

薛思佑, 胡佶, 韩正兵, 等. 夏季闽东沿海水体中透明胞外聚合颗粒物的分布特征及影响因素[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 17–30, doi:10.12284/hyxb2021114

Xue Siyou, Hu Ji, Han Zhengbing, et al. Distribution patterns and influencing factors of transparent exopolymer particles (TEP) in the coast of eastern Fujian in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(8): 17–30, doi:10.12284/hyxb2021114

夏季闽东沿海水体中透明胞外聚合颗粒物的分布特征及影响因素

薛思佑¹, 胡佶^{1*}, 韩正兵¹, 蔡昱明¹, 刘小涯¹, 冯毓彬¹,
于培松¹, 张慧娟¹, 潘建明¹

(1. 自然资源部第二海洋研究所 海洋生态系统动力学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 透明胞外聚合颗粒物 (TEP) 在海洋微食物网和海洋碳循环中发挥着重要作用。本文针对夏季闽东沿海 TEP 的分布特征及影响因素进行研究。结果表明, 闽东沿海 TEP 含量 (以黄原胶为标准物质计算, 后同) 范围为 25.2~935.5 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 $(201.8\pm 177.9) \mu\text{g/L}$ 。整体而言, TEP 的分布表现为近岸高、远岸低, 表层 TEP 含量相对于底层要低。相关性分析显示, 研究海域 TEP 含量与浊度和营养盐 (硅酸盐、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐) 浓度呈正相关, 与 pH、溶解氧浓度和小型浮游生物量呈负相关。分级叶绿素 *a* 结果显示, 相对于其他尺寸浮游植物, 调查海域小型浮游生物可能对 TEP 含量的贡献最大。相比于开阔大洋中 TEP 主控因素为浮游植物而言, 夏季闽东海域 TEP 主要由浮游植物在衰退阶段产生, 其分布主要受颗粒物再悬浮作用影响。该结果不仅进一步阐明了近岸海域与开阔大洋 TEP 影响因素的区别, 并且对我国近海海域不同区域 TEP 分布研究空白进行了补充。

关键词: 闽东沿海; 透明胞外聚合颗粒物; 浮游植物; 分布特征; 影响因素

中图分类号: P734.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)08-0017-14

1 引言

近岸河口是河流中的淡水生物群落和沿海、海湾中的海洋生物群落两个水生生物群落之间的过渡带, 其通常以群落和种群组成的显著变化为特征^[1], 这些变化可能对海洋系统、元素计量比、碳储存和生物地球化学产生重大影响^[2]。河口作为许多生物筑巢和觅食的栖息地^[3], 逐渐受到人为压力和气候变化的威胁^[4], 亟需我们更好地理解河口基于食物网有机体的结构和功能^[5]。

水体中部分初级生产的有机物质是以胞外多糖 (Extracellular Polymeric Substances, EPS) 的形式存在^[6],

并可以形成透明胞外聚合颗粒物 (Transparent Exopolymer Particles, TEP), 其中的酸性多糖能被爱尔新蓝染色剂染色^[7], 表现为溶解有机物与颗粒有机物的双重特性, 在水生生态系统的颗粒聚集、沉积和碳埋藏等过程中起着重要作用^[8-9]。TEP 具有黏性^[6], 能够吸附溶解有机物或者其他小颗粒物聚集成较大颗粒物, 且 TEP 密度比海水小^[10], 使得这些较大颗粒聚合物的密度取决于 TEP 与其他颗粒物的相对含量, 从而在整个海洋生态系统中发挥作用, 其中包括对海洋碳库^[11]、海气交换^[12]等动态过程的影响。此外, TEP 可以通过凝集作用使溶解有机物、细菌、微型鞭毛藻、浮游植物等形成凝聚体^[13], 供浮游动物^[14]、鱼类

收稿日期: 2019-12-06; 修订日期: 2020-11-08。

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1402405, 2018YFC1406304)。

作者简介: 薛思佑 (1994—), 男, 浙江省温州市人, 研究方向为海洋中碳的生物地球化学过程。E-mail: 184839869@qq.com

* 通信作者: 胡佶, 男, 副研究员, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: huj@sio.org.cn

