

夏季珠江口透明胞外聚合颗粒物分布特征

孙翠慈^{1,2}, 王友绍^{1,2}, 吴梅林¹, 李楠¹, 林立¹, 宋晖¹, 王玉图^{1,2},
邓超¹, 彭亚兰¹, 孙富林¹, 李超伦³

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院南海海洋研究所大亚湾海洋生物综合实验站, 广东 深圳 518121; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 本文研究夏季珠江口透明胞外聚合颗粒物(TEP)含量以及分布特征。结果表明, 珠江口 TEP 含量(以黄原胶物质的量计算, 下同)范围在 $85.0\text{--}1234.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $690.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。表层和底层 TEP 均值分别为 $562.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $778.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 大部分站位表层 TEP 含量略低于底层。TEP 在表层分布自上游至下游逐渐递增, 而向外海以及入海口东西两侧延伸逐渐降低。内河口为底层 TEP 含量高值区, 虎门附近 S3 站 TEP 含量最高。TEP 与不同粒径浮游植物叶绿素 a 的相关性分析表明微型浮游植物(粒径 $3\text{--}20\mu\text{m}$)可能对珠江口 TEP 贡献较大。珠江口 TEP/Chl a 比值与活性硅酸盐、硝酸盐、铵盐和总磷浓度呈现负相关性; 表层 TEP/Chl a 比值与盐度呈现正相关性, 这表明盐度和营养盐可能是影响 TEP 含量的重要因素。

关键词: 珠江口; 透明胞外聚合颗粒物(TEP); 叶绿素

中图分类号: P734.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)05-0081-07

Distribution of transparent exopolymer particles in the Pearl River Estuary in summer

SUN Cui-ci^{1,2}, WANG You-shao^{1,2}, WU Mei-lin¹, LI Nan¹, LIN Li¹, SONG Hui¹, WANG Yu-tu^{1,2},
DENG Chao¹, PENG Ya-lan¹, SUN Fu-lin¹, LI Chao-lun³

(1. National Field Station of Marine Ecosystem at Daya Bay, Shenzhen 518121, China; 2. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 3. Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China)

Abstract: We investigate the spatial distributions of transparent exopolymer particles (TEP) in the Pearl River Estuary in summer by analyzing the TEP concentration and size-fractions of Chl a. TEP concentration (calculated by the amount of xanthan; the same below) ranged from $85.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1234.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, with an average of $690.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The averaged TEP concentrations in the surface layer and bottom layer were $562.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $778.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and for most stations lower concentration of TEP was found in the surface layer as compared to the bottom layer. In the surface layer, TEP increased from the up stream to down stream, and decreased gradually towards the open sea and towards the east and west in the estuary. In the bottom layer, the maximum TEP was observed in the S3 near Humen. The correlation between TEP and Chl a suggests that the excretion of naon-phytoplankton ($3\text{--}20\mu\text{m}$) may contribute more to TEP than other size phytoplankton. The ratio of TEP/(Chl a) shows positive correlation with salinity but negative correlation with nutrition ($\text{NO}_3\text{--N}$, $\text{NH}_4\text{--N}$, $\text{SiO}_3\text{--Si}$ and total phosphorus).

Key words: the Pearl River Estuary; transparent exopolymer particles (TEP); chlorophyll

透明胞外聚合颗粒物(TEP)是由浮游生物和细菌释放的溶解态胞外物质, 主要通过生物或非生物

过程合成, 又或直接由生物体释放的胶体状颗粒物形成^[1-2]。有研究发现贝类也可以向环境中释放

收稿日期: 2009-11-19; 修订日期: 2010-04-01。蔡卓平编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-Q07-02); 中科院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目(LYQ200701)

作者简介: 孙翠慈(1977—), 女, 河北省石家庄市人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋环境生态研究。E-mail: suncuici722@tom.com

