

海洋胶体的有机组成及其结构特征

Compositional and structural characterization of marine organic colloids - an overview

曹莉, 戴民汉, 徐立, 洪华生, 李骁麟, 王新红, 魏俊峰

(厦门大学 海洋环境科学教育部重点实验室, 环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 3096(2004)08 - 0059 - 06

碳及其相关生源要素的生物地球化学研究是近十几年来海洋科学的研究重点之一,也是国际上许多前沿研究计划,如全球海洋通量联合研究(J COFS)、陆海相互作用(LOICZ)、全球海洋生态系统动力学研究(GLOBEC)、上层海洋与下层大气研究(SOLAS)等的重要研究内容。

海洋“溶解”有机物(Dissolved Organic Matter, DOM)是海洋中最大的有机碳贮库,与大气中的碳贮量相当,一部分DOM通过生物和化学的过程快速循环,在碳与其他一系列元素的生物地球化学循环中起着关键性的作用。海洋DOM的产生、迁移、转化与循环等过程都相当复杂,是当今海洋化学研究的最薄弱环节之一,其根本原因在于人们对DOM的组成和结构了解甚微,就分析技术而言,构成海洋DOM的单个化合物浓度一般都在纳摩尔(nmol/L)的数量级上,对这些化合物的分离、鉴定与检测均有相当的难度。

90年代以来切向超滤法(Cross-Flow Ultrafiltration, CFF)的广泛应用使人们能在海洋观测所许可的时间内收集到足够量的大分子量有机物质,即胶体有机物(Colloidal Organic Matter, COM)。应用1 ku(1000道尔顿)的CFF膜通常可富集20%~40%的海洋DOM。鉴于CFF的普遍应用,文献中有时又称COM为超滤溶解有机物(Ultrafiltered Dissolved Organic Matter, UDOM)^[1-3]。对COM的研究是90年代以来海洋化学界的一个热点,它在海洋元素和化合物的生物地球化学循环中的作用可简述如下:

首先,海洋中胶体的丰度可达 $10^6 \sim 10^8$ 个/mL^[4],胶体有机碳(Colloidal Organic Carbon, COC)一般占溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)的15%~20%^[5],

因而是海洋有机碳的一个重要储库,在全球海洋碳循环过程中必然起着重要作用。

至少部分胶体物质在水体中是不稳定的,能够快速循环,因此,COM可能是理解有机碳循环动力学的关键^[5]。已有的研究表明海洋胶体在水体中的停留时间较短(<10 d),其周转速率(turnover rate)也快^[6,7],此外,COM的同位素信号表明胶体有机物的¹⁴C值较高,这些有机物年轻,它的周转时间比总DOM(Bulk DOM)的平均时间快得多^[8-10]。

此外,有机质含量丰富的海洋胶体会影响水体中微量金属元素的迁移和生物活性^[5,11]。由于胶体的比表面积非常大,有很大的吸附容量,而且胶体中的有机质也会与金属发生络合反应,因此胶体与海水中多种微量金属的分布有密切关系^[11]。“胶体泵”(colloidal pumping)的学说认为胶体的凝聚可能提供了一种物质从溶解态到颗粒态的形态转化途径,该过程的动

收稿日期:2002-08-20;修回日期:2003-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(49976021);国家重点基础研究发展规划项目(G2000078500);杰出青年基金项目(49825162)

作者简介:曹莉(1978-),女,硕士研究生;戴民汉,通讯作者,E-mail:mhdai@xmu.edu.cn

力学还决定了物质迁出溶解相的速率^[12, 13]。

最后, COM 可能还与微食物环密切相关。COM 包含了 DOC 中的大部分高分子量 (high molecular weight, HMW) 有机物, 易被细菌降解利用, 生物活性很高。Benner^[3]认为 COM 中的最重要组分——多糖可能支持着表层海水中大部分的异养活动。

