

海水颗粒有机碳(POC)变化的生物地球化学机制

张乃星^{1,2}, 宋金明^{1,*}, 贺志鹏^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:海水中颗粒有机碳(POC)的生物地球化学行为是海洋碳循环研究的重要组成部分,近年来的研究取得了重大进展,主要阐述了海水 POC 生物地球化学研究的概况。海水 POC 在海洋中的分布受各种物理、化学、生物过程等多种因素的影响。不同海域、不同水层 POC 的含量与组成差异很大,在水平分布上,近岸高于远海,垂直分布上,表层高于中下层,含量通常为几十到几百个 $\mu\text{g/L}$,主要由陆源碎屑、浮游植物、浮游动物及其新陈代谢产物和死亡残体组成,海水 POC 可来源于陆源、海源(海洋生物的生产)、海底沉积物的再悬浮以及溶解有机碳(DOC)的转化,其中海源是其主要贡献者。海水 POC 与生物过程的关系密切,海洋生物既是 POC 的组成部分也是 POC 的重要生产者,通过摄食-代谢过程产生碎屑 POC,通过垂直洄游促进 POC 的向下沉降,通过细菌的降解将 POC 转化为其他形态。POC 参与再循环与营养盐(特别是氮、磷、硅)之间有重要的协同作用,生命 POC 的新陈代谢造成了营养盐浓度的变化,反过来,营养盐浓度的变化又改变了生命 POC 的组成及数量;无生命的 POC 一方面在生物及化学作用下分解矿化释放出营养盐,及时补充了水体中氮、磷、硅等生源要素的含量,这在高生产力的珊瑚礁区尤为明显。另一方面,其又通过在沉积物中的矿化,产生吸附位点,吸附营养盐,影响着营养盐在沉积物与水体中的交换。

关键词:颗粒有机碳(POC); 生物地球化学行为; 生物过程; 营养盐

文章编号:1000-0933(2006)07-2328-12 **中图分类号:**P734 **文献标识码:**A

Biogeochemical mechanism of particulate organic carbon (POC) variations in seawaters

ZHANG Nai-Xing^{1,2}, SONG Jin-Ming^{1,*}, HE Zhi-Peng^{1,2} (1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2328 ~ 2339.

Abstract: Marine biogeochemistry of particulate organic carbon (POC), as one of the most important branches in the global carbon cycle, is connected with biological pump process and environmental variation in ocean. Marine POC study is a key link to demonstrate marine biogeochemical process. In this paper, Marine biogeochemical characteristics of POC in seawater is mainly reviewed.

The distribution of POC in seawater is affected by many factors, such as physical, chemical and biological processes. In general, the high concentrations of POC, ranged from tens to hundreds $\mu\text{g/L}$, appear in coastal water and surface water, and low in offshore water and bottom water. But in the regions of surface sediment strongly resuspension such as the East China Sea (ECS), the POC vertical profiles show the contents of POC increase with the depth and have a high content in the bottom water. The POC is mainly derived from terrigenous material, biogenic matter and sediment resuspended. The source of POC could be deduced by estimating $\delta^{13}\text{C}$ or C/N which should be combined to differentiate POC source. Of course, the information of POC source is also obtained from POC/PON (particulate organic nitrogen), the relationship between POC and Chl a or TSM (total suspended matter).

基金项目:青岛市科技将才专项计划资助项目;中国科学院“百人计划”资助项目;中国科学院创新重大资助项目(No. KZCX1-SW-01-08)

收稿日期:2005-02-03; **修订日期:**2005-09-10

作者简介:张乃星(1980~),男,山东即墨人,博士,主要从事海洋生物地球化学研究。

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

Foundation item: The project was supported by Outstanding Scientists of Qingdao, the “100 Talents Project” of Chinese Academy of Sciences, Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences(No. KZCX1-SW-01-08)

Received date:2005-02-03; **Accepted date:**2005-09-10

Biography: ZHANG Nai-Xing, Ph.D., mainly engaged in marine biogeochemistry.

It is estimated that the POC derived from the river input is about 0.43Gt/a and mainly derived from the detritus of grassland, cropland, forest and human discharged in the estuary. In oceans, the biogenic matter including living and nonliving POC is comprised of phytoplankton, zooplankton, detritus and fecal pellets, which play an important role in marine biological pump. Nonliving POC is very important in carbon cycling because it may be ingested by plankton and thus involved into food web and turns into living POC.

Marine organism is very important in POC transformation. Zooplankton and nekton, which can ingest in the surface waters at night and metabolize the fecal pellets below the mixed layer, are the important producers of POC. In some sea areas such as the Arabian Sea, the flux of fecal pellets is about $156\text{mgm}^{-2}\text{d}^{-1}$ and account for 12% of the primary productivity. Zooplankton and nekton can also actively increase the export of POC from the surface to the deep layer by vertical migration which is very obvious in the open sea. Generally, the POC flux by the contribution of plankton's vertical migration is from 4% to 34% in the total POC flux, in some sea areas it is up to 70%. Microbial communities are not only an important POC source but also a significant contributor for the transformation of POC while oxygen penetration is generally limited to the upper of the sediments. Bacteria can transform POC into dissolved organic carbon (DOC) and dissolved inorganic carbon (DIC) by extracellular enzymatic hydrolysis, and the result is that POC could take part in carbon recycling process.

The POC in recycling has good relationships with nutrient, especially nitrogen, phosphorus and silicon because the phytoplanktons absorb the nutrient according to the constant Redfield ratio, But if the nutrient ratio is out of Redfield ratio, one or several nutrients will confine phytoplankton reproduction, growth and the primary productivity, and the composing and biomass of the living POC also will change. Such as the Bohai Sea, the change of nutrient ratio has led to the replacement of diatoms by dinoflagellates, which is the main feature of phytoplankton community changes in recent years. On the other hand, the metabolism of living POC may affect nutrient contents by absorbing and excreting, such as $\text{NH}_4\text{-N}$, which is partly released by the excretion of living POC. There is a positive correlation between nutrient and nonliving POC due to organic matter mineralization. In Jiulongjiang Estuary and Western Xiamen Harbour, the positive correlation between POC with the dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) suggested that the DIN and DIP partly come from the decomposition of the POC. When environmental situation such as temperature, redox condition etc. is appropriate in coastal sediment, $\text{NH}_4\text{-N}$ is controlled by POC decomposition.

Key words: particulate organic carbon (POC); biogeochemical mechanism; biological processes; nutrient

近十几年来,海洋碳循环一直是国际研究的热点,其重要原因之一是海洋直接决定了大气二氧化碳作用下全球气候的变化趋势。研究表明,人类每年向大气排放的 CO_2 约有一半为海洋所吸收,吸收进入海洋的碳经复杂的生物地球化学过程转化为不同形式的碳,或在海洋中循环,或被转化为其它形式的碳参与生物代谢,或形成颗粒物被最终埋葬,或重新被释放进入大气。这极其复杂的过程是科学家们研究海洋碳循环必须面对的科学问题,同时也说明了海洋碳循环的研究任重而道远。

海洋所吸收的 CO_2 被真光层中的浮游植物通过光合作用所利用,最终转化为 POC 被固定下来。最新的研究表明,全球海洋每年 POC 的输出通量为 $(9.5 \pm 1)\text{Gt}^{[1]}$,这可能使海洋在短期(季度~几十年)内对大气 CO_2 的调控有决定性的作用。海水中的 POC 在整个海洋碳循环及海洋生态系统中举足轻重,它不仅在一定程度上控制着海水中溶解有机碳(DOC)、胶体有机碳(COC)以及溶解无机碳(DIC)的行为,而且还是生物摄食-代谢中的主体,对海洋生态系统食物链结构影响巨大,所以,研究海洋中 POC 的生物地球化学机制意义重大。

对海洋 POC 的研究已有近百年的历史,但对其行为机制的研究还是随着全球海洋通量联合研究(JGOFS)的实施而开展的,目前,世界不同海域 POC 的数据时有报道^[1~5],对其研究的深度也明显增加,为进一步深入开展这方面的研究,本文从海水 POC 的分布、来源、组成,POC 与生物作用过程的关系,尤其是与生物泵过程的关系,以及 POC 与营养盐的耦合作用等方面阐述了海洋 POC 生物地球化学研究进展。

