以青岛附近的大、小管岛周围的崂山湾水域为主要研究区域。于1993年2月、5月、8月、11月和1995年5月,使用浅水III型浮游生物网(网口直径为37cm,网长为1.2m,国际

* 国家自然科学基金资助项目,39170172号。蔡德陵,男,出生于1943年7月,研究员, Fax:0086-0532-2879562

收稿日期:1997-04-11,收修改稿日期:1998-05-05

标准 20 号尼龙筛绢制网,筛绢孔径为 0.077mm)和 I 型浮游生物网(筛绢孔径为 0.33mm),采用水平拖网方式采集 0—5m 水层中的浮游植物和浮游动物。调查船速约为 1 节,每次拖网时间约 20—30min,一般每个航次拖 4—6 网,直至所采集的样品量足够分析时为止。1993 年 8 月、1994 年 2 月和 5 月在潮间带采集了底栖生物样品。所采集的生物样品在过滤海水中清养 1—2h 后,浮游生物样品过滤在孔径为 0.077mm 的筛绢上,再用过滤过的海水将样品从筛绢上冲洗到培养皿中。先剔除肉眼明显可见的杂质,然后在生物显微镜下挑出混杂其中的浮游动物。经挑选后的浮游植物样品在均匀混合后,选出一份作浮游植物种属鉴定并用个体计数法计数,据此计算出各种属细胞数量占细胞总计数的百分比,其余样品在真空干燥器中脱水干燥后用作同位素分析。底栖大型藻类经过滤海水清洗,鉴定种属后冷藏于 -20°C 冰柜中留待以后的同位素分析。

同位素分析过程与文献(Cai *et al.*, 1988)中所述基本相同。主要过程是称取 5—10mg 干样放入经 600°C 预灼烧过的石英舟中,用 10% 优级纯盐酸酸化样品以除去无机碳成分,在 50°C 恒温干燥箱中酸化 3 次。酸化后的样品舟放入真空高温燃烧系统中,在 900°C 高纯氧气下燃烧,经氧化铜催化剂全部转化为二氧化碳,经数个干冰-丙酮冷阱去除水分等杂质,再经铜和二氧化锰催化剂纯化系统除去氯、磷、氮等杂质,所得高纯二氧化碳样品气送入 MAT-251 型质谱仪测定其碳同位素比值,测量结果根据国际通用的 PDB 标准以 δ 值形式报告,该值定义为: $\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{样品}} / ({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{标准}} - 1] \times 1000$, 经用实验室内标样品的反复测量表明,生物样品的碳同位素测量精度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 。

2 结果

2.1 浮游植物样品的分析鉴定及其有机碳同位素测定结果

对 1993 年的 4 个季度月以及 1995 年 5 月共 5 个季度月的样品作了浮游植物鉴定。其中 1993 年 11 月份样品先用不同孔径筛绢分离成 0.050—0.076mm、0.076—0.169mm 和 $>0.169\text{mm}$ 三种不同粒径分别进行鉴定和同位素测量。全部样品中鉴定到的种有 35 属 64 种,其中硅藻 32 属 57 种,甲藻 3 属 7 种。硅藻种数占浮游植物总种数的 89%。不同季节的鉴定结果见表 1。

由表 1 可知,冬季的优势种为 *Nitzschia* sp., 其百分含量超过了 40%; 其次为 *Melosira sulcata* 和 *Coscinodiscus* spp., 各占 27.8% 和 26.5%。春季 *Coscinodiscus* spp. 上升为第一优势种, 占 31.4%; 而 *Nitzschia* sp. 退至第三位, 占 17.2%; 居第二位的是 *Phizosolenia* sp., 占 27.7%。到了夏季, *Coscinodiscus* spp. 继续繁殖, 优势更为明显, 占 44.0%。