通信作者: 王友绍。E-mail: yswang@scsio.ac.cn

TEP^[3]。TEP 的化学组成主要为酸性多糖, 呈透明或半透明特征。由于无法直接用显微镜观察到 TEP, 因此在研究早期尽管科学家意识到它在淡水和海洋中或许大量存在, 但在研究方法上未取得突破性进展。直至 1993 年, Alldredge 等^[4]采用阿尔新蓝染色过滤膜、分光光度计比色半定量测定 TEP 后, 人们才对 TEP 有较深入认识。TEP 是介于溶解态有机物质(DOC)和固体颗粒有机物质(POC)之间的中间形态, 它可以吸附周围的溶解有机物或小颗粒物以更快的速度形成较大的颗粒物, 增大小颗粒物转化成大颗粒物的聚集速率, 进而影响颗粒动力学过程^[2]。在生态食物链中, TEP 通过凝集作用使溶解有机物、细菌^[5]、微型鞭毛藻和浮游植物^[6]等形成凝聚体, 这些凝聚体可以直接被浮游动物^[7]、鱼类或其他海洋动物所摄食^[8], 不仅缩短食物链的途径, 还将微食物环和经典食物链相连在碳循环中^[5,8-9]。TEP 还可以直接通过沉降而改变垂直碳通量。在凝聚沉降过程中 TEP 大量吸附周围的 DOC 和 POC, 其 C/N 比率远远高于 Redfield 比率, 大量的碳随着 TEP 沉入深海, 会对海洋 CO₂ 的浓度起到反馈调节作用^[10-11]。此外, TEP 在微量元素及有机络合物运移方面也发挥着重要作用^[12-13]。所以, 开展 TEP 的相关研究对认识海洋环境、海洋碳循环乃至全球变化状况都具有重要的意义。

珠江口是我国人类活动和自然因素交汇冲突集中的大河口之一, 我国科研人员在珠江口碳循环研究方面积累了一定的研究经验, 如 Chen 等^[14]、Zhai 等^[15]、Guo 等^[16]和 Cai 等^[17]对珠江口 CO₂ 源与汇进行探讨, Dai 等^[18]和韩舞鹰等^[19]分别对胶体有机碳(<0.7 μ m)和溶解态、颗粒态有机碳进行研究。尽管 TEP 具有重要的研究意义, 但迄今为止, 对我国近海及河口 TEP 的相关报道仍然很少^[1,13]。因此, 本研究以珠江口为研究对象, 探讨 TEP 的含量、分布特征以及 TEP 与叶绿素、营养盐等水化环境因子之间的关系, 旨在为深入了解河口地区 TEP 在海陆物质交换中发挥的作用提供科学参考。

1 采样及方法

1.1 采样地点

本研究以珠江口为研究地区, 共设置 10 个站点, 站位分布见图 1。采样时间为 2009 年 8 月, 同步测量参数包括水温、盐度、pH、叶绿素和营养盐。采样过程中, 对表层和底层分别进行采水。

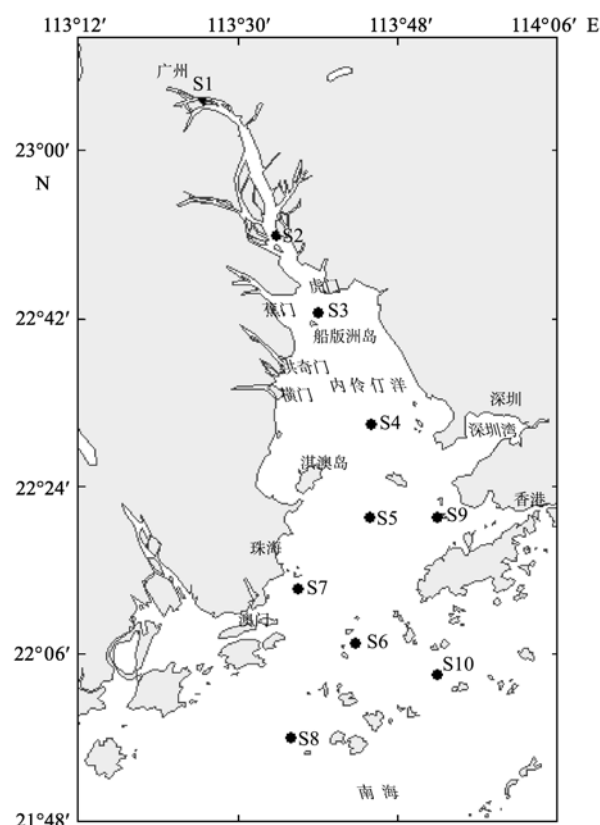


图 1 采样站位图

图中圆点表示取样站点

Fig. 1 Sampling stations in the Pearl River

1.2 方法

1.2.1 TEP 的测定

采集 200mL 水样后立即加甲醛至 1%(体积分数)用于 TEP 测定; TEP 测定方法参考 Passow 等^[20], 测定步骤如下: 取 30mL 水样, 用 0.4 μ m 聚碳酸酯膜(Milipore)收集样品, 0.5 μ L 阿尔新蓝(8GX, AMRESCO)染色 2—5s, 去离子水洗去过量的染色液, 将着色颗粒物溶解在 80%硫酸中, 浸泡 2h; 1000—1500r·min⁻¹ 转速离心 5min, 取上清液置于 1cm 比色皿中, 在 787nm 下测定吸光值; 每个样品重复测定 3 次。由于不同批次的阿尔新蓝在纯度和溶解度方面都有不同, 所以用黄原胶进行校正, 校正方法参考 Passow 等^[20], TEP 含量以黄原胶物质的量表示(μ g·L⁻¹)。

