

# 台湾海峡真光层有机碳动力学研究

## ——DOC 大幅度的日变化\*

彭兴跃 洪华生 商少凌

(国家教委海洋生态环境开放实验室、厦门大学环境科学研究中心, 厦门)

**摘要** 1994年8月和1995年2月在台湾海峡对 DOC 作定点连续观测, 发现 DOC 日变化很大 ( $2\sim 4\text{mg}/\text{dm}^3$ ), 且变化的幅度有季节差异和空间差异; DOC 昼夜变化的总的规律是白天比晚上高, 夜晚始终处于低值; 依据 DOC 的昼夜变化可将 DOC 分为  $\text{DOC}_{\text{new}}$  和  $\text{DOC}_{\text{old}}$  两部分;  $\text{DOC}_{\text{new}}$  在真光层中快速地产生、消耗、再循环;  $\text{DOC}_{\text{old}}$  则相对稳定, 可从真光层底部输出; DOC 的快速变化表明 DOC 的产生和被细菌消耗利用的速度都非常快. 文中还尝试快速富丽叶变换 (FFT) 来分离引起 DOC 日变化的物理因子和生物因子, 并依据实验结果讨论了初级生产力, 微生物对 DOC 的利用, DOC 输出生产力等问题.

**关键词** 溶解有机碳 (DOC) 台湾海峡 动力学 日变化

### 前言

海水中的溶解有机碳 (DOC), 也就是溶解有机物质, 是全球最大的有机碳储库之一, 它可在  $1\ 000\sim 10\ 000\text{a}$  的时间尺度影响大气二氧化碳的含量<sup>[1]</sup>, 认识其变化过程对研究全球碳循环十分重要. DOC 在真光层中的产生速率、消耗速率以及转移速率是 DOC 的主要动力学参数. 本文利用对 DOC 的现场昼夜连续观测研究了 DOC 的这几个

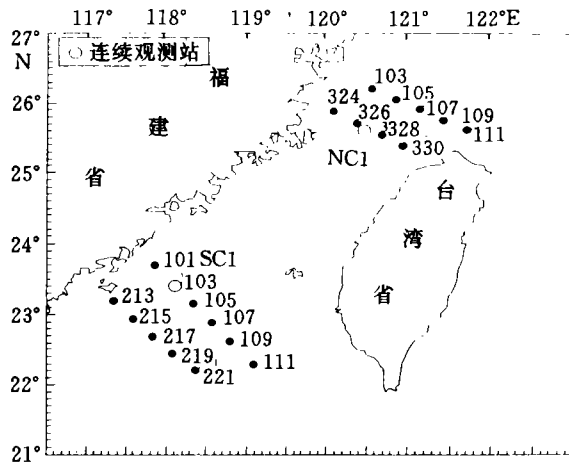


图1 台湾海峡采样站位

本文于1995-09-25收到, 修改稿于1996-11-01收到.

\* 本研究得到国家教委和福建省重点课题基金的资助.

动力学参数.

## 1 采样及方法

### 1.1 采样及样品保存

1994年8月27~28日和1995年2月18~19日在台湾海峡(见图1)作定点连续观测(NC1: 25°39.0'N、120°29.1'E和SC1: 23°24.0'N、118°06.5'E两个站). 水样用有机玻璃采水器采集后立即用玻璃纤维滤膜(GF/F 47mm 450℃预灼烧4h)过滤. 带有样品的滤膜用少量亚沸水清洗后冷冻(-20℃)保存. 滤液的保存采用两种方法:(1)用玻璃试管(500℃预灼烧5h)收集,加入少量HgCl<sub>2</sub>晶体来固定DOC,室温下保存;(2)用广口玻璃瓶(500℃预灼烧5h)收集,滴入磷酸将其酸化至pH为1左右,速冻至-20℃保存. 1994年航次采用方法1,1995年航次采用方法2.

### 1.2 DOC的测定

过硫酸钾氧化法,无色散CO<sub>2</sub>气体分析仪(LIRA1000型)测定生成的CO<sub>2</sub>. 测定精度: 0.035mg/dm<sup>3</sup> (S/√n).