在本调查水域中,甲藻的种类和数量都少于硅藻,但甲藻的数量在夏季有所上升,其中 *Ceratium* spp. 上升为第二优势种, 占细胞总量的 30.7%, 主要有 *C. tripos*、*C. fusus* 和 *C. macroceros* 等; *Chaetoceros* spp. 居第三位, 占 12.7%。到了秋季, *Coscinodiscus* spp. 大量繁殖, 占绝对优势(80.4%); 其次是 *Nitzschia paradoxa* 和 *Melosira sulcata*, 各占 4.7%。本文将 11 月份的样品按 0.050—0.076mm、0.076—0.169mm 和 $>0.169\text{mm}$ 三种不同的粒径范围分别进行鉴定和计数, 结果表明, 不同的粒径范围浮游植物的组成有所不同, 较粗粒级的浮游植物(0.076—0.169mm 和 $>0.169\text{mm}$ 两种粒级)仍以 *Coscinodiscus* spp. 为第一优势种, *Melosira sulcata* 和 *Nitzschia* sp. 居次; 而细粒级的浮游植物(0.050—0.076mm)则以 *Nitzschia* spp. 为第一优势种, *Melosira sulcata* 和 *Pleurosigma* spp. 居次。以上数据表明,

表1 大、小管岛海域浮游植物名录及细胞数量百分比的季节变化

Tab.1 The species roll of phytoplankton in the area of Dagan and Xiaoguan Islands and the seasonal variations in percentages of their cell amounts

| 名 称 | 2月 | 5月 | 8月 | 11月 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 硅藻门 Bacillariophyta | | | | |
| 短柄曲壳藻 <i>Achnanthes brevipes</i> | | | | 0.13 |
| 三舌辐环藻 <i>Actinocyclus trilingulatus</i> | | | | 0.005 |
| 翼虫形藻 <i>Anphiprora alata</i> | 0.02 | 0.06 | | |
| 蛛网藻 <i>Arachnoidiscus ehrenbergii</i> | | | | 0.01 |
| 日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i> | | 2.44 | | |
| 长耳盒形藻 <i>Biddulphia aurita</i> | | 0.24 | | 0.04 |
| 活动盒形藻 <i>Biddulphia mobiliensis</i> | 0.04 | | | 0.02 |
| 钝头盒形藻 <i>Biddulphia obtusa</i> | | | | 0.01 |
| 美丽盒形藻 <i>Biddulphia pulchella</i> | | | | 0.41 |
| 中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i> | | | | 0.04 |
| 威氏马鞍藻 <i>Campylodiscus wallichianus</i> | | | | 0.01 |
| 窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> | | | 2.94 | |
| 卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i> | 0.16 | | | |
| 扁形角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i> | | 1.61 | | |
| 密联角毛藻 <i>Chaetoceros densus</i> | 0.25 | | | |
| 洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> | | | 6.64 | 0.12 |
| 拟弯角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> | | | 3.07 | |
| 圆柱角毛藻 <i>Chaetoceros teres</i> | | | | 0.07 |
| 豪猪刺冠藻 <i>Corethron hystrix</i> | | | | 0.005 |
| 圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. | 18.98 | 30.05 | 42.68 | 72.49 |
| 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> | 4.03 | 0.66 | | 7.66 |
| 有翼圆筛藻 <i>Coscinodiscus baparticus</i> | 0.06 | 0.18 | 1.30 | |
| 格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i> | | 0.54 | | |
| 辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i> | | | | 0.12 |
| 威利圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i> | 3.49 | | | 0.16 |
| 地中海指管藻 <i>Dactyliosolen mediterraneus</i> | | 0.12 | 0.77 | 0.03 |
| 布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i> | 0.02 | 4.29 | | 0.005 |
| 浮动弯角藻 <i>Eucampia zoodiacus</i> ¹⁾ | | | | |
| 海斑条藻 <i>Grammatophra marina</i> | | | | 0.015 |
| 波罗的海布纹藻 <i>Gyrosigma balticum</i> | 0.02 | 0.06 | | 0.65 |
| 丹麦细柱藻 <i>Liptocylindrus damicus</i> | | | | 0.02 |
| 楔形藻 <i>Licmophora</i> sp. | | | | 0.02 |
| 具槽直链藻 <i>Melosira sulcata</i> | 27.76 | 1.85 | | 4.67 |
| 串珠直链藻 <i>Melosira moniliformis</i> | | | | 0.09 |
| 膜状舟形藻 <i>Naicula membranacea</i> | 0.05 | | | |
| 新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i> | | | | 0.11 |