1.2.2 叶绿素和营养盐测定

营养盐和叶绿素参照《海洋调查规范》^[21]的方法测定, 对叶绿素进行分级过滤后(微微型: 0.2—3 μ m; 微型: 3—20 μ m; 小型 > 20 μ m)进行测定。

1.2.3 数据统计

应用软件 SPSS12.0 对数据进行统计以及分析参数间的相关性。

2 结果

2.1 调查期间珠江口基本环境参数

此次调查是在台风“天鹅”刚结束后进行，受台风降雨影响，淡水径流量较大，因此表层盐度整体偏低，底层受海水入侵影响较强，盐度显著高于表层(图 2)。温度自淡水区向外海逐渐降低，pH 分布趋势则相反。调查期间珠江口基本环境参数见表 1。

2.2 珠江口 TEP 含量及分布特征

在调查海域，TEP 含量介于 $85.0\text{--}1234.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间，平均值为 $690.9\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。除 S8 站外，表层 TEP 含量低于底层。表底层 TEP 均值分别为 $562.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $778.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TEP 在表层的含量范围是 $(85\text{--}818.4)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，整体分布表现为从上游至下游逐渐递

表 1 调查期间珠江口基本环境参数

Tab. 1 Environmental factors in the Pearl River during the investigation

项目	表层			底层		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
温度/℃	31.63	27.29	29.37	30.83	27.45	29.03
盐度/‰	13.750	0.060	7.102	32.600	0.140	18.516
pH	8.05	6.74	7.37	8.11	7.10	7.70

增，在 S6 站最高，为 $(818.4\pm 52.7)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而位于入海口东西两侧的 S7、S8、S9 和 S10，TEP 含量低于河口湾，其中以 S10 站最低，为 $(85.0\pm 24.3)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3)。底层 TEP 含量范围是 $(489.9\text{--}1234.9)\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，与表层相比，底层高值区更偏向口内，在虎门附近的 S3 站含量最高(图 3)，超过 $1000\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