或其他海洋生物^[15]摄食。经此过程,TEP 能将食物链的途径缩短,并将微食物环和经典食物链相连^[13]。

自 Alldredge 等^[7]首次提出 TEP 的定义后,国际上针对 TEP 的研究逐渐展开,例如 Discart 等^[16]对 TEP 的测定方法进行了系统地分析,使 TEP 分类更为明确; Villacorte 等^[17]发现,TEP 在不同水源中含量不同,且胶体态 TEP 占主要成分; Mari 等^[18]在实验中发现,营养状况可能影响 TEP 产生,从而控制球形棕囊藻繁殖期的输出和滞留平衡; Fukao 等^[19]通过实验培养发现,不同藻类间产生的 TEP 存在差异;孙军等^[12]通过建立概念模型,对 TEP 在海洋微表层积累、对气溶胶产生作用等方面有更全面的认识,并指出了未来 TEP 的重点研究方向。但我国仅对九龙江河口^[20]、珠江口^[21]和白令海峡^[22]的 TEP 有研究。

福建东部沿海,属于亚热带海洋性季风气候。在冬季,海域主要受低温、低盐且富含营养盐的闽浙沿岸流影响^[23]。而在夏季,闽浙沿岸流的影响范围主要分布于浙江省北部沿岸海域,对浙江南部和福建海域无明显影响。闽东海域拥有沙埕、三沙、赛岐等天然良港,其中沙埕港^[24]是调查海域最为主要的港口,其海域总面积为 87.07 km²,是一个深入内陆的弯曲形狭

长港湾。港口外海的台山渔场资源丰富,是闽东主要渔场之一,盛产黄鱼、带鱼、鳗鱼、墨鱼、虾、梭子蟹等。由于 TEP 可以被浮游动物和鱼类摄食,因此探究闽东海域 TEP 的分布特征及影响因素在一定程度上也可以为准确评估该海域的渔场资源分布提供重要信息。此外,闽东沿岸海域赤潮生物种类繁多^[25],且夏季是赤潮高发时期,赤潮发生后,浮游植物产生的 TEP 也会随之增加。

2 采样与方法

2.1 采样区域

本文以闽东沿海(26.7°~27.3°N, 120.2°~121°E)为研究区域,由于沙埕港周边无大河溪注入,故调查海域受陆地径流影响较小。研究区域设置 16 个站点,形成自近岸向离岸的 4 条平行断面,站位分布见图 1。采样时间为 2019 年 7 月 24~27 日,测量的参数包括水温、盐度、pH、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)浓度、浊度、5 项营养盐浓度、叶绿素 *a*(Chlorophyll *a*, Chl *a*)浓度、颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)含量以及 TEP 含量。每个站位采样层参照《海洋调查规范 GB/T 12763.4》进行设置,包括 0 m、5 m、10 m、