借助于高灵敏度的现代分析技术, 近年来的研究表明 COM 包含了脂类、蛋白质、多糖类等主要大分子量有机物质^[1, 14], 虽然不同的研究结果各有差异, 如 Liu 等^[15]的研究结果认为超过 80% ~ 90% 的糖类物质存在于粒径 < 10 μm 部分。然而, 越来越多的证据表明, 多糖类是 COM 的主要组成成份^[1, 3, 14, 16], 它们还构成了海洋沉降过程中最具生物活性的物质^[1]。

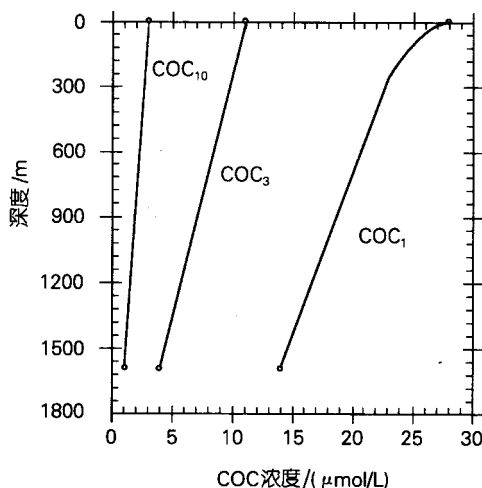
中国的海洋学家进行了一些关于 COM 的研究, 如关于珠江口胶体有机碳的研究^[17]、对黄河、长江和钱塘江的胶体有机碳的研究^[18]和关于南黄海胶体有机碳的研究^[19]。然而这些研究仅局限于胶体有机碳的分布, 对胶体的有机组成及其结构特征的特征, 目前尚未见到国内的报道。

作者综述了海水中 COM 的分布、有机组成及其特征, 拟重点介绍 COM 中糖类物质的分布及其研究方法。

1 COM 的来源、分布和组成

海洋胶体有机物质主要有两个来源: 一是海洋生物, 特别是浮游植物和细菌的现场排放和降解产物^[20, 21]; 另一个是陆源物质, 主要通过河流输入^[21]。然而, 陆源和海源部分在胶体有机组成中所占的百分比及其在海洋中的循环速度与机制仍然不清楚^[22]。在全球海洋尺度上, 每年通过河流输入的 DOC 约为 2.5×10^{14} g, 其中约有 10^{13} g DOC 以胶体有机碳的形式输入, 但仅有一小部分的海洋 DOM 具有陆源信号, 特别是海洋 COM 基本呈现现场生源特征^[14], 因此, 陆源有机物在海洋中的归宿尚需大量的研究^[23]。

从表现上看, 大量的研究显示 COC 的含量从淡水流域到河口到大洋水域逐渐降低^[11, 22], 而 COC 的垂直分布是从表层到深海含量逐渐下降 (图 1、图 2)^[22, 24, 25]。这种分布特征表明 COC 由近岸向远岸转移, 在上层水体形成而在向深海转移的过



$\text{COC}_1: 1\text{ku}-02\mu\text{m}, \text{COC}_3: 3\text{ku}-02\mu\text{m}, \text{COC}_{10}: 10\text{ku}-02\mu\text{m}$

图 1 墨西哥湾胶体有机碳在水平方向上的分布^[22]