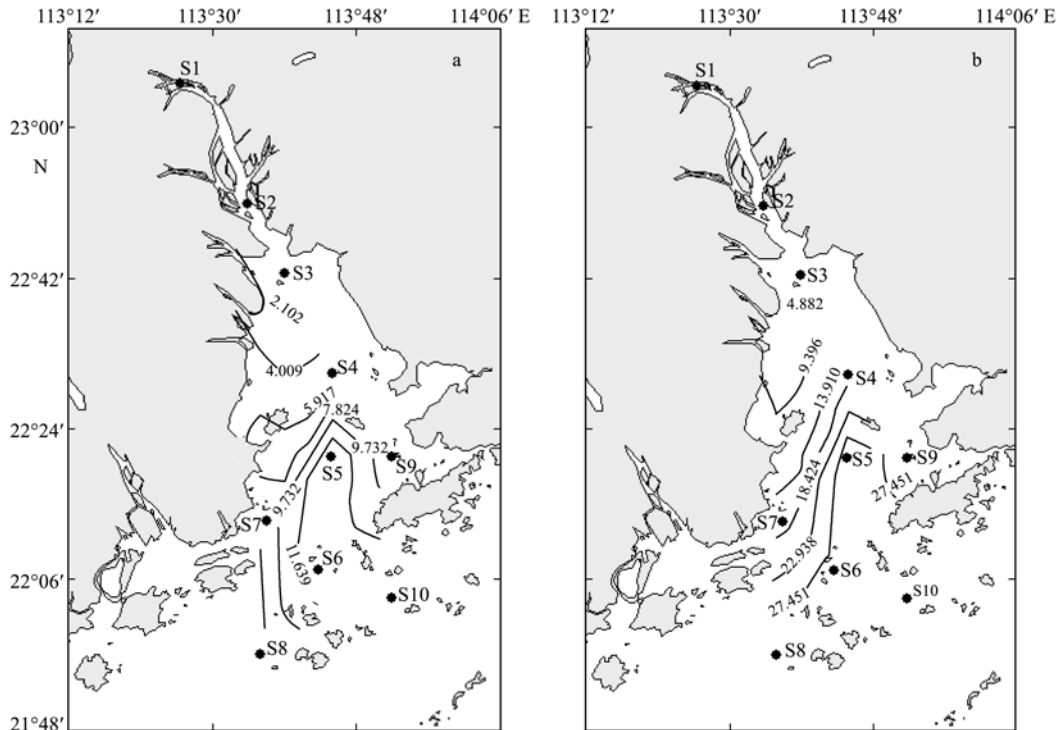


图 2 珠江口盐度(‰)分布特征

a: 表层盐度分布; b: 底层盐度分布

Fig. 2 Distribution of salinity in the Pearl River Estuary

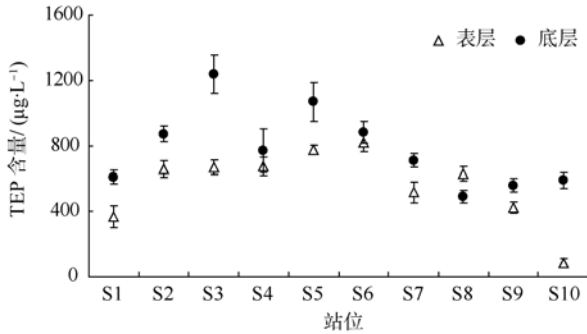


图 3 珠江口夏季 TEP 含量

Fig. 3 Concentration of TEP ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) in the Pearl River Estuary in summer

2.3 珠江口叶绿素含量及浮游植物粒径分布特征

调查期间，珠江口表层叶绿素 a 浓度(平均为 $18.25\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，范围为 $1.96\text{--}95.47\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)略低于底层(平均为 $21.95\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，范围为 $1.76\text{--}125.08\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。位于上游的 S1、S2 和 S3 站点叶绿素 a 浓度较高，而下游除 S6 和 S7 底层超过 $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其他站点的叶绿素 a 浓度在 $1.76\text{--}4.27\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围之内。

在珠江口不同区域，不同粒径浮游植物对叶绿素 a 的贡献有所不同。表层浮游植物粒径分布表现为上游淡水区小型浮游植物对叶绿素 a 贡献显著，

从口内向口外该粒径所占叶绿素 *a* 比例逐渐降低, 在河口湾到外海, 微型浮游植物占主要优势(图 4)。在底层, 位于河口湾内的 S3、S4 和 S5 以及河口外的 S10 站以微型浮游植物为主, 而在其他站位小型浮游植物为优势群(图 5)。

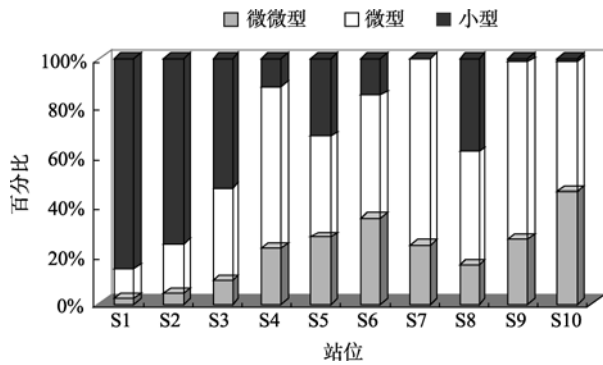


图 4 表层叶绿素 *a* 粒径结构

Fig. 4 Size fractions of Chl *a* in the surface layer

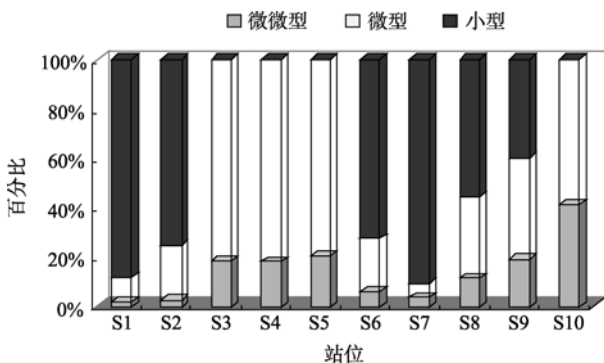


图 5 底层叶绿素 *a* 粒径结构

Fig. 5 Size fractions of Chl *a* in the bottom layer

2.4 珠江口 TEP 与环境的关系

浮游植物分泌的胞外多糖是 TEP 的主要来源之一, 因此 TEP 与 Chl *a* 具有一定的关联性, 珠江口夏季 TEP/Chl *a* 比值范围在 3.9—467.4 之间, 平均值为 159.0(图 6)。TEP/Chl *a* 比值在淡水区和咸淡水混合区有明显差异。在上游以及口内, 表层 TEP/Chl *a* 比值小于底层, 以 S5 站为拐点由此向口外的水域表层 TEP/Chl *a* 比值高于底层, 但位于珠江口西侧的 S9 表层底层差异不大, S10 与河口内的情况类似, 底层高于表层。