续表1

| 名 称 | 2月 | 5月 | 8月 | 11月 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 柔弱菱形藻 <i>Nitzschia delicatissima</i> | | 7.93 | | |
| 弯端长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i> | 0.42 | 6.08 | | 0.035 |
| 奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i> | 0.07 | 3.16 | | 4.69 |
| 尖刺菱形藻 <i>Nitzschia pungns</i> | 40.55 | | | 1.67 |
| 斜纹藻 <i>Pleurosigma</i> spp. | 0.36 | 0.18 | | 0.73 |
| 近缘斜纹藻 <i>Pleurosigma affine</i> | 0.26 | | | 0.15 |
| 佛焰足囊藻 <i>Pllocystis spathulata</i> | | | | 0.015 |
| 亚得里亚海杆线藻 <i>Rhabdonerna adriatsalicum</i> | | | | 1.99 |
| 翼根管藻 <i>Rhizosolenia alata f. gracillima</i> | | 3.04 | | 0.38 |
| 翼根管藻印度变形 <i>Rhizosolenia alata f. indica</i> | 0.03 | 24.25 | 0.26 | 0.30 |
| 粗根管藻 <i>Rhizosolenia robusta</i> | | | | 0.03 |
| 刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i> | | 0.42 | | 0.02 |
| 笔尖形根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i> | 0.28 | | | 0.38 |
| 骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> ¹⁾ | | | | |
| 掌状冠盖藻 <i>Stephanopyxis palmeriana</i> | | | 1.95 | |
| 扭鞘藻 <i>Streptothees tharnesis</i> | | | | 0.005 |
| 菱形海线藻 <i>Thalassioarma nitzschijides</i> | 2.07 | 6.98 | 8.56 | 0.03 |
| 海链藻 <i>Thalassiosira</i> sp. | 0.35 | | | |
| 伏恩海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldis</i> | 0.21 | 5.66 | 1.02 | 0.10 |
| 蜂窝三角藻 <i>Triceratium favus</i> | | 0.18 | | 0.32 |
| 大龙骨藻 <i>Tropidoneis maxima</i> | 0.04 | | | |
| 甲藻门 Phrotophyta | | | | |
| 梭角藻 <i>Ceratium fusus</i> | | | 1.15 | 0.07 |
| 中形角藻 <i>Ceratium intermedium</i> | | | | 0.07 |
| 线纹角藻 <i>Ceratium limeatum</i> | | | | 0.02 |
| 大角角藻 <i>Ceratium macroceros</i> | 0.42 | | 0.89 | 0.25 |
| 三角角藻 <i>Ceratium tripos</i> | 0.05 | | 28.62 | 1.92 |
| 多甲藻 <i>Peridinium</i> sp. | | | 0.10 | 0.03 |
| 扁甲藻 <i>Pyrophacus horologicum</i> | | | 0.06 | |

1) 于1995年5月鉴定,未统计在百分数内

浮游植物不同的生态类群的种类组成随季节变动而不同,但是该区全年都以近岸广布种和近岸暖温带种为主。

由以上结果可知,该海区网采浮游植物的种类组成以硅藻和甲藻两大类为主,其中硅藻在种类和数量上都占绝对优势,这一结论与1987—1988年海岛调查的结果¹⁾完全一致。但是从年间比较来看,每个季节的优势种可能会有所变化,如1988年冬季是 *Rhizosolenia styliformis* 占绝对优势,而不是 *Nitzschia* sp.,春季是 *Rhizosolenia alata f. indica* 占绝对优

1) 国家海洋局第一海洋研究所,1990. 大管岛岛群开发可行性调查报告

势,秋季也是 *Rhizosolenia styliformis* 占绝对优势,这三个季度的第一优势种与1993年度有所不同;而1988年夏季的第一优势种是 *Coscinodiscus* sp.,与1993年度相同。作者在1995年春季也作了补充采样,结果表明第一优势种为 *Nitzschia* sp.,而 *Skeletonema costatum* 和 *Thalassionema nitzchioides* 分居第二、三位,再次证明由于环境条件等因素的改变,该区相同季节中不同年份的优势种可能发生变化。