1 海水中 POC 的地球化学特征

1.1 POC 的分布特征

海洋中 POC 无论是水平方向上或是垂直方向上的分布都是一个极其复杂的过程。它们的含量分布受各种物理、化学和生物过程的影响,如陆地径流、沿岸上升流、光照、营养盐及生物活动等。

一般而言,POC 的水平分布与营养盐的水平分布相似,呈现湾内高于湾外,近岸高于远海的分布特征,并且有着明显的季节变化^[2,3]。在南极普里兹湾,湾内平均含量 $527.14\mu\text{g L}^{-1}$,湾外平均为 $171.72\mu\text{g L}^{-1}$,湾内 POC 含量远远大于湾外^[4]。Gundersen 等调查阿拉伯海 POC 和叶绿素的分布发现,在水深较浅的近岸陆架区,表层海水中 POC 含量为 $10\sim 12\mu\text{g L}^{-1}$,随着向远海的延伸,POC 含量逐渐下降到 $4\sim 7\mu\text{g L}^{-1}$ ^[5]。造成这种分布现象的主要原因是近岸及海湾,POC 主要受陆地和海区生物活动所控制。河流及沙尘携带大量的陆源 POC 及营养盐到近海和沿岸上升流将底部营养盐带至上层水域,极大的促进了近岸浮游植物的初级生产和浮游动物的次级生产,从而导致水体中 POC 的大量增加。

由于受初级生产力、浮游动物量以及沉积物再悬浮、陆源输入等的影响,不同海区 POC 的含量各不相同,范围在几十到几百个 $\mu\text{g L}^{-1}$ 。对比各海区 POC 浓度发现,在受陆源输入影响较大的 Chesapeake 湾和受上升流影响的秘鲁海域,POC 的浓度较高,而在低营养盐含量低生物量的墨西哥湾和黑潮水域 POC 的含量较低(表 1)^[6]。

表 1 不同海域海水中 POC 的含量

Table 1 POC concentrations in seawaters ($\mu\text{g L}^{-1}$)

海区 Study region	台湾海峡 Taiwan Strait	Chesapeake bay	南印度洋 (表层)South Indian (surface)	黑潮区 Kuroshio region	秘鲁海流区 Peru current region	北大西洋 North Atlantic	Middle Atlantic Bight	墨西哥湾 Mexico gulf	地中海西部 West Mediterr- anean
含量 Content	120 ± 9	1812 ± 636	18 ± 164	60 ~ 80	250 ~ 125	80 ~ 130	4.8 ~ 108	12 ~ 60	48 ~ 960

垂直分布上,在近岸浅海水域,由于上下水体混合均匀,水体中 POC 分布比较一致;在外海深水区,POC 则一般呈现出由上往下逐渐降低的趋势^[3]。在真光层,浮游植物通过光合作用生产了大量的 POC,在 POC 向下沉降过程中,随着深度的增加,其不断地被浮游动物摄食和微生物分解^[7]。在我国南海北部 1000 ~ 3350m,南海中部 1200 ~ 3700m 的中下水层,POC 通量大约比上层减少了 50% 左右,而最终沉到底部并保存于沉积物中的只占 POC 通量的 28% 和 15%^[8]。POC 在沉降过程中,随着其通量的逐渐下降,POC 中的 C/N 比却不断增高。Benjamin 等在热带太平洋东北部使用小的圆柱形沉积物捕捉器所获得的 POC 在不同深度的通量发现,在 130m 水层,POC 的通量为 $(123.6 \pm 94.8)\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,在 480m 其通量下降为 $(44.4 \pm 7.2)\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,而 C/N 却随着深度的增加从 6.9 上升到 9.1^[9]。这主要是因为 POC 中含有的氨基酸、氨基糖类物质在沉降过程中受到细菌、溶解氧的作用而比碳更容易降解的缘故。

在海底水动力环境较强或底栖生物扰动频繁的海区,由于沉积物的再悬浮,底部 POC 含量反而会增大^[10]。赵继胜等就冬季东海典型海域 POC 的垂直分布研究表明,由于受黄海沿岸流影响,中陆架砂质区 POC 和悬浮体含量很高,垂直分布呈现出底层高于表层的现象^[11]。

1.2 POC 的组成

海洋 POC 可分为生命与非生命两部分。生命 POC 来自生物生产过程,包括微小型光合浮游植物,大型藻类以及细菌、真菌、噬菌体、浮游动物、小鱼小虾、海洋哺乳动物;非生命 POC 也称为有机碎屑,包括海洋生物生命活动过程中产生的残骸、粪便等。不同海区 POC 的组成各不相同,对楚科奇海的研究发现,沉降的生命 POC 主要由粒径 $< 330\mu\text{m}$,以硅藻为优势的浮游植物(包括硅藻、甲藻、绿藻、鞭毛藻)、小型浮游动物(纤毛虫类、肉足虫类)和以桡足类为优势的大型浮游动物(桡足类、箭虫、腹足类、枝角类)组成^[12]。在我国东海,沉降的生命 POC 主要由浮游植物(圆筛藻、具槽直链藻、曲舟藻和舟形藻)、浮游动物(桡足类、砂壳纤毛虫、瓣鳃类幼虫)以及非生命的浮泥小颗粒、浮游动物粪便、蜕皮和桡足类残体组成^[13]。

POC 中生命物质的比例,以往是通过公式: $\text{POC} - \text{Chl } a \times f = \text{碎屑 POC}$ (f 取 25 ~ 250) 来计算的,但是这种

方法忽略了其他生物如细菌等的贡献,因此目前也有通过测定 ATP(三磷酸腺苷)在总 POC 中的含量来区分生命与非生命部分的。刘文臣等通过 ATP 定量区分了东海 POC 中的生命与非生命部分,结果表明,生命部分在春秋两个季节的 POC 中所占比例各不相同,分别为 10% 和 4%,C/N 比分别为 7.63 和 15.23,说明春季 POC 主要受生物活动影响,而秋季生物活动对 POC 的影响较小^[14]。在大西洋百慕大海区,随着深度的增加,POC 中生命部分与非生命部分的比例不断发生变化。在 65m 以上水层,总 POC 中浮游植物占 32%,微型异养生物占 15%,非生命部分占 54%,在 65~135m 水层,生命部分与非生命部分之比为 35:65,在 135m 以下,为 16:74^[15]。

1.3 POC 的来源

不同海区、不同深度,海洋中 POC 的来源各不相同。按其来源途径可分为陆源(通过河流、大气沉降输入)、海源(海洋生物的生产)以及海底沉积物的再悬浮。

1.3.1 陆源 河流输入是海洋 POC 的一个重要来源,其每年将大量的 POC 输入近海。Schlunz 等估计,全球每年通过河川径流进入海洋的 POC 为 0.43Gt^[16]。

表 2 河口区 POC 的主要来源

Table 2 The main sources of POC in estuaries

河口 Estuary	主要来源 Main source	组成 Composition	作者 Authors	时间 Date
Amazon Estuary	陆源 Terrigenous	树叶,木质素,土壤及粗 POC 的解聚物 Leaves, Lignin, Soil and decomposition of POC	Hedges <i>et al</i> ^[17]	2000
Atchafalaya Estuary	陆源 Terrigenous	C ₃ 植物碎屑 C ₃ Plant debris	Gordon <i>et al</i> ^[18]	2003
Guanabara Estuary	海洋、陆地、河口混合 Mixture of marine, terrestrial and estuarine source		Renato <i>et al</i> ^[19]	2002
长江口及邻近海域 Changjiang River Estuary and adjacent region	陆源为主的表层沉积物的再悬浮 Resuspension of terrigenous sediment	长江输入的颗粒有机物、海域浮游生物的代谢产物 Particulate organic matter from Changjiang River and the fecal pellet of zooplankton	宋金明 ^[20] Song Jinming	2004
黄河口 Yellow River Estuary	陆源 Terrigenous	植物,土壤 Plant, Soil	蔡德陵,等 ^[21] Cai Deling <i>et al</i>	1993
珠江口 Zhujiang River Estuary	陆源 Terrigenous	植物碎屑(草地,农田,森林)Plant debris (Grass land, Farmland, Forest)	魏秀国,等 ^[22] Wei Xiuguo <i>et al</i>	1990