TEP/Chl *a* 比值之间的相关性与珠江口区域有关, 在不同区域 TEP/Chl *a* 比值差距较大, 而这种区域性差异在一定程度上受盐度影响。表层 TEP/Chl *a* 比值与盐度呈正相关($R=0.71$, $P<0.05$)。通常根据水体的盐度 S 可将河口分为淡水区($S<0.5‰$)、混合区

($S=0.5‰-25‰$)和海水区($S>25‰$)。珠江口除淡水区(S1 和 S2 站)之外, 混合区和海水区的 TEP 与微型浮游植物叶绿素 *a* 有正相关($R=0.50$, $P<0.05$)。TEP/Chl *a* 比值与其他环境因子的关系复杂^[1], 在此次调查中, 营养盐如硝酸盐、铵盐、活性硅酸盐、溶解态总无机氮(TIN)和总磷都与 TEP/Chl *a* 比值呈负相关(图 7)。

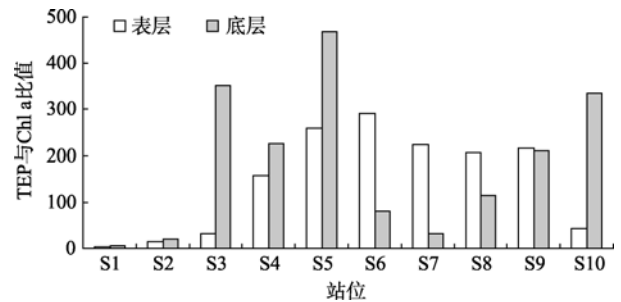


图 6 珠江口 TEP 与叶绿素 *a* 比值

Fig. 6 Ratio of TEP/(Chl *a*) in the Pearl River Estuary

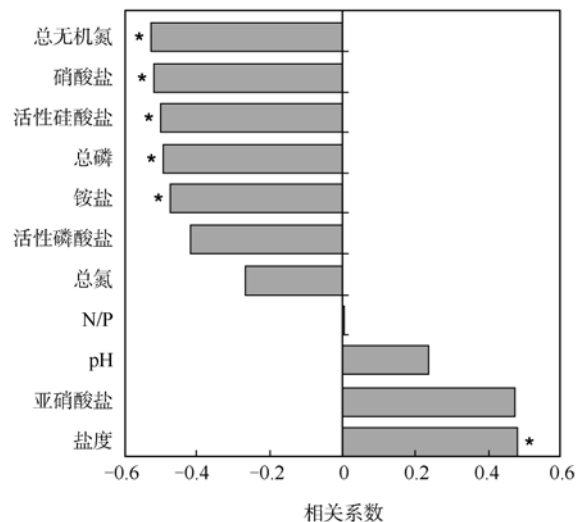


图 7 珠江口 TEP/Chl *a* 比值与环境因子的相关性

柱子带 “*” 表示相关系数 $P<0.05$

Fig. 7 Relationship between TEP/(Chl *a*) and the environmental factors

3 讨论

与世界其他海域调查结果相比(表 2), 调查期间珠江口 TEP 含量高于大洋区如东北大西洋^[22], 低于近岸地区如 Otsuchi 海湾含量^[23], 与我国九江口^[13]和美国 Neuse 河口^[24]含量接近(表 2)。在九江口^[13]以及 Iberian 海南部沿岸^[25], TEP 含量与叶绿素 *a* 具有显著正相关关系。一般在指数生长期, 浮游植物的 TEP 和叶绿素 *a* 的浓度呈正相关^[11,25], 但 TEP 生产的过程受到多重因素影响, TEP 与叶绿素 *a* 的浓度

表 2 珠江口以及其他海区 TEP 含量及 TEP/Chl a 比值之比较
Tab. 2 Comparison of TEP concentration and TEP/(Chl a) in the Pearl River Estuary and other sea areas