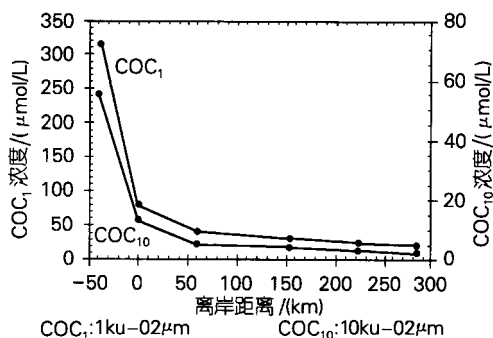


图 2 墨西哥湾胶体有机碳的垂直分布

程中被消耗^[22, 24]。

最近的研究确认大洋及近岸海域 COM 主要由大分子有机物质所组成^[26]。如表 1 所示, COM 的主要成分是糖类化合物^[1, 3, 14, 16], Means 和 Wijayaratne^[27]研究 Chesapeake 湾水体的 COM 的生物有机化学组成得出糖类化合物、氨基酸和脂类分别占有机碳组成的 35% ~ 60%、4% ~ 13% 和 < 1% 的结论。在不同的海区, COM 的相对组成稳定, 糖类化合物、醋酸酯、脂类的碳含量比大约是 8:1:1^[14]。该结果暗示在不同海域 COM 具有相类似的来源, 即生源物质占据着主导地位, Aluwihare 等^[14]的这个结论显然尚需更多的证据, 因为其中用于分离 COM 的 CFF 的手段的确认仍需要更多的系统旁证^[5]。但无论如何, 糖类物质看来确实

表1 典型海域 DOC 浓度和胶体中主要成分的相对浓度^[14]

样品	地点	DOC(μmol/L)	碳含量(相对%)		
			糖类化合物	醋酸酯	酯类
大西洋					
Georges Bank					
GB-1	40°30' N, 70°45' W	80	81	11	4
GB-2	40°58' N, 68°54' W	85	76	9	14
Mid-Atlantic Bight					
MAB-1	40°32' N, 72°09' W	95	73	10	15
MAB-5	39°56' N, 75°05' W	116	84	6	10
MAB-6	37°43' N, 75°24' W	99	75	9	16
MAB-7	37°11' N, 74°16' W	97	77	10	14
Woods Hole					
WH-1	41°32' N, 70°31' W	102	86	10	4
WH-2	41°32' N, 70°31' W	102	77	15	7
Oosterschelde	51°36' N, 04°07' E	260	84	11	4
太平洋					
Scripps Pier					
SP-1	32°52' N, 117°18' W	ND	81	12	6
Peru Upwelling					
PU-1	11°04' S, 78°04' W	ND	81	13	6
Hawaii	19°04' N, 156°00' W	ND	85	7	8
平均组成 (所有样品)			80 ±4	10 ±2	9 ±4

是 COM 的主要成分。

COM 的 ¹³C-NMR 扫描结果也证明糖类是 COM 的主要成分(图 3、表 2、图 4)。图 3 中的 AL- 代表甲基、亚甲基、碳氮键、碳硫键, AL- 代表碳氧键(糖类、醇、醚), AL- 代表非极性碳, AR 代表碳碳双键、芳环碳, C- 代表羰基碳、羧基碳。AL- 区域的峰主要由糖类的响应造成,而表中以 AL- 区域的相对

峰面积最大,这证实糖类是 COM 的主要成分。

从图 4 可见:表层(10 m) COM 的 ¹³C 核磁共振主要在 72ppm 处,在 21、40、100、176ppm 处也有稍弱的响应。而糖类化合物中的 C-O 在 72ppm 处响应, O-C-O 在 100ppm 处响应,这也证明了表层海水 COC 的主要成分是糖类化合物。然而,在氧最小层和底层 COM 的谱图上可以发现 C-O 和 O-C-O 的峰明显减小,说明糖类化合物在海水中的浓度随着深度的增加而递减。

表2 北太平洋 COC 样品 ¹³C-NMR 谱各区域相对峰面积和代表的键^[1]