我国及国外各大河流输入近海的陆源 POC 主要来源于草地、农田、森林植物碎屑以及土壤中的有机碳、人类排废等^[23],而河口区自生的 POC 则很少,其主要原因是在河口区,淡水与海水相混合,水动力环境强,从而使得该水域中总悬浮物(TSM)浓度很高,导致水体的透光率下降,抑制了植物的光合作用,浮游植物的初级生产力也就很低。

大气中的有机物质以气态或颗粒态形式存在,通过干式或湿式沉降到海洋,也构成了海洋 POC 的一种来源。据估算,全球每年由降水输送到海洋的有机物(以碳含量表示)为 0.22Gt^[24]。由于风、降水的不确定性,目前对这方面研究的较少,数据存在一定误差,但是其对海洋 POC 的贡献是不容忽视的。

1.3.2 海源(海洋生物体及其代谢) 海洋浮游植物、浮游动物及其残骸、粪便以及微生物是海洋中 POC 的主要贡献者。在受陆源影响较小的海区,POC 主要来源于海洋生物及其新陈代谢产物^[4,25]。在日本 Seto Inland 海西部,Yamaguchi 等发现 POC 与 Chl a 有高度的正相关性,相关公式为:POC(mg g⁻¹) = 76.5 × Chl a(mg g⁻¹) + 26.0($r = 0.95, p < 0.01, n = 9$),从而推断在该海区,POC 主要来源于海洋浮游植物及其残骸^[26]。在夏季的北冰洋,中型浮游动物对总 POC 的贡献约为 40%^[27]。与浮游植物、浮游动物相比,微生物也是海洋 POC 重要组成部分。在加利福尼亚海盆和闽南、台湾浅滩上升流区,细菌有机碳(BOC)分别占总 POC 的 14%~62% 和 11.75%^[28,29]。

1.3.3 沉积物的再悬浮 沉积在海洋底部的 POC,当受到外界因素的扰动时,便会发生再悬浮而重新进入到水体中。据统计,在大陆架及大陆坡的沉积物中,有 40%~85% 的有机碳要发生再悬浮。在我国近海,沉积

物中 POC 的再悬浮是海洋 POC 的一个重要来源。宋金明根据沉降颗粒物特征化学成分的垂直通量及其在两种悬浮颗粒物中含量的关系,建立化学模型定量计算了东海陆架海洋中悬浮 POC 的比率,发现在某些站位再悬浮 POC 在沉降 POC 中占相当高的比率,特别在离海底 5m 的水层 (>96.0%),在离海面 15m 的水层再悬浮率也达 32.9% 以上^[13]。在黄海海域,夏季底层沉降颗粒物再悬浮比率为 90%~96%^[30]。

沉积物中 POC 的再悬浮受多种因素的影响。对东中国海调查发现,由于底部沉积物的再悬浮,在大陆架中部和深处 POC 有很高的含量,尤其在海上风浪较大的时候,POC 含量更高。当海上风速为 15m/s 时,底部 POC 的含量增加到原来的 3 倍^[2]。除了风以外,强烈的海流,沿岸上升流以及陆地径流和底栖生物扰动等都会影响沉积物中 POC 的再悬浮。

此外,DOC 转化为 POC 也是海洋 POC 的一个不容忽视的来源。水体中大分子的 DOC 很容易被吸附在液-固、液-液(例如液膜)或气-液界面上,从而形成有机聚集体。在河口区,随着淡水与海水的混合,pH 值升高,盐度增加,淡水中的金属离子很容易形成氢氧化物,部分 DOC 会与氢氧化物发生共沉淀形成有机颗粒物。对苏格兰 4 条河流的研究发现,在河口区,有 3%~11% 的 DOC 转化为 POC^[31]。

海洋 POC 的来源多种多样,即使对于同一海区,不同时间,不同空间 POC 的来源组成也各不相同。判断其来源组成,对进一步探讨 POC 的控制因素非常重要。目前判断 POC 来源组成的方法主要有 $\delta^{13}\text{C}$ 法和 C/N 法。 $\delta^{13}\text{C}$ 法是根据生物体内稳定同位素 ^{13}C 相对比值与其食物密切相关这一原理而建立起来的一种追踪生态系统中碳的来源的方法,目前在判断 POC 来源方面应用较为普遍^[32],而 C/N 法则是根据生物体内碳、氮含量在陆地和海洋生物体中的比值范围不同而建立的,是经验的总结,准确性低于 $\delta^{13}\text{C}$ 法^[33]。

表 3 海洋 POC 来源的判定

Table 3 Judgment criteria of POC sources

作者 Authors	判别标准 Judgment criteria	时间 Time
洪华生,等 ^[34] Hong Huasheng <i>et al</i>	$\delta^{13}\text{C} - 20\text{‰}$ - 27‰	1994
Cifuentes <i>et al</i> ^[35]	C/N 2.6~4.3	1996
	7.7~10.1	
	> 50	
Goffi <i>et al</i> ^[36]	$\delta^{13}\text{C} - 18\text{‰} \sim - 21\text{‰}$	2000
Aitken-head <i>et al</i> ^[37]	C/N 7.5~20.8	2000
	14~61	

对于 POC 来源组成的判定,单独采用 $\delta^{13}\text{C}$ 或 C/N 值不足以准确判断,而应该将这两种方法结合使用^[36,38],此外,还有一些学者认为通过 POC/PON 比值(POC/PON < 12,海源;POC/PON > 12,陆源),测定 POC 与 Chl a、TSM 的相关性也可以确定^[4,39],用此方法测定黄海 POC 主要来源于海洋自生^[40],Humber-Ouse 河口 POC 来源于陆地植物碎屑^[41],南极普里兹湾和南沙渚碧礁海区 POC 来源于浮游植物^[4,38]。

2 POC 与生物过程的关系

海洋真光层的浮游植物通过光合作用吸收水体里的溶解 CO_2 ,通过一系列的光化学反应将其转化为颗粒态,即有生命的 POC(大多为单细胞藻类,如硅藻等,粒径从几个到几十个微米),这些有机碳再通过食物链(网)逐级转移到更大的颗粒如浮游动物、鱼类等。未被利用的活体 POC 将死亡、沉降和分解,同时各级动物产生的粪团、蜕皮等构成了大量非生命 POC 向下沉降。生活在不同水层中的浮游动物,通过垂直洄游也构成了 POC 由表层向深层的接力传递。另一方面,各种海洋生物通过新陈代谢活动产生大量的 DOC 释放到水体中,这些有机物有一部分将被氧化降解而进入再循环,其余的将被异养微生物利用后通过微型食物网(microbial food web)进入主食物网,并转化为较大的 POC。上述由有机物生产、消费、传递、沉降和分解等一系列生物学过程构成的碳由表层向深层的转移称之为生物泵^[42,43]。海洋生物泵过程异常复杂,海洋中 POC 的生产、消耗及向下输运与海洋生物的生长繁殖及新陈代谢过程密切相关。

2.1 排泄颗粒物沉降

海洋中的碳绝大部分是通过微型生物食物网来进行循环的,只有很小一部分以食物的形式被原动物所

利用。由于大颗粒具有较高的沉降速率和较短的食物链,因此大生物体比小生物体在 POC 的沉降过程中所起的作用更为重要。浮游动物和自游动物通过在真光层摄食各种小型浮游生物,在混合层以下排泄粪便颗粒物对于 POC 的沉降贡献巨大。