对各个季度浮游植物混合样品的有机碳同位素组成作了测定,结果表明其 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显的季节性变化(表2),变化范围为 -25.9×10^{-3} — -19.2×10^{-3} 。冬季浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低,平均值为 -25.2×10^{-3} ;而 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最高值(-19.2×10^{-3})出现在夏季。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的全年变化可达 6.7×10^{-3} ,全年平均值为 $(-23.2 \pm 2.4) \times 10^{-3}$ 。对秋季不同粒级的样品分别测定其同位素组成,结果表明细粒级样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.8×10^{-3} ,而0.076—0.169mm粒级的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.2×10^{-3} ,但是 $>0.169\text{mm}$ 粒级的 $\delta^{13}\text{C}$ 值又降为 -21.8×10^{-3} 。不同粒级 $\delta^{13}\text{C}$ 值的最大差值为 0.6×10^{-3} 。

表2 大、小管岛周围海域浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化

Tab.2 Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ values of phytoplankton in the area around Daguan and Xiaoguan Islands

| 年份 | 浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值($\times 10^{-3}$) | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|
| | 2月 | 5月 | 8月 | 11月 |
| 1993 | -24.8 | -25.3 | -19.7 | -21.8 |
| | -25.5 | -25.9 | -19.2 | -21.2 |
| | | | | -21.8 |
| 1995 | | -23.2 | | |
| | | -23.5 | | |
| $\delta^{13}\text{C}$ 季度平均值 | -25.2 | -24.5 | -19.5 | -21.6 |

2.2 底栖藻类的分析鉴定及其有机碳同位素组成测定结果

于1993年8月和1994年2月和5月在潮间带共采集到底栖藻类9个种属,见表3。

表3 崂山湾潮间带底栖藻类种名录及其碳同位素值

Tab.3 Species roll and carbon isotopic compositions of benthic algae at tidal zone in Laoshan Bay

| 序号 | 底栖藻类种名 | $\delta^{13}\text{C}$ ($\times 10^{-3}$) |
|----|--------------------------------------|--|
| 1 | 浒苔 <i>Eutermorpha prolifera</i> | -22.9 |
| 2 | 叉开松藻 <i>Codium divaricatum</i> | -18.9 |
| 3 | 点叶藻 <i>Punctaria latifolia</i> | -19.1 |
| 4 | 绳藻 <i>Chorda filum</i> | -17.5 |
| 5 | 海蒿子 <i>Sargassum confusum</i> | -16.6 |
| 6 | 鼠尾藻 <i>Sargassum thunbergii</i> | -15.2 |
| 7 | 鸭毛藻 <i>Symphyocladia latiuscula</i> | -21.7 |
| 8 | 珊瑚藻 <i>Corallina officinalis</i> | -20.1 |
| 9 | 叉枝藻 <i>Gymnoggrus flabelliformis</i> | -17.6 |

由表3可知,崂山湾底栖藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围较大,为 -22.9×10^{-3} — -15.2×10^{-3} ,其变化可达 7.7×10^{-3} ;底栖藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 $(-18.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$ 。底栖藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值要比浮游植物的高出 4.7×10^{-3} 。在底栖藻类中, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为:绿藻 -22.9×10^{-3} — -18.9×10^{-3} ,褐藻 -19.1×10^{-3} — -15.2×10^{-3} ,红藻 -21.7×10^{-3} — -17.6×10^{-3} 。

2.3 浮游植物碳同位素组成与海水温度的关系

由浮游植物碳同位素组成与海水温度之间的相关关系(表4)可知,两者之间存在着线性正相关性,相关系数为0.69。这表明随着海水温度的升高,浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值总的趋势

是增加, 平均每升高 1°C , $\delta^{13}\text{C}$ 值增加约为 0.3×10^{-3} 。

3 讨论

海洋中自营养植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围相当宽, 其原因迄今未被完全认识, 许多文献 (Wong *et al.*, 1978; Deines, 1980; Fry *et al.*, 1984) 对此都作过研究, 已提出的主要影响因素有: 溶解无机碳 (DIC) 的同位素组成和浓度、光合作用中羧化酶的同位素分馏作用、环境温度、植物细胞内的 CO_2 或 HCO_3^- 浓度、海水中的细胞密度等等。