深度(m)	C-C (%)	C-O (%)	O-C-O (%)	C=C (%)	O-C=O (%)	C=O (%)
10	26	49	11	7	13	3
765	32	24	5	21	14	4
4 000	27	19	6	19	15	5

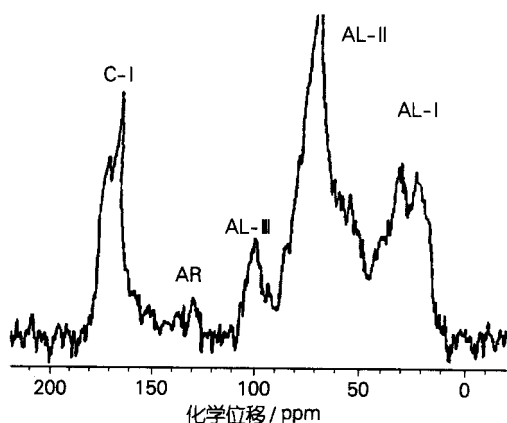


图3 科罗拉多 Puelbo 水库中胶体有机碳 ^{13}C -NMR 谱图^[28]
AL-I : 0 ~ 62 ppm, AL-II : 62 ~ 90 ppm, AL-III : 90 ~ 110 ppm, AR: 110 ~ 165 ppm, C-I : 165 ~ 185 ppm

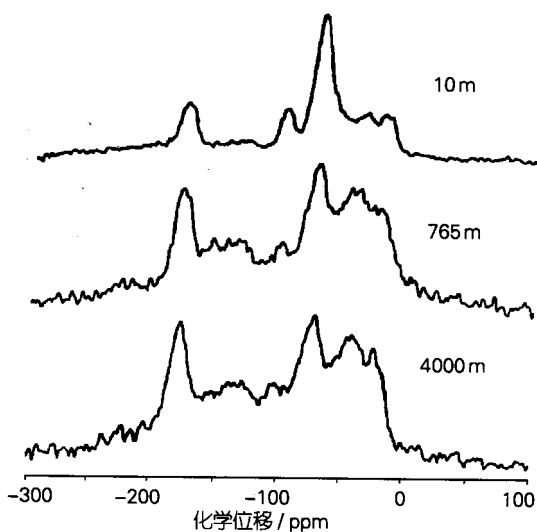


图4 北太平洋不同深度的 COC 样品的 CP/MAS ^{13}C NMR 谱图^[11]

2 分子水平上的胶体糖类组成及其测定方法

2.1 分子水平上的糖类组成

如上所述,海洋胶体的主要有机成分是糖类物质^[1,3,14,16]。多糖是海水中糖类的主要成分,但它所占的比例随深度而下降, Benner 等^[1]报道胶体(1 ku - 0.2 μm)多糖在上层海水 COM 中占 50%,而

在底层海水 COM 中占 25%。而单糖浓度的垂直变化则很小^[22];另外,COM 的周转时间比低分子量(lowmolecular-weight, LMW)物质短的多^[26],说明 COM 更易被细菌和浮游植物利用。这些研究均表明,多糖作为海水中一种高分子量有机成分,是海洋碳循环中最活跃的成分之一^[18,26]。

多糖的分子组成信息对于研究它们的来源及其在生物地球化学循环中的作用具有重要意义。例如,胶体糖类化合物的组成特征可用于指示它的来源。Biersmith^[2]通过比较表层海水和浮游生物的醛糖组成得出藻类和细菌的分泌物是表层海水 UDOM 的重要来源的结论。McCarthy^[3]认为不同地点的 UDOM 的类似组成意味着它们相似的来源和活动过程。Ittekkot^[29]等发现在浮游植物繁殖期,大量的溶解多糖被释放到水体中,而且浮游植物释放糖的能力与它们的生长情况有关,在氮限制的水华末期,它们将放出更多的糖类物质^[2],这些多糖的组成在繁殖期会发生变化^[30]。