在不同海区,不同季节,因浮游动物生物量和组成的不同排泄颗粒物组成和通量各异。Dagg 等用放射性 ^{234}Th 研究了大型桡足类排泄的颗粒物对大西洋 170°W 附近海区 POC 及生源 Si 的贡献发现,在春季,100m 水中排泄颗粒物约占 POC 沉降通量的 22%~63%,占生源 Si 通量的 42%~107%;而在夏季,排泄颗粒物占 POC 和生源 Si 通量的比例却很小,分别为 2%~7%和 1%~5%^[44]。在阿拉伯海,牧食的中型浮游动物排泄的颗粒物通量为 $156\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,占初级生产力的 12%,这一较高的比例与该海区高的浮游动物生物量、充足的大型硅藻、适宜的温度是密不可分的^[45]。在该海区,春季季风和东北季风盛行时,排泄颗粒物通量明显偏高,而西南季风对排泄颗粒物通量影响较小,对未被摄食的浮游植物细胞沉降影响较大。在南极 Ross 海,不同月份原生动物的排泄颗粒物通量为 $4.6\sim 54.5\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,通量变化明显,与该海区的生物量及其组成密切相关^[46]。

在太平洋,对比亚热带贫营养的环流海区和赤道(高营养盐、低叶绿素)海区的数据显示,中型浮游动物的生物量和排泄颗粒物通量,在赤道(高营养盐、低叶绿素)海区分别为亚热带贫营养的环流海区的 2.5 倍和 2 倍,可见在该赤道海区,排泄颗粒物对沉降 POC 的贡献是巨大的^[47]。Dam 等曾估测在该海区中型浮游动物的排泄颗粒物占沉降 POC 总通量的 100%^[48]。在夏威夷,排泄颗粒物对 POC 总通量的贡献都较大西洋百慕大海区高,这与在该海区较高的浮游动物生物量和较快的生长率(在夏威夷和百慕大海区,中型浮游动物生产量分别为 $26\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和 $10.8\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$)是分不开的^[49]。

浮游动物中的桡足类、海樽类和翼足类普遍存在于全球海洋中,虽然其很少密集分布,但是却具有很高的摄食率,其中尤以海樽类为甚(可比桡足类的清滤率高数百倍),可大量消耗周围海水中微小的悬浮颗粒物,并将其转化为大的颗粒物,从而加快颗粒物和排泄颗粒物的沉降速率。Mayzaud 等研究发现,在南印度洋,中型浮游动物和小型自游鱼类的组成和生物量随季节不断发生变化,桡足类经常在种群和数量上占优势。在夏季,大量的海樽类聚集后,抑制了桡足类和翼足类的数量,同时对浮游植物造成了很大的摄食压力,使浮游植物不能大量繁殖^[50]。因此,浮游生物物种的改变不仅改变了生物量,而且改变了初级生产力的消耗量,沉降颗粒物的组成和 POC 向深海的沉降通量。

2.2 浮游动物垂直洄游

许多种类的浮游动物白天生活在真光层以下,晚上则通过垂直洄游到表层来进行摄食活动,并在黎明来临前再次下沉。浮游动物通过在表层摄食浮游植物,将其贮存在体内并在深层进行代谢吸收,以及浮游动物生长过程中的蜕皮、死亡等可以有效的促进 POC 向深层的沉降。Goutx 等认为浮游动物的摄食活动是水华末期 POC 沉降的主要媒介^[51]。在楚科奇海,夏季融冰期真光层中来源于大型桡足类的 POC 估算值为 $108.67\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,占浮游动物 POC 总量的 95.3%,而源于硅藻的 POC 通量绝对值较低,为 $0.107\sim 0.113\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,浮游动物的表观碳通量远远高于浮游植物。陈波等认为浮游动物的昼夜垂直运动是造成这一现象的主要原因^[12]。在赤道太平洋西部,由于中型浮游动物和小型自游动物的昼夜垂直迁移所造成的 POC 沉降通量分别为 $9.97\sim 23.53\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和 $15.2\sim 29.9\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$,对总 POC 的贡献巨大^[52]。

郑佩如等在南沙渚碧礁的研究发现,POC 含量在一天之间变化很大。18:00~21:00,POC 含量由 $91\mu\text{g/L}$,增加到 $227\mu\text{g/L}$,从 00:00 到 6:00 POC 含量又从 $185.5\mu\text{g/L}$ 迅速减少到 $104\mu\text{g/L}$,夜间平均值为 $155\mu\text{g/L}$,近似于白天的 2 倍^[39]。对东海不同水层水体中 POC 的含量分布调查发现,Chl a 的最大值出现在 18:00,然而由于浮游动物夜间上浮到真光层摄食浮游植物,致使表层海水(即 0、10、20m POC 的平均值)POC 的最大值均出现在午夜 24:00^[53]。这主要是因为白天光合作用强烈,到傍晚浮游植物的丰度迅速增加,为浮游动物提供了充足的食物,栖息在底部的浮游动物如十足类、糠虾、多毛类等便会在夜间上浮觅食,使水体中的浮游动物量大幅增加,因此导致有生命的 POC 含量的增加。

表 4 浮游动物的垂直迁移对 POC 输出通量的影响

Table 4 The impact of zooplankton vertical migration on POC output flux in oceans

海区 Study region	迁移生物量(mgCm ⁻²) Migrating biomass	迁移通量(mgCm ⁻² d ⁻¹) Migratory flux	POC 平均通量(%) % of mean POC flux	时间 Time
热带及亚热带大西洋 Subtropical & tropical Atlantic several stations		5.5(2.8~8.8)	6(4~14)	9月 September
大西洋百慕大 Bermuda Atlantic	191(82~536)	14.5(6.2~40.6)	34(18~70)	3、4月 March/April
赤道太平洋 Equatorial Pacific	96	4.2	18	3、4月 March/April
	155	7.3	25	10月 October
赤道太平洋 HNLC 海区 Equatorial Pacific oligotrophic HNLC region	47	3.8	8	9月 September
	53	7.9	4	10月 October
北大西洋 North Atlantic	(5~480)		(19~40)	
大西洋百慕大 Bermuda Atlantic	50(0~123)	2.0(0~9.9)	8(0~39)	1a
夏威夷海 Hawaii Ocean	142	3.6(1.0~9.2)	15(6~25)	1a

从表 4^[54]中可以看出,浮游动物的垂直迁移对 POC 向深海的输送起重要作用,由浮游动物的垂直迁移引起的 POC 的输运平均占 POC 总通量的 4%~34%,最高时可达 70%,在西太平洋的亚北极海区更是高达 91.5%^[55]。对比其他因素如 DOC 的物理混合、粪便颗粒物的沉降以及重力沉降等对 POC 的贡献发现,其都与高的浮游动物垂直迁移量有着一定的相关性。

2.3 细菌作用

细菌作为海洋中的微生物在 POC 的循环转化过程中起着重要的作用。不同的细菌起的作用不同,自养细菌利用海水中的 CO₂ 通过光能或化学能合成 POC;而异养细菌作为营养物质的分解者和转化者,一方面把 POC 同化为可以被较高营养级生物所利用的生物量,一方面又可把 POC 分解成 DOC 或 DIC,提供给初级生产者,从而成为海水 POC 循环的重要桥梁。Uncles 等研究认为,细菌通过附着在 POC 上,利用其自身产生的外水解酶将 POC 转化为 DOC^[41]。

在沉积物中,由于 O₂ 只能深入沉积物中毫米或厘米级深度,所以厌氧细菌是沉积物中 POC 分解的主要贡献者。在大西洋东北部海区,Turley 等研究了 3 个站位深海表层沉积物中细菌数量、DNA 合成(用于测定细菌生长)和 POC、总氮(TN)含量和最新沉降的植物碎屑之间的关系发现,细菌量和 [³H]-胸腺嘧啶脱氧核苷的合成速率、沉积物、植物碎屑、POC 及 TN 的含量成正的指数关系。在沉积物表层,平均细菌量为 5.6~53.2 × 10¹⁰ cell/L,在植物碎屑中含量为 9.2~12.9 × 10¹⁰ cell L⁻¹, [³H]-胸腺嘧啶脱氧核苷的合成速率在表层沉积物和植物碎屑中分别为 14.8~593.7 pmolL⁻¹h⁻¹ 和 395.8~491.4 pmolL⁻¹h⁻¹^[56]。在 POC 的长距离沉降过程中,由于异养细菌的分解和中型浮游动物的摄食活动,POC 在到达底部沉积物以前绝大部分都被消耗掉。在北太平洋,POC 只有 6%~10% 到达 2000m 的水层^[1]。在北太平洋亚北极区,通过水体中碳平衡的研究发现,POC 是细菌需碳量的主要来源,而在 1000m 水层以下,细菌的需求却超过了 POC 的输入通量,这说明细菌碳代谢量中有一部分是来自海底表层沉积物中的 POC^[57]。