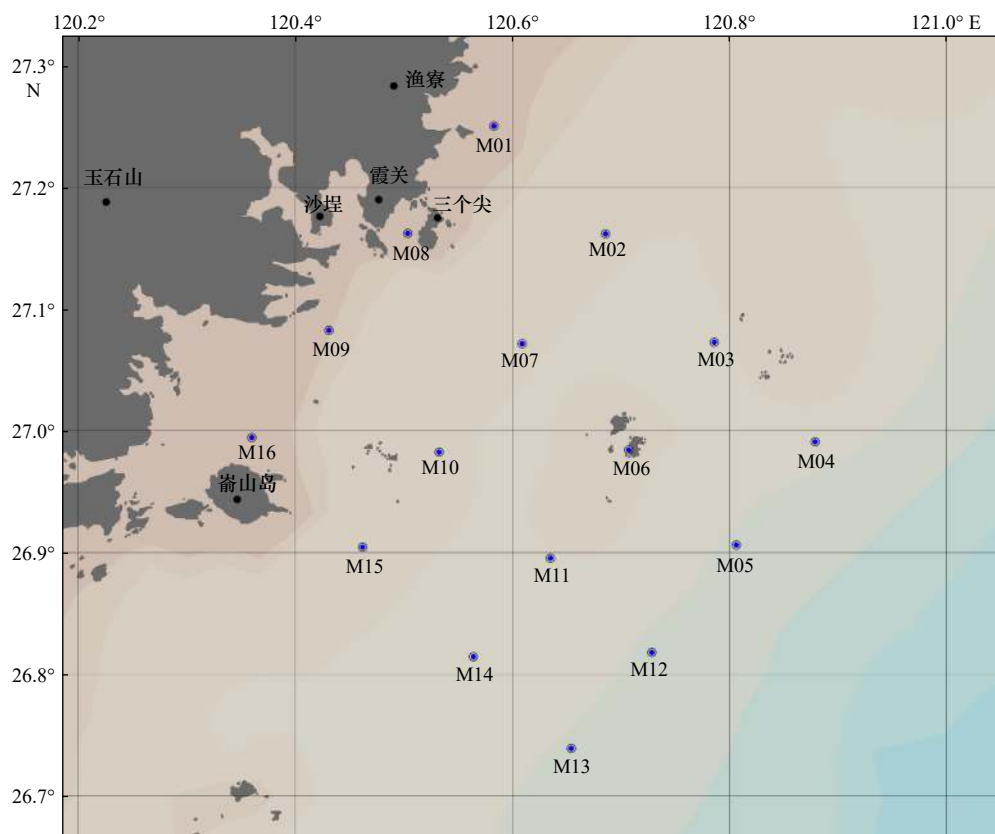


图 1 2019 年闽东沿海夏季采样站位

Fig. 1 The sampling stations in the coast of eastern Fujian in summer of 2019

20 m、30 m 和底层(距离海底 2 m),现场实际采水层根据站位水深进行选择。

2.2 研究方法

2.2.1 基本参数测定

水温、盐度、浊度等基础数据主要由 RBR 传感器(XRX-620 CTD)直接进行获取。溶解氧、pH、5 项营养盐样品测定参照《海洋调查规范 GB/T 12763.4》的方法。溶解氧采样时依序往棕色广口瓶中注入 1 mL 氯化锰溶液和 1 mL 碱性碘化钾溶液进行固定,随后在 24 h 内带回实验室利用碘量滴定法测定分析。pH 水样用 50 mL 聚乙烯瓶装取,利用 pH 计测定。硅酸盐、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐水样合并装于同一水样瓶中,量取一定体积海水(0.3 L),用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤。滤液放于高密度聚乙烯水样瓶中,并用氯化汞溶液固定,常温保存并带回实验室测定:硅酸盐测定采用硅钼蓝法,用 7230G 型分光光度计于 812 nm 波长下测定吸光度(检测下限为 0.10 $\mu\text{mol/L}$);磷酸盐测定采用抗坏血酸还原磷钼蓝法,于 882 nm 波长下测定吸光度(检测下限为 0.02 $\mu\text{mol/L}$);亚硝酸盐测定采用重氮-偶氮法,于 543 nm 波长下测定吸光度(检测下限为 0.02 $\mu\text{mol/L}$);硝酸盐测定采用锌镉还原法,于 543 nm 波长下测定吸光度(检测下限为 0.05 $\mu\text{mol/L}$);铵盐测定采用靛酚蓝法,于 630 nm 波长下测定吸光度(检测下限为 0.05 $\mu\text{mol/L}$)。分析过程中所用标准溶液均由自然资源部第二海洋研究所标准物质中心生产(GBW 08617-08645),且所有的采样瓶与过滤装置均无其他外来污染物干扰。

2.2.2 POC 测定

POC 样品采集:量取 0.3~0.5 L 海水,用 450 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧过的 GF/F 玻璃纤维膜过滤,滤膜于-20 $^{\circ}\text{C}$ 下冷冻保存并带回实验室测定分析。

POC 样品测定:膜样用浓盐酸熏蒸 12 h 以除去无机碳,用去离子水清洗残留盐酸后在 50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干,用元素分析仪(Elementar,德国)测定样品(分析精度为 CHNS 小于 0.1%)。此外,为了评估海域中 TEP 对 POC 的贡献,本文利用文献 [26] 中的转换因子将 TEP 含量转换成碳含量计算了 TEP 对 POC 的贡献率。由于文献中的转换因子(f 为 0.53~0.88,其中 f 为 POC 含量和 TEP 含量的比值)是在盐度比河口高的环境中对多种硅藻进行实验室培养测定,相比于现场环境,其受干扰程度小,实际海水环境下的转换因子可能达不到上述计算值,故本文使用保守的转换因子 f 为 0.53 进行计算。

2.2.3 叶绿素 a 浓度测定

50 mL 水样依次通过孔径为 20 μm 筛绢、2 μm 核孔滤膜和孔径为 0.7 μm 的 GF/F 滤膜过滤,并记为小型浮游生物(Net):体长大于 20 μm ;微型浮游生物(Nano):体长为 2~20 μm ;微微型浮游生物(Pico):体长为 0.7~2 μm 。膜样于-20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存,于实验室内使用 Trilogy 荧光计分析测量叶绿素 a 浓度,测定依据《海洋调查规范 GB/T 12763.6》。为了更直观展示结果,下文图片中出现的不同粒径浮游生物以 Net、Nano 和 Pico 表示。此外,叶绿素 a 浓度遥感数据则是从海洋遥感在线分析平台(SatCO2-Pro.V1.0, <http://www.SatCO2.com>)获取。