表 3 列出了 COM、POM 和藻类中多糖的组成。可以看出葡萄糖、半乳糖、鼠李糖、阿戊糖、甘露糖、木糖是不同海区、不同粒径多糖的主要成分,且葡萄糖和半乳糖浓度远高于其他糖类,这可能与大量存在的浮游植物有关。葡萄糖聚合物(葡聚糖)是浮游植物主要的能量储存形式,而半乳糖聚合物(半乳糖体)则是浮游植物细胞壁的主要成分^[20]。这意味着浮游植物是多糖的重要来源^[3]。从表中还可发现在同一深度范围和同一粒径范围内,多糖的组成是很相似的。例如,在表层,半乳糖占总糖类的 19% ~ 20%,接着是含量稍低的葡萄糖,然后分别是鼠李糖、阿戊糖。然而,不同粒径、不同深度的多糖组成之间则有一些差别。如表层 COM 半乳糖的含量高于葡萄糖,而在氧最小层和底层 COM 中葡萄糖的含量稍稍超过半乳糖成为含量最高的糖。葡萄糖的浓度随着深度的增加而升高表明糖类化合物的降解和转移有选择性的排除了葡萄糖^[20]。而藻类的多糖成分则是葡萄糖含量较多,半乳糖的含量较少^[14]。POM 的葡萄糖含量介于底层海水和藻类之间。这种差异还需要进一步研究,才能明白它是否与糖类的来源有关。

2.2 多糖分子组成的测定方法

总糖量的测定,一般用改进的 3-甲基-2-苯并噻唑啉酮脲盐酸盐(MBTH)分光光度法^[1,2,3,25],但总量的测定不能提供其分子组成信息。因此,目前海水中多

表3 COM、POM和藻类多糖的主要成分(%)

区域	深度 (m)	葡萄糖 (GLU)	半乳糖 (GAL)	鼠李糖 (RHA)	阿戊糖 (ARA)	甘露糖 + 木糖 (MAN + XYL)
COM						
太平洋北部 ^[3]	10	16.9	19.1	12.3	8.9	25.1
马尾藻海 ^[3]	2	14.7	20.4	13.2	8.9	26.1
马尾藻海 ^[3]	900	21.0	14.2	18.6	6.9	19.0
马尾藻海 ^[3]	2 400	17.3	13.1	17.2	9.9	20.3
POM						
德拉华湾 ^[16]	0	40	15	4	8	20
赤道太平洋 ^[20]	2	38	19	7	9	21
藻类						
密西西比 河口水华期 ^[34]		20	17	14	6	26
<i>Skeletonema costatum</i> ^[2]		54	4	5	2	15

注：糖的成分按摩尔百分比计算。

糖成分的分子水平测定主要用色谱方法。这种方法可以解决测定COC多糖成分的两个困难：适合的高效分离方法的缺乏与低浓度多糖测定上的困难^[9]。由于该方法通常利用测定酸解后放出的单糖量或其衍生物量来确定多糖量及其组成^[1-3,31]，因此可以对糖类分子水平的组成进行深入的研究。色谱方法包含气相色谱法与离子交换高效液相色谱法。

气相色谱法(GC)是一种广泛应用于单糖分析的方法，但是要把单糖转化为具有挥发性的衍生物，因为游离糖的挥发性不足，不能直接分析。为解决这一难题，Cowie等^[32]采用高氯酸锂(LiClO₄)作催化剂，使游离糖在吡啶溶液中达到互变异构平衡，然后转化成三甲基硅(Me₃Si)醚衍生物，该衍生物的挥发性强，可用GC测定。

用毛细管气相色谱法测定单糖的组成，分析快速、灵敏度高，而且这套仪器在实验室中很普遍，可以被广泛采用；但这种方法的不足之处在于它只适用于醛糖，对酮糖的测定结果并不令人满意。且样品的预处理步骤较多，耗时较长，会导致样品的损失，引入误差^[2,32]。

用离子交换高效液相色谱(HPLC)加脉冲安培检测器(PAD)可以测定游离的单糖。阴离子交换柱可直接分离游离单糖，因为中性糖类是pK值在12~14之间的弱酸，在强碱溶液中呈离子化状态，且具有电化

学活性^[9]。在强碱性氢氧化物离子交换柱上以强碱性溶液，如氢氧化钠为洗脱剂是可行的^[9,16,20,33]。洗脱剂氢氧化钠的浓度，洗脱剂中的添加剂和柱温都会影响分离度和保留时间^[9]。对单糖的检测限是 $30 \times 10^{-9} \text{ g/g}^{[9]}$ 。