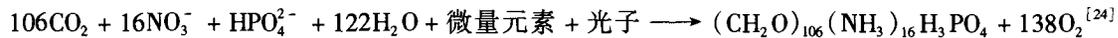
2.4 生物分泌物

海洋生物包括一些微生物分泌的粘液或藻类分泌的含有粘性有机质的膜或鞘,能够将沉降 POC 及其它矿物碎屑捕获并形成较大颗粒,加快 POC 的沉降速率。雷坤等对东海陆架北部泥质区悬浮体的絮凝沉积作用研究表明,在该海区存在许多浮游生物的遗体和海洋生物产生的黏液类的分泌物、粘膜和软组织等有机物,它们将与之接触的矿物碎屑、生物骨屑(包括硅藻、甲藻、有孔虫等)等粘结吸附在一起,一些大的有机质膜还可以将碎屑颗粒“捕集”起来形成大的絮凝体而迅速沉积^[58]。此外,浮游动物排泄的颗粒物也具有在其表面吸附碎屑物质的特点,可以将不易沉降的细小颗粒和生物骨屑粘结、吸附或捕集在一起形成絮凝体,连同有机质一起沉到海底。

3 POC 与营养盐的耦合关系

3.1 生命 POC 与营养盐的关系

有生命的 POC 即海洋生物,其生长繁殖除受光照、温度的影响外,还与海水中 N、P、Si 等营养盐的含量和比例密切相关。在海洋生物中,元素 C、N、P 的平均含量及其原子比为 C:N:P = 106:16:1,通常情况下,浮游植物对海水中无机 N、无机 P 的摄取是以恒定比例进行的,可用总反应式表示如下:



海洋动物以吞食浮游植物或其他微体动物的方式来摄取这些营养元素。彭云辉等对大亚湾微表层和次表层海水中营养盐与浮游植物关系的研究表明,三态氮中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 均与浮游植物中的 Chl a 有一定的负相关关系,通过对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 与 Chl a 的回归分析,认为浮游植物每消耗 $0.0089\mu\text{mol}$ 的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 可生成 $1\mu\text{g}$ 的 Chl a,每消耗 $0.64\mu\text{mol}$ 的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 可生成 $1\mu\text{g}$ 的 Chl a^[59]。

通过研究生命 POC 与营养盐的相关性,可以判定该海区受何种营养盐限制,以及浮游生物主要吸收何种形式的营养盐。Justic 等曾指出,如果海区的 N/P 比值与 Redfield 比值接近(10~22),海区将具有较高的生产力;浮游植物如果 N/P 比值高于 22,表明其生长受到 P 的限制;N/P 比值低于 10 则表明其生长受 N 的限制^[60]。在富营养的广西北海半岛近岸,该水域中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量分布具有随着其补充量与浮游植物消耗量的变化而明显不同的特征。相关分析表明该水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 与浮游植物(POC_b)有明显的负相关关系,N/P 高于 39.11, $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量成为限制该水域浮游植物生长的因素^[61]。对厦门港海域春秋两季的浮游植物 POC 与营养盐回归分析得知,该海域只有春季河口区的浮游植物 POC 与无机磷呈负相关关系,即 $[\text{POC}_b] = 1.321 - 1.116 [\text{P}]$ ($n = 6$, $r = 0.888$, $p > 95\%$),根据有关结果分析认为,该海域的初级生产力主要受磷的限制^[10]。在罗源湾,来源于浮游植物的 POC 与 N、P、Si 的关系为 $\text{POC}_b = 0.659 - 1.35 \times 10^{-2} [\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}] - 0.387 [\text{PO}_4\text{-P}] - 3.82 \times 10^{-3} [\text{SiO}_3\text{-Si}]$ ($R = 0.40$, $n = 54$),由于光合作用,浮游植物 POC 消耗了大量的营养盐^[36]。扈传昱等通过对南极普里兹湾 POC 与无机磷酸盐、无机氮的相关性分析认为,在该海区无机盐,特别是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 是浮游植物吸收的主要形式^[4]。

通过研究生命 POC 与营养盐的相关性,有助于了解浮游植物的群落结构,揭示其演替规律。浮游植物群落结构和演替规律除与浮游植物的地域性分布、温度及盐度有关外,还与 N、P、Si 等营养盐浓度及比例密切相关。水体中浮游植物是以一定比例吸收营养盐的,称为 Redfield 比(N:P = 16:1),当水体中的营养盐长期偏离 Redfield 比值时,则会影响到生物种群^[62],而这又将反过来影响 POC 的组成和供给。通过在胶州湾部分水域添加营养盐发现,一些实验中浮游植物的群落结构组成也发生了变化,并最终导致了以浮游植物为食的浮游动物种群及数量的变化^[63]。孙军等对渤海调查区浮游植物的群落及其动力学进行了初步研究,结果表明,浮游植物群落由硅藻占绝对优势逐渐转变为硅藻-甲藻共存为主的群落。甲藻占优以及绿藻在特定时期的普遍出现反映了渤海海区营养盐结构比例变化对海区生态系统结构的影响,N/P 比率的增加和 Si/N 比率的降低是造成这一结果的直接原因^[64]。在荷兰北海北部,由于 P/Si、N/Si 值的增加导致了硅藻被鞭毛虫等所代替,直接使浮游植物种类发生了变化,并且 *phaeocystics* 目前正有规律的爆发水华^[54]。

海水中营养盐的含量和分布控制着海洋生物的生长和繁殖,反过来,海洋生物的生长繁殖及新陈代谢又影响水体中营养盐的含量与分布,二者相互影响。

营养物质的再生部分是通过海洋生物的代谢排泄开始的,生物体在代谢过程中有相当一部分是直接以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的形式排出。在东中国海,由浮游纤毛虫排泄的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为 $0.1 \sim 63.8\text{mgNm}^{-2}\text{d}^{-1}$,提供了该海区初级生产所需 N 的 0.1%~93.8%^[65],说明由浮游纤毛虫排泄的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 可能对于该海区夏季和秋季维持较高的初级生产力有重要贡献。在烟台四十里湾,通过研究几种双壳贝类及污损动物的 N、P 排泄发现,在这些动物的 N 排泄中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 占主要部分,其中双壳贝类 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占总 N 排泄的平均值范围为 70.8%~80.1%;在 P 的排泄中,溶解有机磷(DOP)约占总溶解磷排泄的 15%~27%。据估算,整个四十里湾所养殖的双壳贝类在夏季每

天将排泄 4.54t 总溶解氮,其中氨氮 3.36t,氨基酸氮 0.69t,尿素氮 0.2t,同时每天磷的排泄为 0.57t 总溶解磷 (TDP)^[66],显著地影响了该海域营养盐的循环及含量。

浮游生物的昼夜迁移对营养盐的输出通量有重要作用。Hussain 等认为在贫营养的亚热带太平洋由于浮游动物(桡足类等)的垂直迁移明显的增大了 DIN 的通量^[67]。

此外,粒径较小的 POC - 细菌对水体中营养盐再生贡献巨大。细菌等微生物被认为是海洋中有机物质的主要降解者,其通过对无生命 POC 的分解,将其中的不溶性有机 N、P 转化为可溶性的 DIN、DIP 而释放到水体中,从而改变水体中营养盐的浓度。