## 2 结果及讨论

### 2.1 表层海水中DOC的日变化

#### 2.1.1 日变化的幅度

表层海水中DOC在一天之内变化很大,变化范围高达4mg/dm<sup>3</sup>以上. 图2为8月航次台湾海峡北部和南部所有站位表层水DOC按采样时间的变化. 可以看出,在数小时之内DOC可能就由2mg/dm<sup>3</sup>变到了6mg/dm<sup>3</sup>. 而不同站位之间的变化幅度却基本上不会超过一天之内的变化幅度. 这说明引起DOC在一天之内变化的因素同样也是造成不同站位间DOC差异的主要因素,为充分了解DOC的真实的时空变化,首先深入了解DOC日变化的机制是必要的. 自

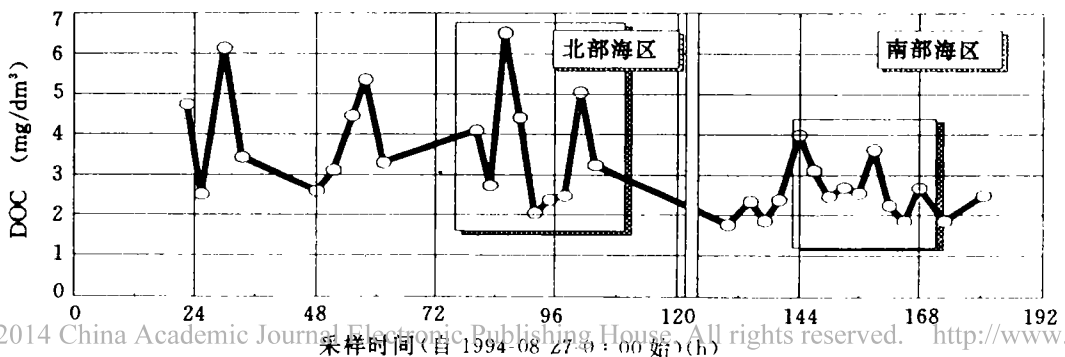


图2 DOC随采样时间的变化

然海区在一天之内有剧烈变化的因子主要有两个: 太阳光的周期变化和潮汐的周期变化. 体现在 DOC 上, 即表现为是否存在光合作用来产生 DOC, 以及海区海水相对位置变化的问题. 因此 DOC 的日变化主要是受到了两大因素, 即生物活动和物理因素 (水运动) 的控制.

### 2.1.2 日变化的规律

初看起来, DOC 在一天之内的变化似乎并不是那么有规律. 考虑到海水始终在不断地运动, “定点”处的海水, 特别是表层的海水<sup>[2]</sup> (20m 以内) 仅需数小时就可能流到 16~32km 之外. 因此, 靠定点观测来研究一天之中生命昼夜节律所带来的 DOC 的规律, 无疑会受到海水流动, 特别是潮流的干扰. 潮流把空间分布上的差异周期性地叠加在了“真实的”DOC 昼夜变化的数据上了.

如果现场连续观测的时间足够长, 数据足够多, 分离各个影响因素是可能的. 8月航次得到北部及南部各一组定点观测, 及北部9个站和南部6个站共33个表层 DOC 数据. 为了找出隐藏在这一组数据中的昼夜变化规律, 采用了快速傅里叶变换 (FFT) 及傅里叶回归 (FR) 等数学方法. 在处理过程中用到工具软件 GRAFTOOL (3-D Visions Corporation, Realease 3.3), 该软件具备对采样时间间隔较大且不均匀的时间序列数据的处理能力. 具体方法如下:

(1) 数据的划分: 由于南部海区与北部海区表层 DOC 的总均值和变化幅度都有明显不同, 所以分别进行中值化和标准化.

(2) 中值化数据: 将每个数据都减去总体平均值, 使新生成的数据的总体平均值为零.

$$X'_i = X_i - \bar{X}$$

(3) 标准化数据: 将中值化数据除以方差, 使新生成数据的方差为1.

$$X''_i = \frac{X'_i}{\sqrt{S^2}}$$

(4) 将南部和北部所有的已中值化和标准化的数据按采样时间排序.