因为阴离子交换分离是在碱性条件下完成的，检测方法必须与此相匹配，金电极的脉冲安培检测器适合这个条件。在碱性条件下，金电极的表面可为糖的电化学氧化反应提供一个反应途径，方法的选择性好，可检测低浓度的糖，而且不需要进行衍生化反应和复杂的样品纯化过程，但是由于仪器并不普遍，它还不能得到广泛应用。

有研究表明用色谱方法测出的糖类占表层COM一小部分^[3,20]，因此还有很大部分的糖类在用色谱方法分析时得不到表征，可能的原因是：(1)有些结构复杂的多糖不能被酸完全分解，另一些在酸性条件下会发生某些反应，如核糖在酸性条件下会生成糠醛，得不到表征；(2)多糖的色谱测定都要经过一个用离子交换树脂脱盐的步骤，而带电荷的多糖在经过离子交换树脂时会被吸附而损失^[3]。

3 结语

COM在海洋化学过程中的重要性虽然已被认识

多年,而人们对 COM的组成、结构、来源、活性等方面的了解还非常有限,不同研究者甚至尚有相当不一致的研究结果。例如,Aluwihare 等^[14]认为不同海区的胶体组成和含量是很相似的,其来源也是相似的,都会因为浮游生物的活动状态变化而发生很大变化;然而最近的一些研究结果认为 COM在从淡水到河口到大洋水中含量逐渐降低^[34],不同海域 COM的浓度存在明显的空间差异,其浓度与温度和盐度有显著的相关性^[35],暗示着陆源输入可能是海水中 HMW DOM的重要来源。这些不一致的原因之一是不能清晰地表征胶体的组成和结构特征,对胶体有机成分中多糖的组成和结构特征的研究将有助于解决这一疑问。

由于不同研究者所使用的分离方法、CFE膜的材料、孔径大小及分析技术等不同,所得到的 COM的结果现在还难于进行绝对意义上的比较。例如,大体积的切向超滤方法在海洋有机地球化学领域还是新的工具^[3]。尽管 COM从定义上讲是介于真溶解态和固体之间的部分,然而还不清楚用 CFE得到的 UDOM可不可以代表胶体^[3]。Dai^[5]等的研究表明,某些糖类标准物质(Dextran)在 CFE膜上有较大的损失,这种损失如何影响了所述研究对 COM的组成结构的表征尚不清楚。因而对 COM的研究还需要加强不同实验室及不同分析方法的互校、对比工作。

参考文献:

- [1] Benner R, Pakulski J D, McCarthy M, *et al.* Bulk chemical characteristics of dissolved organic matter in the ocean [J]. **Science**, 1992, 255:1 561 - 1 564.
- [2] Biersmith A, Benner R. Carbohydrates in phytoplankton and freshly produced dissolved organic matter [J]. **Mar Chem**, 1998,63:131- 144.
- [3] McCarthy M, Hedges J I, Benner R. Major biochemical composition of dissolved high molecular weight organic matter in seawater [J]. **Mar Chem**, 1996,55:281 - 297.
- [4] Williams PM, Druffel ERM. Dissolved organic matter in the ocean: Comments on a controversy [J]. **Oceanogr Mag**, 1988, 1:14- 17.
- [5] Dai MH, Buesseler KO, Ripple P, *et al.* Evaluation of two cross - flow ultrafiltration membranes for isolating marine organic colloids [J]. **Mar Chem**, 1998, 62:117 - 136.
- [6] Moran S B, Buesseler KO. Size fractionated ²³⁴Th in continental shelf waters of New England: Implications for the role of colloids in oceanic trace metal scavenging [J]. **J Mar Res**, 1993, 51: 893 - 922.
- [7] Dai M H, Benitez - Nelson C R. Colloidal organic carbon and ²³⁴Th in the Gulf of Maine [J]. **Mar Chem**, 2001, 74:181 - 196.
- [8] Pakulski J D, Benner R. An improved method for the hydrolysis and MBTH analysis of dissolved and particulate carbohydrates in seawater [J]. **Mar Chem**, 1992, 40: 143 - 160.
- [9] Rocklin R D, Pohl C A. Determination of carbohydrates by anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection [J]. **J Liquid Chro**, 1983, 6:1 577 - 1 590.
- [10] Santschi P H, Guo L, Baskaran M, *et al.* Isotopic evidence for the contemporary origin of high - molecular weight organic matter in oceanic environments [J]. **Geochim Cosmochim Acta**, 1995, 59:625 - 631.
- [11] Dai M H, Martin J M, Gauwet G. The significant role of colloids in the transport and transformation of organic carbon and associated trace metals (Cd, Cu and Ni) in the delta (France) [J]. **Mar Chem**, 1995, 51: 159 - 175.
- [12] Honeyman B D, Santschi P H. Brownian - pumping model for oceanic trace metal scavenging: Evidence from Th isotopes [J]. **J Mar Res**, 1989, 47:951 - 992.
- [13] Honeyman B D, Santschi P H. Coupling adsorption and particle aggregation: Laboratory studies of "colloidal pumping" using Fe - labeled hematite [J]. **Environ Sci Technol**, 1991, 25:1 739 - 1 747.
- [14] Aluwihare L I, Repeta D J, Chen R F. A major biopolymeric component to dissolved organic carbon in surface sea water [J]. **Nature**, 1997, 387:166 - 169.
- [15] Liu Q, Parrish C C, Helleur R. Lipid class and carbohydrate concentrations in marine colloids [J]. **Mar Chem**, 1998, 60:177 - 188.
- [16] Borch N H, Kirchner D L. Concentration and composition of dissolved combined neutral sugars (polysaccharides) in seawater determined by HPLC - PAD [J]. **Mar Chem**, 1997, 57:85 - 95.
- [17] Dai M H, Martin J M, Hong H S, *et al.* Preliminary study on the dissolved and colloidal organic carbon in the Zhujiang River estuary [J]. **Chin J Oceanogr Limnol**, 1999, 3:265 - 273.
- [18] 王江涛. 黄河、长江、钱塘江水体中的胶体有机碳 [J]. **科学通报**, 1998, 43:840 - 843.
- [19] 李丽, 张正斌, 刘蓬生, 等. 南黄海胶体有机碳和溶解有机碳的分布 [J]. **青岛海洋大学学报**, 1999, 29: 321 - 324.
- [20] Skoog A, Benner R. Aldoses in various size fractions of marine organic matter implications for carbon cycling [J]. **Limnol Oceanogr**, 1997, 42:1 803 - 1 813.
- [21] Sigleo A C, Hering TC, Helz GR. Composition of estuarine colloidal material: organic components [J]. **Geochim Cosmochim Acta**, 1982, 46:1 619 - 1 626.

(下转第 71 页)