3.2 无生命 POC 与营养盐的关系

海洋生物排泄的粪团或死亡的尸体等无生命 POC 中的 N、P 则在下沉过程中逐渐被分解矿化而释放到水体中,从而引起水体中营养盐浓度的改变。Gaudy 等研究认为在狮子湾,由浮游动物(主要是桡足类幼虫阶段)排泄的粪团分解矿化释放出的无机 N、无机 P 在春季是初级生产所需 N、P 的 31% 和 10%,而在冬季则分别为 32% 和 > 100%^[68]。洪华生等认为在低 P 的台湾海峡(DIP < 0.8 μmol L⁻¹), N/P 比值较高(> 30),溶解有机磷(DOP)是海域 P 的主要存在形态,浮游动物的分泌可能是其主要来源。在该海域,上升流和河流输送对上层海水 DIP 的贡献约占浮游植物摄取磷的 20%,而其余 80% 的 DIP 则来源于水体内部有机磷碎屑和生物粪团中 P 的分解矿化^[69]。在南沙珊瑚礁生态系统中,由于生物捕食和分解者的作用,POC 的消耗速率很快,泻湖中垂直转移的 POC 有 93% 以上在进入沉积物之前被释放,其中生物碎屑的 POC 释放率约为 99%,这种高效的循环及时补充了水体中 C、N、P、Si 等生源要素的含量,使得珊瑚礁得以在营养丰富的条件下一直保持较高的生产力^[70]。

表层沉积物中的无生命 POC,由于受到水动力作用而发生再悬浮的同时,其上层水体中的营养盐浓度将大幅度增大,而悬浮 POC 中的 N、P 含量则有所减少,这是因为 POC 中的有机 N、P 较易被氧化降解,同时由于沉积物中 POC 的再悬浮增大了水体中 POC 的浓度,使得二者呈正相关关系。在台风过境期间,厦门邻近海域 POC 与 DIN、DIP 均成正相关关系,并且在高潮时相关性较为显著(表 5)^[71],这可能是因为高潮时海水动力性较低潮时强,沉积物中 POC 分解产生的 DIN、DIP 得到较好的释放。同时,由于沉积物中 POC 含量、溶解氧含量以及水体透光率等环境因子的差异,造成两取样站位 POC 与营养盐相关系数差别较大。

表 5 厦门邻近海域 POC 与 DIN、DIP 的相关分析结果

Table 5 Relationship between POC and DIN, DIP in Xiamen Island adjacent waters

区域 Regions	线性统计关系 Linear relation	样品数 Sample numbers	相关系数 Correlation coefficient
厦门西港低潮 Low Tide of Western Xiamen Harbour	[POC] = 0.20 [DIN] + 0.583	8	0.44
	[POC] = 3.16 [DIP] + 0.440	8	0.34
厦门西港高潮 High Tide of Western Xiamen Harbour	[POC] = 0.50 [DIN] + 0.189	8	0.72
	[POC] = 25.72 [DIP] - 1.125	8	0.70
九龙江口低潮 Low Tide of Jiulongjiang Estuary	[POC] = 0.52 [DIN] + 0.340	7	0.53
	[POC] = 7.21 [DIP] + 0.224	7	0.74
九龙江口高潮 High Tide of Jiulongjiang Estuary	[POC] = 0.39 [DIN] + 0.111	7	0.69
	[POC] = 10.98 [DIP] - 0.218	7	0.45

埋藏在沉积物中的 POC,通过物理、化学作用影响和控制着 NH₄-N 的形成与释放。马红波等研究了渤海沉积物中 NH₄-N 与 POC 发现二者呈较好的正相关关系,其原因为 NH₄-N 主要来源于沉积物中有机质的分解,并稳定存在于还原性环境中^[72]。沉积物中的 POC 含量及氧化还原环境直接影响着 NH₄-N 的生成,因此对 NH₄-N 分布的控制作用明显。同时,POC 对沉积物表面 NH₄-N 还有明显的吸附作用,一方面 POC 在表层沉积物中矿化产生 NH₄-N,另一方面沉积物中 POC 矿化降解能为 NH₄-N 吸附提供吸附位点。在相同条件下,富含有机质的沉积物吸附的 NH₄-N 比富含碳酸盐的沉积物大的多。由于海河、滦河携带大量富含 POC 的陆源物质入海,在渤海湾北部沿岸 POC 的含量较高,因此沉积物中吸附的 NH₄-N 含量也增高。

此外,温度对 POC 产生也有直接或间接的影响。温度升高,浮游植物繁殖加快,浮游动物量也随之增加,从而导致 POC 总量增加;同时,由于浮游植物的大量繁殖,造成水体中营养盐含量的急剧下降,当其低于一定浓度后,便会限制浮游植物的生长,浮游植物开始大量的死亡、分解,POC 总量减少。随着温度的升高,沉积物中的细菌等微生物新陈代谢加快,大量消耗 POC,最终导致沉积物中 POC 的减少。

4 展望

海洋颗粒有机碳(POC)参与的生物地球化学过程贯穿于整个海洋生物泵-动力作用-物理化学作用过程,是海洋碳循环的关键控制环节之一。近年来,各国学者对海洋 POC 进行了大量系统的研究,进一步加深了对 POC 在全球碳循环与海洋生态系统中的认识,其中尤以 JGOFS 计划中对 POC 在生物泵中的作用研究取得的进展较大。但是目前对 POC 的来源、迁移转化及最终归宿的认识还十分有限,很少从生物-化学-动力过程的整体内在联系上进行全新思路下的综合研究。这方面的研究,我国与国际上的还有相当的差距,研究的广度与深度明显不足,还主要集中在常规的调查上,如在大河口区 POC 的来源、DOC 与 POC 之间的转化机理及转化率的研究很粗浅,对 POC 与各种环境因子的相互作用关系方面的系统研究还很少,对无生命的 POC 与营养盐(N、P、Si 等)的关系虽然进行了一些研究,但认识有限,且未对二者之间的具体相互影响关系做深入的定量研究,所有这些都是我国科学家必须面对和今后努力的方向,全面揭示海洋 POC 的生物地球化学机制任重而道远。

References:

- [1] Schlitzer R. Export and Sequestration of Particulate Organic Carbon in the North Pacific from Inverse Modeling. Workshop on Synthesis of JGOFS North Pacific Process Study, 2002.
- [2] Hung J J, Lin P L, Liu K K. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2000, 20:545 ~ 569.
- [3] Hernes P J, Peterson M L, Murray J W, *et al.* Particulate carbon and nitrogen fluxes and compositions in the central equatorial Pacific. *Deep Sea Research I*, 2001, 48:1999 ~ 2023.
- [4] Hu C Y, Zhang H S, Pan J M. The biogeochemistry of carbon cycle in summer of the paydz bay, Antarctica II. characteristics of POC distribution. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 13(3):195 ~ 204.
- [5] Gundersen J S, Gardner W D, Richardson M J, *et al.* Effects of monsoons on the seasonal and spatial distributions of POC and chlorophyll in the Arabian Sea. *Deep-Sea Research II*, 1998, 45:2103 ~ 2132.
- [6] Liu Z F, Peng X Y, Xu L, *et al.* Particulate organic carbon(POC) in Taiwan Strait during two cruises in summer 1997 and winter 1998. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(1):95 ~ 101.
- [7] Boyd P W, Newton P P. Does planktonic community structure determine downward particulate organic carbon flux in different oceanic provinces? *Deep Sea Research I*, 1999, 46:63 ~ 91.
- [8] Chen J F, Wiesner M G, Wong H K, *et al.* The vertical flux change and marker of early degradation of particulate organic carbon (POC) in Southern China Sea. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(4):372 ~ 378.
- [9] Benjamin A S V M, Richard G K, Allan H D. Impact suboxia on sinking particulate organic carbon:Enhanced Carbon flux and preferential degradation of amino acids via denitrification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66:457 ~ 465.
- [10] Cai A G, Li W Q, Chen Q H. Studies of particulate organic carbon in the Xiamen western harbour and the Jiulong River estuary. *Marine Sciences*, 1998, 5:46 ~ 50.
- [11] Zhao J S, Ji H W, Guo Z G. The vertical distribution of particulate organic carbon in the typical areas of the east China Sea in winter. *Marine Sciences*, 2003, 27(6):59 ~ 63.
- [12] Chen B, He J F, Cai M H, *et al.* Short-term flux and composition of particulate organic matter in pack ice of Chukchi sea in summer. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(2):83 ~ 90.
- [13] Song J M. Chemistry of sediment seawater interface of the China Seas. Beijing: China Ocean Press, 1997. 1 ~ 222.
- [14] Liu W C, Wang R, Ji P. Study on particulate organic carbon in the east China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28(1):39 ~ 43.
- [15] Gundersen K, Orcutt K M, Purdie D A, *et al.* Particulate organic carbon mass distribution at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) site. *Deep-Sea Research II*, 2001, 48:1697 ~ 1718.
- [16] Schlunz B, Schneider R R. Transport of terrestrial organic carbon to the ocean by rivers: re-estimating flux and burial rates. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88:599 ~ 606.
- [17] Hedges J I, Mayorga E, Tsamakis E, *et al.* Organic matter in Bolivian tributaries of the Amazon River: a comparison to the lower mainstream. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45:1449 ~ 1466.
- [18] Gordon E S, Goni M A. Sources and distribution of terrigenous organic matter delivered by the Atchafalaga River to sediments in the northern Gulf of Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67:2359 ~ 2375.
- [19] Carreira R S, Wagener A L R, Readman J W, *et al.* Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach. *Marine Chemistry*, 2002, 79:207 ~ 227.
- [20] Song J M. Biogeochemistry of China Seas. Jinan: Shandong Science and Technology press, 2004. 1 ~ 591.
- [21] Cai D L, Cai A L. Study on organic carbon isotopic in Huanghe estuary. *Science in China (Series B)*, 1993, 23(10):1105 ~ 1113.
- [22] Chen S Y, Zheng Z G, Zheng J L, *et al.* Relationships between suspended particles of organic carbon and environmental factors in Zhujiang River estuary. *Tropic Oceanology*, 1990, 9(2):54 ~ 57.