2.2.4 TEP 测定

TEP 的测定方法主要参考 Passow 和 Alldredge^[27] 的实验方法,量取 300~500 mL 海水样品,在负压不大于 0.02 MPa 的情况下,过滤到直径为 25 mm、孔径为 0.4 μm 的聚碳酸酯滤膜上。再加入 500 μL 质量分数为 0.02% 的爱尔新蓝(pH 为 2.5, Sigma-Aldrich 公司)染色 2 s 至膜表面完全浸没。用去离子水洗去多余染液后,将膜样置于 6 mL 80% 的硫酸中进行溶解,放置 2 h,期间手动振荡试管 3~5 次。最后取上清液于 1 cm 比色皿中,在 787 nm 波长下测定吸光值,每个水层均采样 2~3 次,测定结果扣除滤膜空白后取平均值记录。测定的吸光值以改进的黄原胶标定方法^[28] 进行计算:首先配制一系列浓度梯度的黄原胶标准溶液,量取 2 mL 各个浓度梯度溶液于试管中(事先加入 500 μL 爱尔新蓝溶液)进行混合,然后过滤至相同聚碳酸酯滤膜上,膜样溶解及测定步骤与 TEP 相同。

2.2.5 数据分析

本文应用 IBM SPSS Statistics 22 对参数数据进行分析,采用 Ocean Data View 5.1.7 以及 OriginPro 9.0 进行作图。

3 结果

3.1 温度、盐度和其他参数分布特征

该海域所有水层的温度为 23.52~28.80 $^{\circ}\text{C}$,平均为 (25.90 \pm 1.57) $^{\circ}\text{C}$;盐度为 29.513~34.467,平均值为 33.165 \pm 1.235。调查海域由于采样时间处于夏季,水体温度整体较高。水温从表层向底层逐渐降低,近岸远岸温度变化不大。盐度从表层向底层逐渐增加,且近岸向远岸略微增加。海域中 pH 范围为 7.94~8.26,平均值为 8.07 \pm 0.08,基本呈现近岸低、远岸高的趋势;溶解氧浓度为 3.98~9.36 mg/L,均值为 (6.22 \pm 1.41)mg/L,主要分布特征为远岸高、近岸低;浊度则

为 0.7~115.7 NTU, 平均为 (14.6±19.3) NTU, 整体变化为从表层向底层逐渐增加; 各项营养盐浓度范围及均值如表 1 所示, 其整体变化趋势为从近岸高值向远岸减小, 呈现底层高于表层的变化特征。

3.2 TEP 含量及分布特征

在整个调查海域中, TEP 含量(以黄原胶为标准物质计算, 后同)范围为 25.2~935.5 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 (201.8±177.9) $\mu\text{g/L}$ 。表层 TEP 平均含量为 161.4 $\mu\text{g/L}$, 其在霞关与三个尖附近(M08 站位)达到最高, 最高浓度为 437.7 $\mu\text{g/L}$, 随后向周围海域逐渐递减。底层平均含量为 365.1 $\mu\text{g/L}$, 其最高值出现在鱼寮与三个尖附近(M01 站位), 含量为 935.5 $\mu\text{g/L}$ 。在各个断面中, TEP 含量分布均呈现为近岸高, 远岸低的趋势, 且底层 TEP 含量高于表层(图 2)。整体而言, TEP 呈近岸向远岸逐渐减小的变化趋势, 且底层含量较表层要高。

3.3 POC 含量及分布特征

海域中 POC 含量的变化范围为 0.13~0.55 mg/L , 平均为 (0.24±0.09) mg/L 。表层 POC 平均含量为 0.29 mg/L , 底层 POC 平均含量为 0.26 mg/L , 在三个尖(M01 站

位)附近的底层 POC 含量最高。从图 3 的断面与平面分布看, POC 的分布在海域中呈现不同模式: POC 含量呈近岸高、远岸低, 且呈表层低于底层的分布趋势(图 3a); POC 在近岸表层与底层含量相当, 但比中间水层高, 而远岸呈表层高、底层低的变化趋势(图 3b); POC 仅在 M11 和 M12 站位附近的远岸表层呈现较高含量(图 3c); POC 含量在近岸附近相较于远岸要高(图 3d); 表层 POC 分布主要呈现为区块状, 分别在 M05、M07 和 M16 站位附近出现高值(图 3e)。

3.4 叶绿素 *a* 浓度及浮游植物粒径分布特征

调查期间, 闽东沿海的叶绿素 *a* 浓度范围为 0.61~18.95 mg/m^3 , 平均浓度为 (5.36±4.70) mg/m^3 。表层叶绿素 *a* 浓度(平均为 7.90 mg/m^3)要高于底层叶绿素 *a* 浓度(平均为 2.62 mg/m^3)。图 4 中显示, 叶绿素 *a* 浓度呈区块分布, 与 POC 分布存在部分相似变化, 如图 4b 至图 4d 结果的变化趋势; 图 4a 的叶绿素 *a* 浓度主要在近岸表层(M16 站位附近)出现高值; 图 4e 的叶绿素 *a* 浓度分布也同样与 POC 表层分布相似。粒径分级叶绿素 *a* 浓度结果显示(图 5), 不同粒径浮