(5) 快速傅里叶变换 (FFT): 将已排序的数据用工具软件进行快速傅里叶变换 (图3).

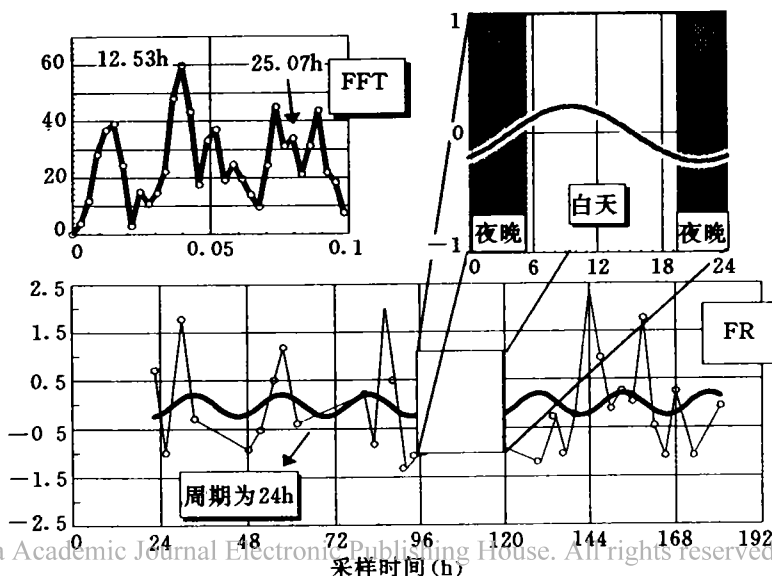


图3 对 DOC 数据的快速傅里叶变换 (FFT) 和傅里叶回归 (FR)

(6) 傅里叶回归 (FR): 取周期为24h 的正弦函数用所有数据进行回归.

由 FFT 的结果可看出, 这些时间序列数据中潜含着周日变化过程. 在周期为24h 处有一幅度很大, 且与其他峰显著分离的峰 (25.07h). 这个峰代表的方程为  $y = 2.3848 \cos(0.2506x + 2.8282)$ . 显然,  $y$  在白天, 也就是在区间  $(24k + 6, 24k + 20)$ ,  $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  内的取值基本上总是大于  $y$  在晚上的取值的.

取周期为24h 进行傅里叶回归得方程:

$$y = -0.0198537 - 0.182384 \cos(0.2618x) + 0.13901 \sin(0.2618x).$$

该方程曲线的峰值并不在正午或傍晚, 而是在上午9~10点. 这表明, 随着新的一个光周期的到来, DOC 得到迅速的补充, 但 DOC 被消耗的过程也迅速的跟上, 使 DOC 的浓度很快地又降了下来.

当然, 拟合的正弦曲线只能从相位上表达一些信息, 要想得到真实的 DOC 日变化曲线还需要进一步的现场数据和模拟实验.

### 2.1.3 利用昼夜变化划分 DOC

在深海中, DOC 的年龄大致在6 000a BP 前后<sup>[3]</sup>, 这一部分年龄非常大的 DOC 在世界海洋中分布较为均匀. 而在真光层中, DOC 产生与消耗的速度却快得多, 近岸生产力高的海区尤其如此. 可以说产生与消耗的竞争正是造成 DOC 在一天之内上下波动的生物方面的原因. 本研究观察到大幅度的 DOC 日变化, 说明了真光层, 特别是高生产力近岸海区真光层中 DOC 具有与深海极为不同的特征. 这里不仅包括年龄很大的 DOC, 也包括处在快速循环中的年龄很短的 DOC.