3.1 海水温度的影响

本实验从崂山湾生态系统中实测到浮游植物与海水温度之间存在着线

性正相关性, 证明温度确是影响浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的一个重要的、但并非唯一的因素。本实验所得的这一线性相关系数并不很高, 只有 0.69, 说明它只是一种弱相关关系, 这一结果与 Sackett (1989) 汇总 8 篇论文中的数据后得出的趋势完全一致, 他认为在暖水中的浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近于 -20×10^{-3} , 而在较冷水中则趋于减少至 -30×10^{-3} 。Goering 等 (1990) 在北太平洋阿拉斯加东南部一个海湾中测得的用 73mm 孔径的浮游生物网水平拖网取得的浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值同样随温度的增加而增加, 只是 Goering 等得到的斜率 ($0.71 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$) 高于本文的值 ($0.3 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$)。与线性关系的偏离也表明, 除温度外, 还有其它许多因素也影响着浮游植物的碳同位素组成。比如, 同在春季, 在 1993 年和 1995 年所采集的两个浮游植物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也可以变化 2.2×10^{-3} , 造成这一差别的原因是: 一方面是两次采样时海水温度相差 2°C , 另一方面所采集的浮游植物的种属组成发生了较大的变化。1993 年样品的优势种为 *Coscinodiscus* spp.、*Rhizosolenia* sp. 和 *Nitzschia* sp., 而 1995 年样品的优势种则依次为 *Nitzschia* sp.、*Skeletonema costatum*、*Thalassionema nitzschioides* 和 *Chaetoceros compressus*, 种属的变化可使浮游植物混合样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生较大的变化。

Wong 等 (1978) 研究发现, 在实验室培养条件下浮游植物光合作用造成的同位素分馏效应随温度的变化情况与种属有关, 例如对 *Skeletonema costatum* 是每降低 1°C , $\delta^{13}\text{C}$ 值增加 0.36×10^{-3} , 而 *Dunaliella* sp. 则每降低 1°C , $\delta^{13}\text{C}$ 值减少 0.13×10^{-3} , 其它实验的浮游植物也各有其不同的温度变化趋势值。有些受温度影响大, 另一些则受温度影响小。因此, 就浮游植物混合样而言, 是不同种属浮游植物综合的结果。一般来说, 优势种的影响应该占主导地位。Deines (1980) 认为, 与甲藻、颗石鞭毛藻 (coccothophores)、蓝绿藻 (blue-green algae) 等相比, 硅藻的碳同位素组成对温度的依赖性更为明显。由于在崂山湾海区硅藻在大部分季节中占第一优势, 这一海区的浮游植物碳同位素组成受温度的影响相对较为明显。

表4 浮游植物碳同位素组成与海水温度的关系

Tab.4 The correlation between carbon isotopic compositions of phytoplankton and seawater temperatures

| 序号 | 海水温度 ($^\circ\text{C}$) | 浮游植物碳同位素组成 ($\times 10^{-3}$) |
|----|---------------------------|------------------------------------|
| 1 | 4.4 | -24.8 |
| 2 | 4.4 | -25.5 |
| 3 | 13.6 | -25.3 |
| 4 | 13.6 | -25.9 |
| 5 | 24.7 | -19.7 |
| 6 | 24.7 | -19.2 |
| 7 | 10.5 | -21.8 |
| 8 | 10.5 | -21.2 |
| 9 | 10.5 | -21.8 |
| 10 | 11.7 | -23.2 |
| 11 | 11.7 | -23.5 |

3.2 海水中溶解无机碳同位素组成的影响

Degens 等(1968)已经证明浮游植物在光合作用时,利用的是海水中的 CO_2 ,而不是离子态的 HCO_3^- 。因此,海水中溶解无机碳(DIC)的同位素组成的变化也将导致浮游生物同位素组成的变化。一般来说,由于河水中 DIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海水中的 DIC的相应值不同,河水的混合会导致海水中的 $\text{DIC}\delta^{13}\text{C}$ 值的变化,DIC的这一变化在河口区相当明显。由于崂山湾周边无较大的河流流入,因此这方面的影响相对较小。 $\text{DIC}\delta^{13}\text{C}$ 值也是造成浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度变化的一个因素,这是因为在海水 $\text{HCO}_3^- - \text{CO}_2$ 系统中,碳的分馏作用是温度的函数。