表 1 夏季闽东海域 TEP 及其他环境参数

Table 1 TEP and other environmental parameters in the coast of eastern Fujian

参数	表层			底层			
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	28.80	26.45	27.69±0.63	25.96	23.52	24.43±0.75	
盐度	33.064	29.513	31.810±1.134	34.467	31.870	34.019±0.70	
pH	8.25	7.94	8.10±0.10	8.09	7.95	8.00±0.04	
DO浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	9.18	5.53	7.15±1.21	7.02	3.98	4.91±0.79	
浊度/NTU	21.5	1.3	7.6±6.5	115.7	11.9	36.0±29.5	
硅酸盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	25.75	0.46	9.77±8.35	18.06	4.18	11.03±4.24	
磷酸盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.80	0.02	0.20±0.22	0.64	0.21	0.41±0.12	
亚硝酸盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.10	0.03	0.65±0.76	2.13	0.39	1.19±0.43	
硝酸盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	20.73	1.420	8.30±6.40	15.94	4.46	8.09±2.75	
铵盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.30	0.58	0.81±0.21	1.70	0.56	0.82±0.33	
POC含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.42	0.16	0.29±0.09	0.55	0.13	0.26±0.11	
TEP含量/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	437.7	54.7	161.4±111.7	935.5	87.1	365.1±223.6	
Chl <i>a</i> 浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Net	10.33	0.39	2.62±2.65	1.27	0.12	0.50±0.30
	Nano	9.68	0.25	3.33±3.13	7.76	0.18	1.50±2.24
	Pico	6.66	0.28	1.96±1.97	1.83	0.07	0.63±0.50
	总浓度	18.95	2.33	7.90±5.14	9.32	0.61	2.62±2.73