在本研究中可以看出, 尽管 DOC 变化幅度很大, 但它总有“落回”到一个基本数值的趋势, 这个基值约为  $1 \sim 2 \text{mg}/\text{dm}^3$ . 从生物的角度上讲, 浮游植物利用光合作用产生 DOC 以及细菌对 DOC 的快速利用应是 DOC 变化的主要原因. 事实上, 本文所指的 DOC 不仅包括真溶解态的有机碳, 也包括能穿过玻璃纤维滤膜的那部分非溶解态有机碳, 而这部分有机碳近来在研究中被称为胶体有机碳. 海水中胶体有机碳的含量常会比真溶解态有机碳还高<sup>[4]</sup>, 细菌利用这一部分有机碳的速度比利用真溶解态更快<sup>[5]</sup>. DOC 变化的幅度体现的正是能被快速利用的那部分 ( $\text{DOC}_{\text{new}}$ ), 而 DOC 变化范围的下限值, 即  $1 \sim 2 \text{mg}/\text{dm}^3$  的基值则体现难被细菌利用的那部分 ( $\text{DOC}_{\text{old}}$ ). 从实验结果看, 前者会超过后者.

由此可见, DOC 由于其动力学特征的不同可被划分为两部分:

定义:  $\text{DOC}_{\text{new}}$  = 日变化幅度

定义:  $\text{DOC}_{\text{old}}$  = 日最小值

$$\text{定义: } R_d = \frac{\text{DOC}_{\text{new}}}{\text{DOC}_{\text{old}}}$$

$R_d$  实际上是两部分 DOC 相互间的比值, 它反映了海区 DOC 与生物密切相关的动力学特征.  $R_d$  越大则 DOC 中新产生的部分越大, 即不稳定的部分越大, 越活跃.  $R_d$  越小, 则 DOC 越不活跃.

在本研究中表层海水的  $R_d$  在  $1 \sim 2$  之间, 说明表层海水中的 DOC 十分活跃, 有一半以上一直处在变化之中. 光合作用大量产生了 DOC, 但其中的大部分不久就被消耗了, 只有小部分有机会向下传输.



的  $R_d$  为1~2之间, 即白天  $DOC_{new}$  占总量的一半以上; 夜晚  $DOC_{new}$  被迅速消耗殆尽, 而白天  $DOC_{new}$  处于生产与消耗的不平衡之中,  $DOC$  波动较大; 20m 层可能由于微生物活动旺盛 (此时10~20m 水层是细菌总数的最大水层<sup>[6]</sup>), 迅速的消耗使得  $DOC$  在白天也不高; 大部的  $DOC_{new}$  来不及向下输出, 在真光层内即被消耗掉.

### 2.2.2 真光层以下海水

8月航次的40m 以深, 以及3月航次的50m 以深, 均未表现出明显的日变化趋势,  $DOC$  始终保持在  $1.5\text{mg}/\text{dm}^3$  左右. 由于这里光合作用很弱, 真光层  $DOC$  应是其主要来源. 夏天表层水温较高, 海水层化较好, 不断被消耗的  $DOC$  在由真光层向下输送时应会产生浓度梯度. 8月航次 NC1站观测到的  $DOC$  剖面正体现出这一特征: 从40m 到60m  $DOC$  从  $2.5\text{mg}/\text{dm}^3$  降至  $1.5\text{mg}/\text{dm}^3$ , 形成了浓度梯度  $[0.05\text{mg}/(\text{dm}^3 \cdot \text{m})]$ , 并且这个梯度稳定的存在, 11点与23点基本相同. 而在2月航次定位站数据中则未见到明显梯度. 这一方面是由于水深不够, 真光层低部距离海底太近, 另一方面也由于冬、春季上下温度分布均匀, 上下混合比夏季强烈. 但这种梯度在较深的站位仍有明显体现.

## 2.3 时空变化

### 2.3.1 南北差异

以  $R_d$  来看, 南北海区有着显著的差异. 北部  $R_d$  约为2, 南部  $R_d$  约为1. 这表明北部海区生产  $DOC$  的能力比南部更强, 而这特别是针对  $DOC_{new}$  而言, 因为  $DOC_{old}$  看上去北部比南部仅略微高出一而已. 由此可见, 不同海区生物生产  $DOC$  的能力可以不同, 但这种不同主要体现在  $DOC_{new}$  上, 对  $DOC_{old}$  来讲差别则小得多.