- [23] Wei X G, Shen C D, Sun Y M, *et al.* Characteristic of the Organic Carbon-isotope Composition and Contribution of Suspended Matter in the Pearl River. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(4):471 ~ 476.
- [24] Guo J B. *Chemical Oceanography*. Xiamen: Xiamen University Press, 1997. 109.
- [25] Liu Z L, Pan J M, Cheng Z Y. Contribution of phytoplankton standing stock for the particulate organic carbon in the Southern Ocean. *Marine Sciences*, 2004, 28(5):44 ~ 49.
- [26] Yamaguchi H, Montani S, Tsutsumi H, *et al.* Estimation of particulate organic carbon flux in relation to photosynthetic production in a shallow coastal area in the Seto Inland Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47:18 ~ 24.
- [27] Delphine T, Head E J H, Wheeler P A. Mesozooplankton in the Arctic Ocean in summer. *Deep Sea Research Part I*, 1999, 46:1391 ~ 1415.
- [28] Azam F. Bacterial transformation and transport of organic matter in the southern California Bight, *Progress In Oceanography*, 1992, 30(4):151 ~ 166.
- [29] Zheng T L. The role of marine bacteria in the upwelling regions of the Minnan Taiwan Bank, *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 12(2):5 ~ 16.
- [30] Zhang Y S, Zhang F J, Guo X W, *et al.* Vertical flux of the settling particulate matter in the water column of the Yellow sea in summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3):231 ~ 238.
- [31] Gagsan, (Qian Z G and Sun M K), *Marine Organic Chemistry Version*, Beijing: China Ocean Press, 1980.
- [32] Yi X F, Zhang X A, Li L X, *et al.* Analysis on Food web Structure in Alpine Meadow Ecosystem: Evidence from Stable Carbon Isotope Signatures. *Zoological Research*, 2003, 25(1):1 ~ 6.
- [33] Liu M, Hou L J, Xu S Y, *et al.* Carbon and Nitrogen Stable Isotopes as Tracers to Source Organic Matter in the Yangtze Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6):918 ~ 926.
- [34] Hong H S. *Marine biogeochemistry research papers*, Xiamen: Xiamen University Press, 1986 ~ 1993. 62 ~ 63.
- [35] Cifuentes L A, Coffins R B, Solorzano L, *et al.* Isotopic and elemental variations of carbon and nitrogen in a mangrove estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43:781 ~ 800.
- [36] Goni M A, Thomas K A. Sources and transformations of organic matter in surface soils and sediments from a tidal estuary, North Inlet, South Carolina, USA. *Estuaries*, 2000, 23:548 ~ 564.
- [37] Aitken-head J A, McDowell W H. Soil C: N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14:127 ~ 138.
- [38] Bhushan R, Dutta K, Somayajulu B L K. Concentrations and burial fluxes of organic and inorganic carbon on the eastern margins of the Arabian Sea. *Marine Geology*, 2001, 178:95 ~ 113.
- [39] Zheng P R, Guo W D, Hu M H, *et al.* Distribution and Diurnal Changes of Organic Carbon in Zhubi Reef Ecosystem, Nansha Islands. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(2):13 ~ 18.
- [40] Wang B D, Zhan R, Xu M D. Molar ratios of C, N, P of particulate matter and their vertical fluxes in the yellow sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 20(1):91 ~ 96.
- [41] Uncles R J, Frickers P E, Easton A E, *et al.* Concentrations of suspended particulate organic carbon in the tidal Yorkshire Ouse River and Humber Estuary. *The Science of the Total Environment*, 2000, 251/252:233 ~ 242.
- [42] Wang R, *Marine biological pump and global change*. *Marine Sciences*, 1992, 1:18 ~ 21.
- [43] Shen G Y, Shi B Z. *Marine ecology(second)*. Xiamen: Xiamen University Press, 2002. 287 ~ 289.
- [44] Dagg M J, Juanita U R, Peterson J O. The potential contribution of fecal pellets from large copepods to the flux of biogenic silica and particulate organic carbon in the Antarctic Polar Front region near 170°W. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50:675 ~ 691.
- [45] Roman M R, Adolf H A, Landry M R, *et al.* Mesozooplankton production and grazing in the Arabian Sea. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47:1423 ~ 1450.
- [46] Gowing M M, David L G, Holly B K, *et al.* Biological components of Ross Sea short-term particle fluxes in the austral summer of 1995—1996. *Deep Sea Research I*, 2001, 48:2645 ~ 2671.
- [47] Borgne L R, Rodier M. Net zooplankton and the biological pump: a comparison between the oligotrophic and mesotrophic equatorial Pacific. *Deep-Sea Research II*, 1997, 44:2003 ~ 2023.
- [48] Dam H G, Zhang X M, Roman B M R. Mesozooplankton grazing and metabolism at the equator in the central Pacific: Implications for carbon and nitrogen fluxes. *Deep-Sea Research II*, 1995, 42(2-3):735 ~ 756.
- [49] Roman M R, Adolf H A, Landry M R, *et al.* Estimates of oceanic mesozooplankton production: a comparison using the Bermuda and Hawaii time-series data. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49:175 ~ 192.
- [50] Mayzaud P, Tirelli V, Erhif A, *et al.* Carbon intake by zooplankton. Importance and role of zooplankton grazing in the Indian sector of the Southern Ocean. *Deep Sea Research II*, 2002, 49:3169 ~ 3187.
- [51] Goux M A, Momzikoff, Striby L, *et al.* High-frequency fluxes of labile compounds in the central Ligurian Sea, northwestern Mediterranean. *Deep Sea Research I*, 2000, 47:533 ~ 556.
- [52] Hidaka K, Kawaguchi K, Murakami M, *et al.* Downward transport of organic carbon by diel migratory micronekton in the western equatorial Pacific: its quantitative and qualitative importance. *Deep Sea Research I*, 2001, 48:1923 ~ 1939.
- [53] Huang Z Q, Fu T B, Zhang Y H. Distributive characteristics of POC in sea water in East China Sea, *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1997, 16(2):147 ~ 152.
- [54] Hugh W D, Deborah K, Steinberg, *et al.* Upper Ocean Carbon export and the Biological Pump. *Oceanography*, 2001, 14(4):50 ~ 59.
- [55] Kobari T, Shinada A, Tsuda A. Functional roles of interzonal migrating mesozooplankton in the western subarctic Pacific. *Progress In Oceanography*, 2003, 57:279 ~ 298.
- [56] Turley C M, Dixon J L. Bacterial numbers and growth in surficial deep-sea sediments and phytodetritus in the NE Atlantic: Relationship with particulate organic carbon and total nitrogen. *Deep-Sea Research I*, 2002, 49:815 ~ 826.
- [57] Boyd P W, Sherry N D, Berges J A, *et al.* Transformations of biogenic particulates from the pelagic to the deep ocean realm. *Deep-Sea Research II*, 1999, 46:2761 ~ 2792.
- [58] Lei K, Yang Z S, Guo Z G. Sedimentation with aggregation of suspended sediment in a mud area of the northern east China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3):288 ~ 295.
- [59] Peng Y H, Wang Z D, Sun L H, *et al.* Studies on nutrients of sea-surface microlayer and hipolayer at Daya Bay. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*,