季节	研究地点	采样层次	TEP/(μg·L ⁻¹)	TEP/Chl a 比值	文献
春季	挪威 Balsfjord	0—18m	100—255	29—500	[26]
春季	挪威 Balsfjord	21—63m	125—250	40—500	[26]
春季	美国 East sound	表层	50—160	3—80	[27]
夏季	北冰洋罗斯海	表层	0—2800	89.1(均值)	[28]
秋季	Mecklenburg bight	16—26m	267—471	—	[29]
春季	日本 Otsuchi 海湾	0—15m	24—2321	125—144	[23]
夏季	波罗的海	4—20m	145—322	130(均值)	[30]
夏季	西班牙加的斯湾	混合层	25—717	0—340	[31]
夏季	东北大西洋	10—70m	10—120	49—104	[22]
春季	Southern Iberian coasts	10—200m	24—477	63—2708	[25]
夏季	珠江口	0—30m	85.0—1234.9	3.9—467.4	本文
夏季	九江口	0—16m	<720	—	[13]
全年	美国 Neuse 河口	表层	805—1801	—	[24]

注：上述参考文献与本文测定方法一致，而采用显微镜计数法测定 TEP 密度的文献不在引用范围；表中 “—”表示引文中未指出

之间的关系很难得出一般性的规律，在珠江口情况则比较复杂。在上游淡水区，浮游植物生物量非常高，甚至比下游高出几十倍，但 TEP 含量并未成倍增长，这与美国 Neuse 河口 TEP 分布趋势相似^[24]，表明河流淡水区 TEP 行为特征与下游的咸淡水交混区有所不同，影响因素可能有如下 3 种：首先，不同浮游植物种类产生胞外多糖的特性存在差异^[2]；其次，水体营养盐通过控制浮游植物生长而间接影响 TEP 含量；最后，河口盐度、阳离子浓度分布以及河口锋等非生物过程也可能影响 TEP 形成。

3.1 浮游植物群落结构对 TEP 分布的影响

根据文中给定的淡水区盐度(<0.5‰)，可近似将 S1、S2 站看作径流输入，根据数据(图 3)，地表径流输入的 TEP(淡水区 S1、S2 站)要比混合区低，在进入混合区后，随着海水与淡水的混合，盐度升高，出现更高的 TEP 含量可能有两种来源，一是混合区浮游植物生产的 TEP，二是外海高 TEP 的输入，但从近海端的站位数据看，其 TEP 并没有混合区高，因此混合区高的 TEP 更可能来自混合区的浮游植物生产。这也得到调查数据的支持：除 S1、S2 站以外的其他站的 TEP 与微型浮游植物 Chl a 之间存在正相关关系，同时表明在河口混合区微型浮游植物(粒径 3—20μm)可能对 TEP 贡献较大。

不同浮游植物种类分泌多糖的能力差异很大^[1-2]，且淡水硅藻与海洋硅藻分泌的多糖相比，硫酸基含量明显偏低^[2]。珠江口上下游水质以及浮游植物群落生态类型、粒径结构差异较大。上游 S1 和 S2 站存在大量颗粒直链藻 *Melosira granulata* 以

及其他淡水藻类，从粒径上划分属于小型浮游植物，而在混合区，生态种类多为的近岸种或广布种，粒径以微型和微微型浮游植物为主，小型浮游植物丰度远低于 S1 和 S2^[32]，因此在不同河口区域，TEP 的含量分布可能受浮游植物的群落结构影响。

3.2 营养盐对 TEP 分布的影响

浮游植物分泌的胞外多糖是 TEP 的主要来源之一^[2]，浮游植物分泌行为以及细胞凋亡都与水体营养水平有关，因此 TEP 与叶绿素比值间接反映了浮游植物生长状态与周围环境因子的关系^[25]。有研究发现营养物质充足的海域，浮游植物生长旺盛且多处于指数生长期，叶绿素含量也较高，但 TEP 数量并不高，因此 TEP/Chl a 比值偏低；而在贫营养区，营养物质缺乏抑制浮游植物生长，叶绿素偏低，而受营养物质匮乏的胁迫，浮游植物向外大量分泌胞外多糖，TEP 含量随之升高，因此在贫营养区，TEP/Chl a 比值能高出富营养化地区两个数量级^[25,31]。珠江口淡水区的 S1 和 S2 站位的营养盐尤其是 TIN、活性硅酸盐和活性磷酸盐明显高于下游的河口区，在下游及外海口属于典型的磷限制，因此珠江口下游虽然叶绿素 a 含量偏低，但 TEP 较高，因此下游 TEP/Chl a 比值高出上游百余倍。本次调查的珠江口 TEP/Chl a 比值与活性硅酸盐、硝酸盐、铵盐和总磷浓度呈负相关，也表明珠江口营养盐可能会影响 TEP 形成。