### 2.3.2 季节差异

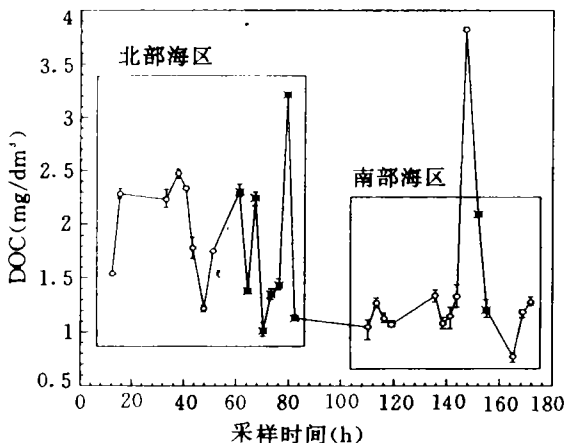


图6 冬季航次 (1995)  $DOC$  随采样时间的变化

两个航次所体现出来的南北海区的特征是相似的 (见2.3.1), 这种特征应是各自生态系结构特征的体现, 季节的变更并未使南北海区的这种特征改变多少. 尽管如此, 不同季节  $DOC$  在量上还是有区别的, 主要体现在以下两个方面: (1)  $DOC_{old}$  8月为  $2\text{mg}/\text{dm}^3$  左右, 2月为  $1\text{mg}/\text{dm}^3$  左右. (2)  $DOC_{new}$  8月北部为  $4\text{mg}/\text{dm}^3$  左右, 南部  $2\text{mg}/\text{dm}^3$  左右; 2月北部为  $2\text{mg}/\text{dm}^3$  左右, 南部则不会超过  $1\text{mg}/\text{dm}^3$ .

$DOC_{old}$  的变化是长周期的, 在季节

的时间尺度上才能看出变化;  $DOC_{new}$  的变化则是短周期的, 在小时的时间尺度上就发生明显变化. 由以上结果看出, 不管是南部还是北部, 台湾海峡的  $DOC$  都是8月比2月高, 后者仅为前者的一半.

## 2.4 讨论

### 2.4.1 初级生产力的问题

真光层中 DOC 的昼夜变化与浮游植物的光合作用,即海洋初级生产有着密切的联系.但 DOC 在一天之内有 $2\sim 4\text{mg}/\text{dm}^3$ 的变化的确令人感到惊奇.海洋中的 DOC 虽然有多条输入途径,如径流输入、沉积物中有机物的释放、大气、降雨、颗粒物的转化等,但都无法解释这样大幅度的昼夜变化.按照这个数值估算(2.2.1),整个真光层的浮游植物每天每平方米可以生产 DOC  $40\text{g}$ ,而光合能力最大的陆生草本  $C_4$ 植物在最适宜条件下净光合作用的最大值<sup>[7]</sup>也不过如此.在海洋中,珊瑚礁生态群落具有最大的净初级生产能力,可达到每年每平方米  $4\ 000\text{g}$ <sup>[8]</sup>,平均每天每平方米也有  $11\text{g}$ ,但这个数值比  $40\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 仍相差甚远.

浮游植物在生长期间会排泄出有机物质,据研究这一部分可占到光合作用产物的百分之三四十<sup>[9]</sup>.最新研究结果表明,这个把光合作用产物中的很大一部分转化为 DOC 释放到水体中的过程是非常快的<sup>[10]</sup>,它几乎与光合作用同时进行. $^{14}\text{C}$ 法测初级生产力一般反应的是颗粒态部分,并未考虑 DOC 这一部分.台湾海峡8月初级生产力最高<sup>[2]</sup>, $^{14}\text{C}$ 法也仅得到  $1\sim 2\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的数值.显然,现有初级生产力的测定与现场观察到的真光层 DOC 的昼夜变化之间存在着一个极大的矛盾.造成这个矛盾的主要原因可能是:(1)初级生产力的测定过程中的培养条件与现场自然环境的差异;(2)自然环境中 DOC 总是处在一个快速的生产与消耗的动态平衡之中,而初级生产力的测定方法一般只反应了净结果;(3)DOC 的准确测定仍是 DOC 研究的一个尚未很好解决的难题.