- raphy, 1997, 12(4): 594- 603.
- [43] Nathalie F, Frank D, Luc A, *et al.* Ba distribution in surface Southern Ocean sediments and export production estimates [J]. **Paleoceanography**, 2002, 17(2): 1- 21.
- [44] Paytan A, Kastner M. Benthic Ba fluxes in the central E quatorial Pacific: implications for the oceanic Ba cycle[J]. **Earth & Planetary Science Letters**, 1996, 142: 439 - 450.
- [45] James McManus, William M B, Gary P K, *et al.* Geochemistry of barium in marine sediments: Implications for its use as a paleoproxy [J]. **Geochemica et Cosmochimica Acta**, 1998, 62(21- 22): 3 453- 3 473.
- [46] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 14- 18.
- [47] 韩舞鹰. 南海海洋化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 232- 234.
- [48] David W Lea, Edward A B. Foraminiferal reconstruction of barium distributions in water masses of the glacial oceans [J]. **Paleoceanography**, 1990, 5(5): 719- 742.
- [49] Lea D, Boyle E. Barium content of benthic foraminifera controlled by bottom- water composition [J]. **Nature**, 1989, 338: 751- 753.
- [50] Havach S M, Thomas C G, Any W F, *et al.* Experimental determination of trace element partition coefficients in cultured benthic foraminifera [J]. **Geochemica et Cosmochimica Acta**, 2001, 65(8): 1 277- 1 283.
- [51] 韦刚健, 李献华, 孙敏, 等. 南海南部珊瑚 Ba/ Ca 比值的季节变化及其环境意义[J]. 地球化学, 2000, 29(1): 67- 72.
- [52] 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛海区晚第四纪古海洋学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 49- 52.
- [53] 同济大学地质系. 古海洋学概论 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1989. 192- 194.
- [54] 郑连福, 陈文斌. 南海海洋沉积作用过程与地球化学研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 85- 93.

(本文编辑:刘珊珊)

(上接第 64 页)

- [22] Guo L, Santschi P H. Composition and cycling of colloids in marine environments [J]. **Geophy Res Lett**, 1997, 35:17- 40.
- [23] Hedges J I, Keil R G, Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean [J]? **Organic Geochem**, 1997, 27:195- 212.
- [24] Benner R, Biddanda B, Black B, *et al.* Abundance, size distribution and stable carbon and nitrogen isotopic compositions of marine organic matter isolated by tangential - flow ultra filtration [J]. **Mar Chem**, 1997, 57:243- 263.
- [25] Pakulski J D, Benner R. Abundance and distribution of carbohydrates in the ocean [J]. **Limnol Oceanogr**, 1994, 39: 930- 940.
- [26] Amon R M W, Benner R. Rapid cycling of high - molecular - weight dissolved organic matter in the ocean[J]. **Nature**, 1994, 369:549- 552.
- [27] Means J C, Wijayaratne R D. Chemical characterization of estuarine colloidal organic matter: Implications for adsorptive processes [J]. **Bull Mar Sci**, 1984, 35: 449- 461.
- [28] Baker R A. Organic substances and sediments in water [M]. Michigan: Lewis Publishers, 1991. 65.
- [29] Ittekkot V, Brockman U, Michaelis W, *et al.* Dissolved free and combined carbohydrates during a plankton bloom in the northern North Sea [J]. **Mar Ecol Prog Ser**, 1981, 4:299- 305.
- [30] Ittekkot V. Variations of dissolved organic matter during a plankton bloom: qualitative aspects, based on sugar and amino acid analysis [J]. **Mar Chem**, 1982, 11: 143- 158.
- [31] Bhosle N B, Bhaskar P V, Ramachandran S. Abundance of dissolved polysaccharides in the oxygen minimum layer of the Northern Indian Ocean [J]. **Mar Chem**, 1998, 63:17- 182.
- [32] Cowie GL, Hedges J I. Determination of neutral sugars in plankton, sediments, and wood by capillary gas chromatography of equilibrated isomeric mixtures [J]. **Anal Chem**, 1984, 56:497- 504.
- [33] Amon R M W, Fitznar H P, Benner R. Linkages among the bioreactivity, chemical composition, and diagenetic state of marine dissolved organic matter [J]. **Limnology and Oceanography**, 2001, 46: 287- 297.
- [34] Benner R, Opsahl S. Molecular indicators of the sources and transformations of dissolved organic matter in the Mississippi river plume [J]. **Organic Geochem**, 2001, 32:597- 611.
- [35] Amon R M W, Benner R. Combined neutral sugars as indicators of the diagenetic state of dissolved organic matter in the Arctic Ocean [J]. **Deep- Sea Res**, 2003, 50: 151- 169.

(本文编辑:张培新)