- 2002, 21(3):310~316.
- [60] Justic D, Rabalais N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal water: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40:339~356.
- [61] Wei M X, Lai T H. Relationship between active phosphate and chlorophyll-a in near-shore water of Beihai Peninsula, Guangxi. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2003, 22(2):205~209.
- [62] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, *et al.* A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic in seawater. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3):445~448.
- [63] Wang Y, Jiao N Z. The relationship between plankton and nutrient addition in Jiaozhou Bay. *Marine Sciences*, 2002, 26(4):8~12.
- [64] Sun J, Liu D Y, Yang S M, *et al.* The preliminary study on phytoplankton community structure in the central Bohai Sea and the Bohai Strait and its adjacent area. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5):461~471.
- [65] Takashi O, Akira T. Standing crop of planktonic ciliates in the East China Sea and their potential grazing impact and contribution to nutrient regeneration. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50:423~442.
- [66] Zhou Y, Yang H S, He Y C, *et al.* Nitrogen and phosphorus excretion and its ecological effect by several bivalves and fouling animals. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):424~431.
- [67] Hussain A M, Michael R L. Active export of carbon and nitrogen at Station ALOHA by diel migrant zooplankton. *Deep-Sea Research II*, 2001, 48:2083~2103.
- [68] Gaudy R., Youssara F., Diaz F, *et al.* Biomasses, metabolism and nutrition of zooplankton in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oceanologica Acta*, 2003, 26:357~372.
- [69] Hong H S, Wang D Z. Studies on Biogeochemical Process of Biogenic Elements in the Taiwan Strait. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2001, 40(2):535~544.
- [70] Song J M, Zhao W D, Li P C, *et al.* Carbon cycling in nansha coral reef ecosystem south China sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(6):586~592.
- [71] Xue J H, Yang Y P, Guo W D, *et al.* Variation characteristics of POC in Xiamen coastal area during Typhoon 9810 process. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(3):269~275.
- [72] Ma H B, Song J M, Lü X X, *et al.* Nitrogen forms and their functions in recycling of the Bohai Sea sediments. *Geochimica*, 2003, 32(1):48~54.

参考文献:

- [4] 扈传显,张海生,潘建明,等. 夏季南极普里兹湾碳的生物地球化学循环 II. POC的分布特征. 极地研究, 2001, 13(3):195~204.
- [6] 刘占飞,彭兴跃,徐立,等. 台湾海峡1997年夏季和1998年冬季两次航次颗粒有机碳研究. 台湾海峡, 2000, 19(1):95~101.
- [8] 陈建芳, Wiesner M G, Wong H K, 等. 南海颗粒有机碳通量的垂向变化及早期降解作用的标志物. 中国科学(D辑), 1999, 29(4):372~378.
- [10] 蔡阿根,李文权,陈清花,等. 厦门西港和九龙江口颗粒有机碳的研究. 海洋科学, 1998, 5:46~50.
- [11] 赵继胜,姬泓巍,郭志刚. 冬季东海典型海域颗粒有机碳的垂直分布. 海洋科学, 2003, 27(6):59~63.
- [12] 陈波,何剑锋,蔡明红,等. 楚科奇海浮冰区夏季短期颗粒有机物通量及其主要组分. 极地研究, 2003, 15(2):83~90.
- [13] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学. 北京:海洋出版社, 1997. 1~222.
- [14] 刘文臣,王荣,吉鹏. 东海颗粒有机碳的研究. 海洋与湖沼, 1997, 28(1):39~43.
- [20] 宋金明. 中国近海生物地球化学. 济南:山东科技出版社, 2004. 1~591.
- [21] 蔡德陵,蔡爱智. 黄河口区有机碳同位素地球化学研究. 中国科学(B辑), 1993, 23(10):1105~1113.
- [22] 陈绍勇,郑泽广,郑建禄,等. 珠江口悬浮颗粒有机碳与环境因子的关系. 热带海洋, 1990, 9(2):54~57.
- [23] 魏秀国,沈承德,孙彦敏,等. 珠江水体悬浮物颗粒有机碳稳定同位素组成及分布特征. 地理科学, 2003, 23(4):471~476.
- [24] 郭锦宝. 化学海洋学. 厦门:厦门大学出版社, 1997. 109.
- [25] 刘子琳,潘建明,陈忠元. 南大洋浮游植物现存量对颗粒有机碳的贡献. 海洋科学, 2004, 28(5):44~49.
- [30] 张岩松,章飞军,郭学武,等. 黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究. 海洋与湖沼, 2004, 35(3):231~238.
- [31] 盖戈赛恩等(钱佐国和孙明昆译), 海洋有机化学译文集, 北京:海洋出版社, 1980.
- [32] 易现峰,张晓爱,李来兴,等. 高寒草甸生态系统食物链结构分析——来自稳定性碳同位素的证据. 动物学研究, 2003, 25(1):1~6.
- [33] 刘敏,侯立军,许世远,等. 长江口滩涂有机质来源的C、N稳定同位素示踪. 地理学报, 2004, 59(6):918~926.
- [34] 洪华生. 海洋生物地球化学论文集. 厦门:厦门大学出版社, 1986~1993. 62~63.
- [39] 郑佩如,郭卫东,胡明辉,等. 南沙渚碧礁生态系统有机碳的分布及周日变化特征. 海洋通报, 2004, 23(2):13~18.
- [42] 王荣. 海洋生物泵与全球变化. 海洋科学, 1992, 1:18~21.
- [43] 沈国英,施并章. 海洋生态学(第二版). 厦门:厦门大学出版社, 2002. 287~289.
- [53] 黄自强,傅天保,张远辉. 东海水体中POC的分布特征. 台湾海峡, 1997, 16(2):147~152.
- [58] 雷坤,杨作生,郭志刚. 东海陆架北部泥质区悬浮体的絮凝沉积作用. 海洋与湖沼, 2001, 32(3):288~295.
- [59] 彭云辉,王肇鼎,孙丽华,等. 大亚湾微表层和次表层海水营养盐的研究. 台湾海峡, 2002, 21(3):310~316.
- [61] 韦蔓新,赖廷和. 广西北海半岛近岸水域活性磷酸盐与叶绿素a含量的关系. 台湾海峡, 2003, 22(2):205~209.
- [62] 曲克明,陈碧鹃,袁有宪,等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(3):445~448.
- [63] 王勇,焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系. 海洋科学, 2002, 26(4):8~12.
- [64] 孙军,刘东艳,杨世民,等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究. 海洋与湖沼, 2002, 33(5):461~471.
- [66] 周毅,杨红生,何义朝,等. 四十里湾几种双壳贝类及污损动物的氮、磷排泄及其生态效应. 海洋与湖沼, 2002, 33(4):424~431.
- [69] 洪华生,王立志. 台湾海峡生源要素生物地球化学过程研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2):535~544.
- [70] 宋金明,赵卫东,李鹏程,等. 南沙珊瑚礁生态系统的碳循环. 海洋与湖沼, 2003, 34(6):586~592.
- [71] 薛健宏,杨逸萍,郭卫东,等. 9810号台风过程厦门近岸海域POC的变化特征. 台湾海峡, 2000, 19(3):269~275.
- [72] 马红波,宋金明,吕晓霞,等. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用. 地球化学, 2003, 32(1):48~54.