### 2.4.2 微生物利用 DOC 的速率问题

微生物利用 DOC 的速率仍是目前研究的热点<sup>[11~14]</sup>,鉴于大部分新产生的 DOC 都在真光层内就被消耗掉的结论(2.2.1),微生物对 DOC 的利用速率的量级与浮游植物产生 DOC 的量级应是相当的,按本研究结果估计会在  $50\mu\text{g}/(\text{dm}^3\cdot\text{h})$ 以上.直接测定微生物利用 DOC 的速率是十分困难的.本研究讨论的 DOC 是指能通过玻璃纤维滤膜(GC/F, Whatman)那部分有机碳,不仅包括真溶解态,也包括胶体态有机碳.实际上,同真溶解态的 DOC 相比,微生物更能利用高分子量的、胶体态的有机碳. Rainer<sup>[5]</sup>用天然水体所作的 DOC 培养实验得到这样的结果:微生物在以  $17.5\mu\text{g}/(\text{dm}^3\cdot\text{h})$ (在培养的初期会更大)的速度利用范围在  $0.1\mu\text{m}$  至约  $1\text{nm}$  的颗粒有机碳(在本文中属于 DOC)的同时,利用小于  $1\text{nm}$  有机碳的速度(不显著)却非常小,不超过  $2.1\mu\text{g}/(\text{dm}^3\cdot\text{h})$ .

### 2.4.3 DOC 的输出生产力问题

由本研究可看出,真光层产生的 DOC 向下输送所形成的 DOC 在垂直方向上的浓度梯度(尤其是8月).由于8月 NC1站  $40\sim 60\text{m}$  水层 DOC 的垂直剖面稳定,可对真光层底部 DOC 的输送速率作以下估算:(1)DOC<sub>old</sub>的消耗速率  $U$  按  $40\sim 60\text{m}$  DOC 在11点与23点之间的差值估算: $U=0.0275[(\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h}))]$ ;(2)  $40\sim 60\text{m}$  DOC 浓度梯度  $G$  为  $0.054\ 25\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{m})$ ;(3)假设: $U$  在  $40\sim 60\text{m}$  范围内不变,DOC(不管是胶体态还是真溶解态)向下运动的平均速度  $V$  不变,则  $V=U/G=0.51(\text{m}/\text{h})$ ;(4)每一水层 DOC 向下输送的速率  $P$  依 DOC 的浓度不同而不同:

$$40\text{m 层}: P = 2.69 \times 0.51 = 1.37\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}),$$

$$60\text{m 层}: P = 1.61 \times 0.51 = 0.82\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

显然,随着深度的增加,DOC 向下输送的速度会迅速地减小,因为 DOC 浓度变得越来越小.台湾海峡生产力高,水中吸收光线的颗粒及胶体态物质较多,真光层不深,DOC (包括大量的胶体有机碳)不须要经过很长的距离即可出真光层,并很快到达海底,使得所计算的 DOC 输出通量很大. C. A. Carlson 等<sup>[15]</sup>曾作过有关研究,对比了100~150m 出各种方法计算的有机碳通量,认为 DOC 从真光层输出的速度可大于 POC 的. 由于本研究海区 SC1站的深度仅为60~70m,难以推测若深度在上百米时的情况,DOC 在此深度即使已基本逃离真光层也仍处在被快速矿化的过程中. 此时的 DOC 虽然在本文中被称为 DOC<sub>old</sub>,比起大洋深处的 DOC 来说,仍算是非常“新”的. 因此,这里所计算出的 DOC 输出通量比在大洋研究所得到的要大得多.