3.3 非生物作用对 TEP 分布的影响

TEP 透明胞外聚合颗粒物的形成一般分为两个步骤：先由浮游生物主要是浮游植物释放有机大分

子(也称为 TEP 前体,其黏性成分为多糖);然后它们通过非生物作用如凝集化、凝胶化和退火等过程聚集成 TEP^[1]。多糖的凝结速率受到水体一些物理化学参数的影响,如水体中盐度、阳离子通过影响多糖电荷而改变多糖的立体结构^[24],增加水体搅动改变剪切应力能增加 TEP 形成数量并改变其体积大小^[33-34]。在美国 Neuse 河口表层 TEP 含量与盐度呈正相关^[24],而在珠江口设置站点的盐度跨度比 Neuse 河口大,虽然此次调查 TEP 与盐度无明显相关,但盐度与 TEP/Chl a 比值呈正相关。珠江口 TEP 形成除了受浮游植物生物作用、盐度影响之外,可能还与水动力也有一定关系,例如 S6 和 S3 表层和底层的 TEP 含量偏高可能与所处位置的水动力相关。S6 站位于珠江口潮侵锋中心带, S3 位于舢舨洲岛附近,受台风“天鹅”降雨影响,上游虎门和蕉门的淡水径流增强,与潜入川鼻水道之下而楔入到舢舨洲的涨潮咸水存在较大的密度梯度,由此形成河

口内锋^[35],潮侵锋和河口内锋引起强烈的切变和水体混合,可能促进了纳米或微米级的 TEP 前体的聚合,增加 TEP 形成的数量。

4 结论

珠江口透明胞外颗粒的含量及分布的研究结果表明:底层 TEP 含量高于表层 TEP 含量,表层 TEP 含量从上游至下游逐渐递增,而到外海区,TEP 开始降低,底层 TEP 含量高值区更偏向内河口,虎门附近 S3 站点最高,微型浮游植物(粒径 3—20 μm)可能对 TEP 贡献较大,盐度和营养盐可能是影响 TEP 含量的重要因素。

本文有关珠江口透明胞外聚合颗粒物含量、分布的研究只是一个初步研究,结果仅能反映某一短暂时段的情况。为了进一步了解珠江口 TEP 的分布、变化规律、产生机制及其在碳循环中的作用,我们仍需要开展更深入的研究工作。

参考文献

- [1] 孙军. 海洋中的凝集网与透明胞外聚合颗粒物[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1191-1198.
- [2] PASSOW U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments[J]. Progress in Oceanography, 2002, 55: 287-333.
- [3] MICHAEL P M, WARD J E, BRUCE A M, et al. Production of transparent exopolymer particles (TEP) by the eastern oyster *Crassostrea virginica*[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 288: 141-149.
- [4] ALLDREDGE A L, PASSOW U, LOGAN B E. The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean[J]. Deep-Sea Research I, 1993, 40: 1131-1140.
- [5] MARI X, KIORBOE T. Abundance, size distribution and bacterial colonization of transparent exopolymer particles (TEP)[J]. Journal of Plankton Research, 1993, 18: 969-986.
- [6] TRANVIK L J, SHERR E B. Uptake and utilization of 'Colloidal DOM' by heterotrophic flagellates in seawater[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 92: 301-309.
- [7] PRIETO L, SOMMER F, STIBOR H, et al. Effects of planktonic copepods on transparent exopolymer particles (TEP) abundance and size spectra[J]. Journal of Plankton Research, 2001, 23: 515-525.
- [8] FLOOD P, DEIBEL D, MORRIS C. Filtration of colloidal melanin from sea water by planktonic tunicates[J]. Nature, 1992, 355: 630-632.
- [9] DILLING L, WILSON J, STEINBERG D, et al. Feeding by the euphausiid *Euphausia pacifica* and the Copepod (*Clanus pacificus*) on marine snow[J]. Marine Ecology Progress Series, 1998, 170: 189-201.
- [10] ENGEL A. Direct relationship between CO₂ uptake and transparent exopolymer particles production in natural phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24: 49-54.
- [11] HARLAY J, CAROLINE D B, ENGEL A, et al. Abundance and size distribution of transparent exopolymer particles (TEP) in a coccolithophorid bloom in the northern Bay of Biscay[J]. Deep-Sea Research I, 2009, 56: 1251-1265.
- [12] QUIGLEY M S, SANTSCHI P H, HUNG C C, et al. Importance of acid polysaccharides for ²³⁴Th complexation to marine organic matter[J]. Limnology and Oceanography, 2002, 47: 367-377.
- [13] 彭安国, 黄奕普. 九龙江河口区 TEP 及其与铀、钍、钋同位素相关性的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 38-42.
- [14] CHEN C T A, TSUNOGAI S. Carbon and nutrients in the ocean[M]//GALLOWAY J N, MELILLO J J. Asian change in the context of global climate change. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1998: 271-307.
- [15] ZHAI W, DAI M H, CAI W J, et al. High partial pressure of CO₂ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. Marine Chemistry, 2005, 93(1): 21-32.
- [16] GUO X H, CAI W J, ZHAI W D, et al. Seasonal variations in the inorganic carbon system in the Pearl River (Zhujiang) estuary[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28: 1424-1434.