3.3 二氧化碳的供应量对植物碳同位素组成的影响

Calder 等(1973)在研究蓝绿藻的光合作用时,发现碳同位素分馏与 CO_2 浓度有关,在 CO_2 浓度很低时,细胞与 CO_2 间同位素组成的差值为 -8×10^{-3} ; 当 CO_2 浓度在 0.2% 左右时,同位素分馏达到最小值,接近于 0×10^{-3} ; 当 CO_2 浓度达到 3% 时,同位素分馏值可增至 -18×10^{-3} 。

在植物体有机质中, $\delta^{13}\text{C}$ 较之无机碳源的贫化作用被认为是碳从无机碳储存库中提取过程和有机化合物合成时存在动力学效应的缘故,由于在化学反应中同位素分馏效应是随温度而变的,因此,植物的碳同位素组成应该是环境温度的函数。但是影响植物碳同位素组成的因素十分复杂。在 CO_2 固定过程中,不同的羧化酶造成同位素分馏效应也不同(Fry *et al.*, 1984)。PEP 羧化酶的同位素分馏效应较小,只有 $-3.6 \times 10^{-3} - -0.5 \times 10^{-3}$,而 RuBP 羧化酶的同位素的分馏效应则大得多,可达 $-41 \times 10^{-3} - -23 \times 10^{-3}$,由此可以产生不同种类植物相当大的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围。但是,在温度对海洋植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响问题上,文献中的观点也不尽一致(Gearing *et al.*, 1984)。这反映出这些结果都有一定的环境因素的局限性,而不是一种普遍适用的规律(Sackett *et al.*, 1965; Fontugne *et al.*, 1981; Rau *et al.*, 1982)。

作者在崂山湾海区测量到了两种主要的、具有不同碳同位素组成的碳来源:一种是浮游植物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $(-25.9 - -19.2) \times 10^{-3}$, 平均值为 $(-23.2 \pm 2.4) \times 10^{-3}$; 另一种是底栖藻类,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $(-22.9 - -15.2) \times 10^{-3}$, 平均值为 $(-18.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$ 。这些值与 Fry 等(1984)所综合的在海岸生态系统中各种碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围相一致,后者给出的温带海洋浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-24 - -18) \times 10^{-3}$, 巨藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-27 - -8) \times 10^{-3}$ 。这些数据为用同位素法对崂山湾海区生态系统的食物网结构分析提供了基础资料。

4 结语

同崂山湾海域不同季节海洋初级生产者的种属鉴定和同位素组成测定结果,可以得出如下结论:(1)该海域的网采海洋浮游植物以硅藻为主,但在夏季甲藻也可占有较重要的位置。浮游植物具有较宽的同位素组成,其变化范围为 $-25.9 \times 10^{-3} - -19.2 \times 10^{-3}$, 平均值为 $(-23.2 \pm 2.4) \times 10^{-3}$ 。浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显的季节性变化特征,并与海水温度有弱正相关性。(2)该水域另一重要的碳源是底栖藻类。底栖藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较之浮游植物的更宽,为 $-22.9 \times 10^{-3} - -15.2 \times 10^{-3}$, 平均值为 $(-18.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$, 较浮游植物更富集 ^{13}C 。