#### 2.4.4 昼夜变化规律与混合数据的处理

由于海洋调查本身的局限性,海洋调查所得到的数据往往既非静态数据,又非动态数据,这给人们认识海洋世界内在的规律带来了困难. 对于 DOC 来讲,其数值的上下波动不仅由生物活动引起,也存在水动力的叠加作用. 在本研究中,生物活动的作用是主要的. 因为 DOC 在一天之中变化很大,在研究 DOC 的空间分布及其他规律需要滤除昼夜变化的干扰,但这必须是在充分认识昼夜变化的规律以后才能实现. 依此类推,昼夜变化的研究对其他许多参数也是十分重要的,如营养盐、POC 等. 总之,对生物活动所引起的昼夜变化的研究应受到足够的重视.

### 3 结语

(1) 台湾海峡真光层中 DOC 昼夜变化很大 (2~4mg/dm<sup>3</sup>),且变化的幅度有季节差异和空间差异.

(2) DOC 昼夜变化的总的规律是白天比晚上高,夜晚始终处于低值.

(3) 依据 DOC 的昼夜变化可将 DOC 分为 DOC<sub>new</sub>和 DOC<sub>old</sub>两部分;DOC<sub>new</sub>在真光层中快速地产生、消耗、再循环;DOC<sub>old</sub>则相对稳定,可从真光层底部输出.

(4) DOC 的快速变化表明 DOC 的产生和被细菌消耗利用的速度都非常快,估计可达到 50μg/(dm<sup>3</sup>·h)以上.

本文承国家海洋局第三海洋研究所傅天保研究员协助测试 DOC,特此致谢.

#### 参考文献

- Hedges J I. Global biogeochemical cycles: progress and problems. *Mar. Chem.*, 1992, **39**, 67~93
- 洪华生,丘书院,阮五崎等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流生态系研究. 北京: 科学出版社, 1991, 339
- William P M and E R M Druffel. Radio carbon in dissolved organic matter in the central North Pacific Ocean. *Nature*, 1987, **356**, 696~698
- Martin J M, M H Dai. Significance of colloids in the biogeochemical cycling of organic carbon and trace metals in the Venice Lagoon (Italy). *Limnol. Oceanogr.*, 1995, **40**, 119~131
- Rainer M W Amon, Ronald Benner. Rapid cycling of high molecular weight dissolved organic matter in the ocean. *Na*



- ture, 1994, **369**, 16
- 6 Mohammed E B S. Ecological roles of marine microorganisms in Taiwan Strait and nearshore waters. Master thesis, Environmental Science Research Center of Xiamen University, 1995, 17
  - 7 曲仲湘, 吴玉树, 王焕校等. 植物生态学. 北京: 高等教育出版社, 第二版, 1983, 39
  - 8 王伯荪. 植物群落学. 北京: 高等教育出版社, 1987, 128
  - 9 Riley J P, G Skirrow 著, 崔清晨等译. 化学海洋学, 第二卷. 北京: 海洋出版社, 1982, 333
  - 10 Wood A M, H Rai, J Garnier, T Kairesalo, S Gresens, E Orive, B Ravail. Practical approaches to algal excretion. *Mar. Microb. Food Webs*, 1992, **6**, 21~38
  - 11 Coffin R B, J P Connolly, P S Harris. Availability of dissolved organic carbon to bacterioplankton examined by oxygen utilization. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1993, **101**, 9~22
  - 12 Zweifel U L, B Norrman, A Hagstrom. Consumption of dissolved organic carbon by marine bacteria and demand for inorganic nutrients. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1993, **101**, 23~32
  - 13 Azam F, D C Smith, A F Carlucci. Bacterial transformation and transport of organic matter in the southern California Bight. *Prog. Oceanog.*, 1992, **30**, 151~166
  - 14 Paerl H W, B W Bebout, S B Joye. Microscale characterization of dissolved organic matter production and uptake in marine microbial mat communities. *Limnol. Oceanogr.*, 1993, **38**(6): 1150~1161
  - 15 Carlson C A, H W Ducklow, A F Michaels. Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea. *Nature*, 1994, **371**(29): 405~408