- [17] CAI W J, DAI M H. Comment on "Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf area pumping" by Thomas et al. (Science 304) [J]. Science, 2004, 306: 1477.
- [18] 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]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 18: 265–273.
- [19] 韩舞鹰. 南海海洋化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] PASSOW U, ALLDREDGE A L. A dye-binding assay for the spectrophotometric measurement of transparent exopolymer particles (TEP)[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40, 1326–1335.
- [21] 国家海洋局. 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [22] ENGEL A. Distribution of transparent exopolymer particles (TEP) in the northeast Atlantic Ocean and their potential significance for aggregation processes[J]. Deep-Sea Research I, 2004, 51: 83–92.
- [23] RAMAIAH N, YOSHIKAWA T, FURUYA K. Temporal variations in transparent exopolymer particles (TEP) associated with a diatom spring bloom in a subarctic ria in Japan[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 212: 79–88.
- [24] WETZ M S, ROBBINS M C, PAERL H W. Transparent exopolymer particles (TEP) in a river-dominated estuary: spatial-temporal distributions and an assessment of controls upon TEP formation[J]. Estuaries and Coasts, 2009, 32: 447–455.
- [25] PRIETO L, NAVARRO G, C6ZAR A, et al. Distribution of TEP in the euphotic and upper mesopelagic zones of the southern Iberian coasts[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, 53(11/13): 1314–1328.
- [26] RIEBESELL U, REIGSTAD M, WASSMANN P, et al. On the trophic fate of *Phaeocystis*-derived mucus for vertical flux[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1995, 33: 193–203.
- [27] KIØBOE T, HANSEN J L S, ALLDREDGE A L, et al. Sedimentation of phytoplankton during a diatom bloom: rates and mechanisms[J]. Journal of Marine Research, 1996, 54: 1123–1148.
- [28] HONG Y, SMITH W O, WHITE A M. Studies on transparent exopolymeric particles (TEP) produced in the Ross Sea (Antarctica) and by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae)[J]. Journal of Phycology, 1997, 33: 368–376.
- [29] JÄHMLICH S, THOMSON L, GRASF G. Factors controlling aggregate formation in the benthic boundary layer of the Mecklenburg Bight (Western Baltic Sea)[J]. Journal of Sea Research, 1998, 41: 245–254.
- [30] ENGEL A, MEYERHÖFER MV, BRÖCKEL K. Chemical and biological composition of suspended particles and aggregates in the Baltic Sea in summer (1999)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Sciences, 2002, 55: 729–741.
- [31] GARCÍA C M, PRIETO L, VARGAS M, et al. Hydrodynamics and the spatial distribution of plankton and TEP in the Gulf of Cádiz (SW Iberian Peninsula)[J]. Journal of Plankton, 2002, 24: 817–833.
- [32] 李开枝, 黄良民, 张建林, 等. 珠江河口咸潮期间浮游植物的群落特征[J]. 热带海洋学报, 2010, 29 (1): 62–68.
- [33] SCHUSTER S, HERNDL G J. Formation and significance of transparent exopolymeric particles in the Northern Adriatic Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 124: 227–236.
- [34] BEAUVAIS S, PEDROTTI M L, EGGE J, et al. Effects of turbulence on TEP dynamics under contrasting nutrient conditions: implications for aggregation and sedimentation processes[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 323: 47–57.
- [35] 应秋甫. 珠江口伶仃洋锋的类别及其对沉积的影响[J]. 热带海洋. 1994, 13(2): 25–32.