注: 表层样本数为16, 底层样本数为15。

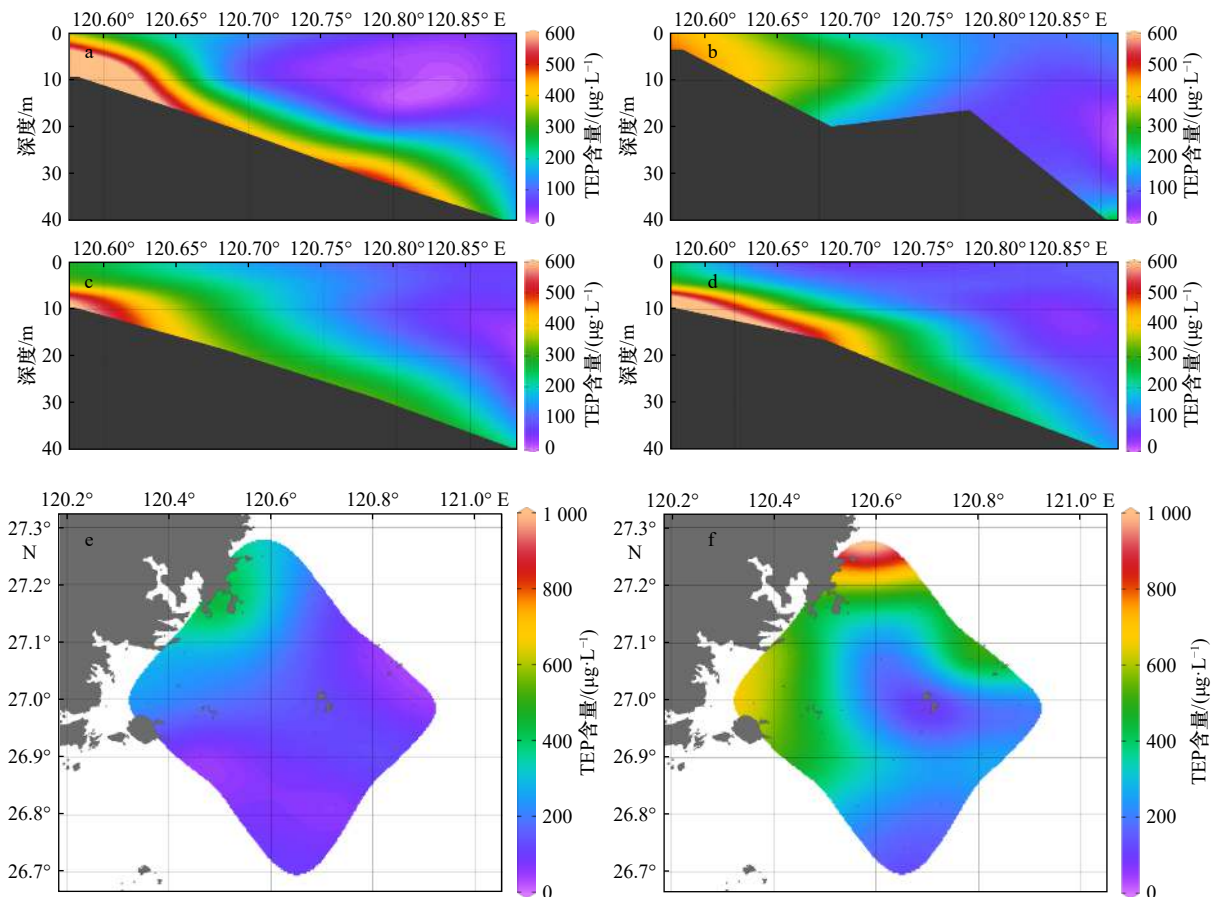


图2 2019年闽东沿海夏季TEP分布

Fig. 2 The distribution of TEP in the coast of eastern Fujian in summer of 2019

a. M01-M04 站位断面; b. M08-M05 站位断面; c. M09-M12 站位断面; d. M16-M13 站位断面; e. 表层; f. 底层
a. M01-M04 sections; b. M08-M05 sections; c. M09-M12 sections; d. M16-M13 sections; e. surface layer; f. bottom layer

游生物对叶绿素 *a* 浓度的贡献存在差异。近岸水体中微型浮游生物粒径占主导,即在霞关与三个尖附近海域(站位 M02、M07、M08 和 M09)对叶绿素 *a* 浓度贡献较大的是微型浮游生物。而在远岸水域,小型浮游生物逐渐增加,并且在离岸最远的调查海域(站位 M04、M05、M12 和 M13),小型浮游生物成为主要的优势种群。

3.5 各参数相关性分析

为了能进一步探究 TEP 与各项参数之间的内在联系,本文分别对 TEP(图 6a)、TEP 含量/Chl *a* 浓度(图 6b)和 TEP 对 POC 的贡献率(图 6c)与其他环境因素进行了相关性分析。从图 6a 中我们可以看到,TEP 含量与浊度和 5 项营养盐浓度呈正相关,与 pH、DO 浓度和小型浮游生物(Net)量呈负相关。在图 6b 中,TEP 含量和 Chl *a* 浓度比值与水温、pH 和 DO 浓度呈负相关,与盐度、浊度、5 项营养盐浓度(除硝酸盐外)呈正相关。在图 6c 中,TEP 对 POC 的贡献率与

浊度和 5 项营养盐呈正相关,与水温、pH、DO 浓度、小型浮游生物(Net)量和 Chl *a* 浓度呈负相关。

4 讨论

4.1 不同地区 TEP 含量比较

对比世界上其他海域 TEP 的含量(表 2),我们可以看到,夏季闽东沿海的 TEP 含量范围与圣劳伦斯河口^[29]相近,高于大西洋东北部^[30]、南极半岛^[31]、以色列亚喀巴海湾^[32]以及印度多纳波拉湾^[33]等海域,低于珠江口^[21]、英吉利海峡^[34]和日本 Otsuchi 海湾^[35]等地区。TEP 大体的变化趋势为从近岸河口向大洋开阔海区逐渐减小。这种变化主要是由于 TEP 的生产过程受多种因素影响造成。相对于开阔大洋来说,近岸河口区域营养盐水平较高,其 TEP 的形成一方面受多种浮游植物、底栖生物以及细菌等种群影响,另一方面也受悬浮颗粒物等非生物因素影响,TEP 往往能在该区域产生较高的聚集累积。所以 TEP 的分