致谢 俞建鑫、李瑞香两位高级工程师为本项目浮游植物样品的鉴定和挑选做了大量工作,谨致谢忱。

参 考 文 献

- Boon P I, Bunn S E, 1994. Variations in the stable-isotope composition of aquatic plants and their implications for food-web analysis. *Aquat Bot*, 48(2): 99—108
- Cai D-L, Tan FC, Edmond J M, 1988. Sources and transport of particulate organic carbon in the Amazon River and Estuary. *Est Coast Shelf Sci*, 26(1): 1—14
- Calder J A, Parker P L, 1973. Geochemical implications of induced changes in ^{13}C fractionation by blue-green algae. *Geochim Cosmochim Acta*, 37: 133—140
- Degens E T, Guillard R L, Sackett W M *et al*, 1968. Metabolic fractionation of carbon isotopes in marine plankton. I. Temperature and respiration experiments. *Deep-Sea Res*, 15:1—9
- Deines P, 1980. The Isotopic Composition of Reduced Organic Carbon. In: Fritz P, JCh Fontes ed. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Vol.1 Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier, 329—406
- De Niro M J, Epstein S, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta*, 42: 495—506
- Fontugne M R, Duplessy J C, 1981. Organic carbon isotopic fractionation by marine plankton in the temperature range-1 to 31°C. *Oceanol Acta*, 4: 85—90
- Fry B, Sherr E B, 1984. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystem. *Contrib Mar Sci*, 27: 13—47
- Gearing J N, Gearing P J, Rudnick D T *et al*, 1984. Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based, temperate estuary. *Geochim Cosmochim Acta*, 48: 1 089—1 098
- Goering J, Alexander V, Haubenstock N, 1990. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific Bay. *Est Coast Shelf Sci*, 30: 239—260
- Parker P L, Calder J A, 1970. Stable Carbon Isotope Ratio Variations in Biological Systems. In: Hood D W ed. *Organic Matter in Natural Waters*. Alaska: University of Alaska, Publ#1. College, 107—127
- Rau G H, Sweeney R E, Kaplan I R, 1982. Plankton $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans. *Deep-Sea Res*, 29(8A): 1 035—1 039
- Sackett W M, 1989. Stable Carbon Isotope Studies on Organic Matter in the Marine Environment. In: Fritz P, JCh Fontes ed. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Vol.3. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 139—170
- Sackett W M, Eckelmann W R, Bender M L *et al*, 1965. Temperature dependence of carbon isotope composition in marine plankton sediments. *Science*, 148: 235—237
- Wong W W, Sackett W M, 1978. Fractionation of stable carbon isotopes by marine phytoplankton. *Geochim Cosmochim Acta*, 42: 1 809—1 815

APPLICATION OF $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ RATIOS TO STUDIES OF TROPHIC
RELATION IN A MARINE ECOSYSTEM
——PRELIMINARY INQUIRY INTO ISOTOPIC COMPOSITIONS OF
MARINE PLANT AND THEIR INFLUENCE FACTORS

CAI De-ling, MAO Xing-hua, HAN Yi-bing

(First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003)

Abstract Understanding of isotopic compositions of marine plant and their influence factors is a foundation for studies on trophic structure in a marine ecosystem. Seasonal variations in the species constituents of marine plants and their organic carbon isotopic compositions in Laoshan Bay were measured quarterly five times. The results show that the species constituents of phytoplankton take diatoms and dinoflagelates as the dominant. The diatoms have 32 genera and 57 species, but the dinoflagelates have only 3 genera and 7 species. The former is absolutely superior both in species and in quantity. The predominant species can have some seasonal changes. *Nitzschia* sp., *Melosira sulcata* and *Coscinodiscus* spp. rank the first three places in numbers in winter; *Coscinodiscus* spp. rises up to the first, *Rhizosolenia* sp. and *Nitzschia* sp. the second and third, respectively, in spring; the superiority of *Coscinodiscus* spp. is more obvious, but the amount of dinoflagelates increases clearly, of which *Ceratium* spp. becomes the second predominant, with *Chaetoceros* spp. being the third in summer. *Coscinodiscus* spp. possesses absolute predominance in autumn. This result is consistent with that investigated in 1987—1988. In different years the predominant species in a season, however, may have some changes. The isotopic compositions of phytoplankton are heavier in summer, but lighter in winter and spring. They have a weaker positive relation with seawater temperatures (the relative coefficient is 0.69). The $\delta^{13}\text{C}$ values of phytoplankton range between -25.9×10^{-3} and -19.2×10^{-3} , with an annual mean of $(-23.2 \pm 2.4) \times 10^{-3}$. Another carbon source in the ecosystem is benthic algae. They have 9 species. The $\delta^{13}\text{C}$ values of green algae range from -22.9 — -18.9×10^{-3} , brown algae -19.1 — -15.2×10^{-3} , and red algae -21.7 — -17.6×10^{-3} . The average of their $\delta^{13}\text{C}$ values is $(-18.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$, having an evident difference from that of phytoplankton. These data provide a basis for studies on trophic levels in the food web by isotopic methods. In addition to seawater temperature, other factors affecting isotopic compositions of marine plants include species component, $\delta^{13}\text{C}$ values of dissolved inorganic carbon in seawater, rate of CO_2 supply and isotopic fractionation of the different carboxylation enzyme in the process of CO_2 fixation.

Key words Carbon isotopes Food web Plants

Subject classification number Q948.885.3