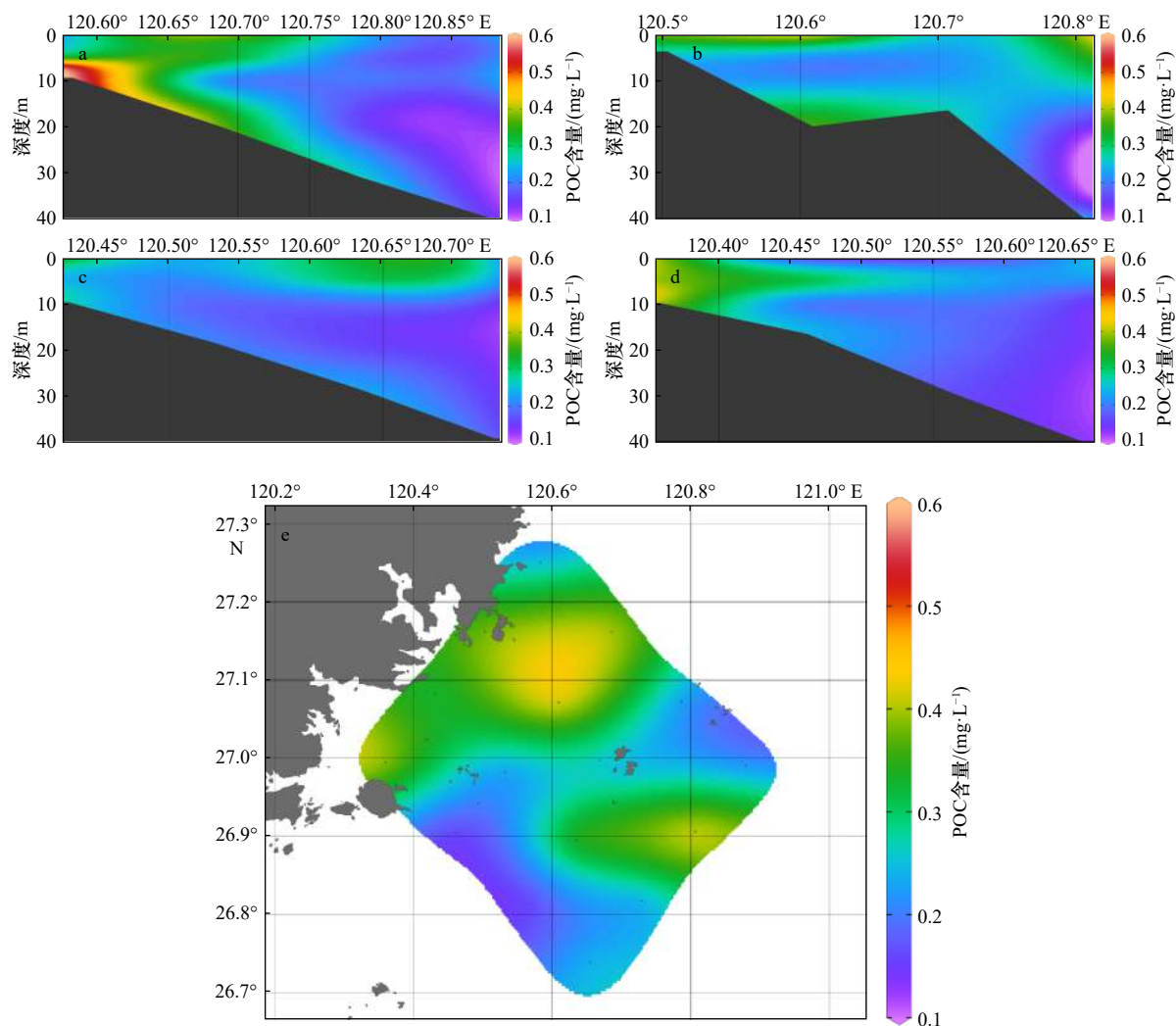


图3 2019年闽东沿海夏季POC分布

Fig. 3 The distribution of POC in the coast of eastern Fujian in summer of 2019

a. M01-M04 站位断面; b. M08-M05 站位断面; c. M09-M12 站位断面; d. M16-M13 站位断面; e. 表层
a. M01-M04 sections; b. M08-M05 sections; c. M09-M12 sections; d. M16-M13 sections; e. surface layer

布主要表现为近岸高于开阔大洋,此外,开阔大洋区域TEP的高值往往在表层,而本文研究中TEP高值出现在底层。这种差异产生可以有两种解释:(1)开阔大洋垂直水深远大于近岸水深,TEP从表层沉降至底层历时较长,故其被细菌等微生物分解的程度明显大于近岸,到达底层的TEP也就少于表层;(2)近岸底层水体扰动要比开阔大洋剧烈,来不及分解的TEP在近岸沉积后又被搅动至底层水体中,导致底层TEP含量增多。实际上,非所有海域TEP分布模型都如此,TEP的分布必须要视当地环境进行具体分析。

4.2 夏季闽东沿海TEP含量变化的驱动因素

盐度、浊度和营养盐变化作为生物的选择驱动力影响着浮游植物的时空演替^[38],而浮游植物分泌的胞

外多糖是TEP的主要来源之一^[6],因此,TEP也会受到盐度、浊度和营养盐的间接影响。同时,TEP通过其前体的非生物形成也主要受环境条件^[6]影响,例如湍流混合、离子作用和无机胶体的浓度,而这些前体的类型和浓度往往取决于浮游植物本身。由此可见,TEP一般与浮游植物直接关联,与盐度、浊度、营养盐等环境因素有良好的相关性。但本文图6a结果显示,TEP仅与浊度和各项营养盐有良好的相关性,与Chl a的相关性不佳,说明TEP与Chl a之间的联系可能受其他因素影响而被打破。

研究表明,酸性多糖的生产速率或者藻类适应能力存在差异,TEP含量的峰值相对于TEP生产者的峰值会具有时滞效应^[38],即在浮游植物开始衰退阶段,TEP会大量产生。根据营养盐数据(表1),此时硅酸

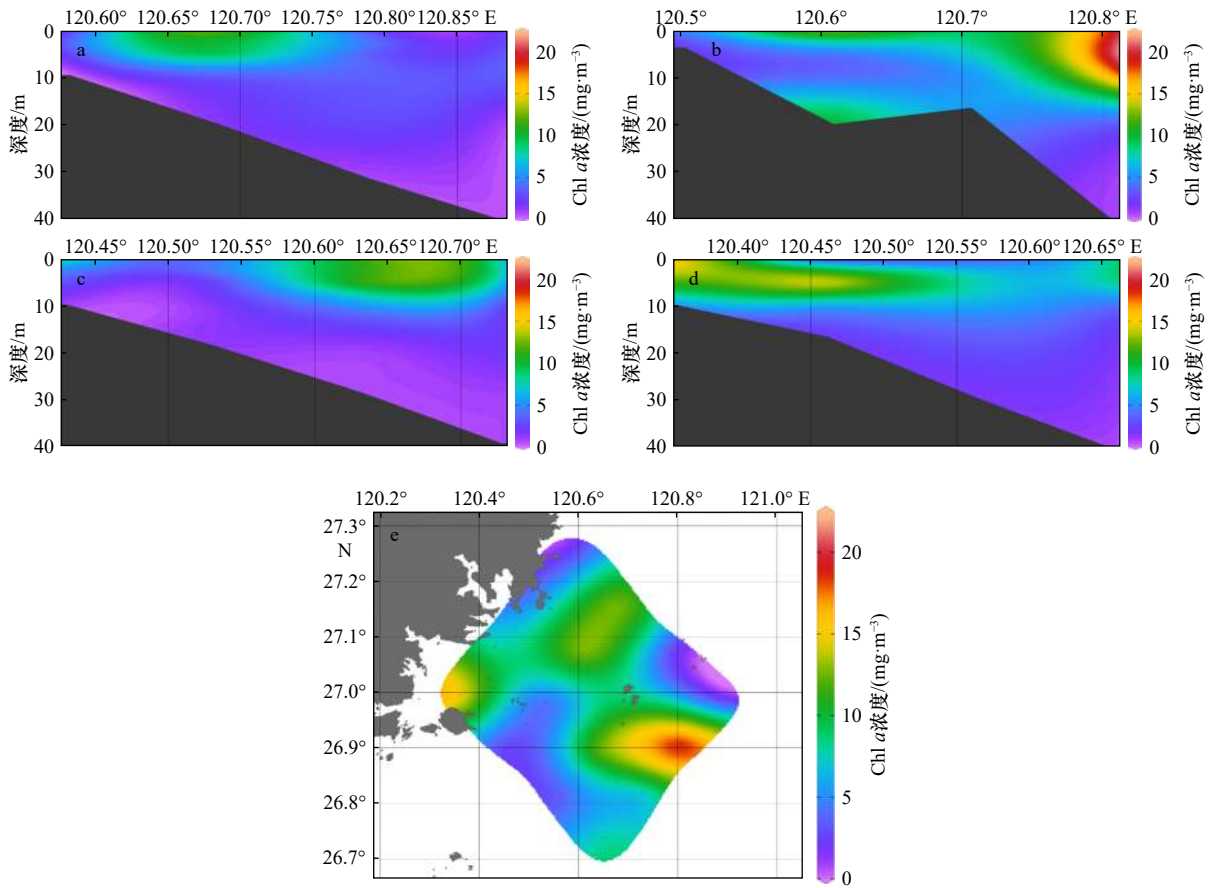


图4 2019年闽东沿海夏季Chl a浓度分布

Fig. 4 The distribution of Chl a concentration in the coast of eastern Fujian in summer of 2019

a. M01-M04 站位断面; b. M08-M05 站位断面; c. M09-M12 站位断面; d. M16-M13 站位断面; e. 表层
 a. M01-M04 sections; b. M08-M05 sections; c. M09-M12 sections; d. M16-M13 sections; e. surface layer

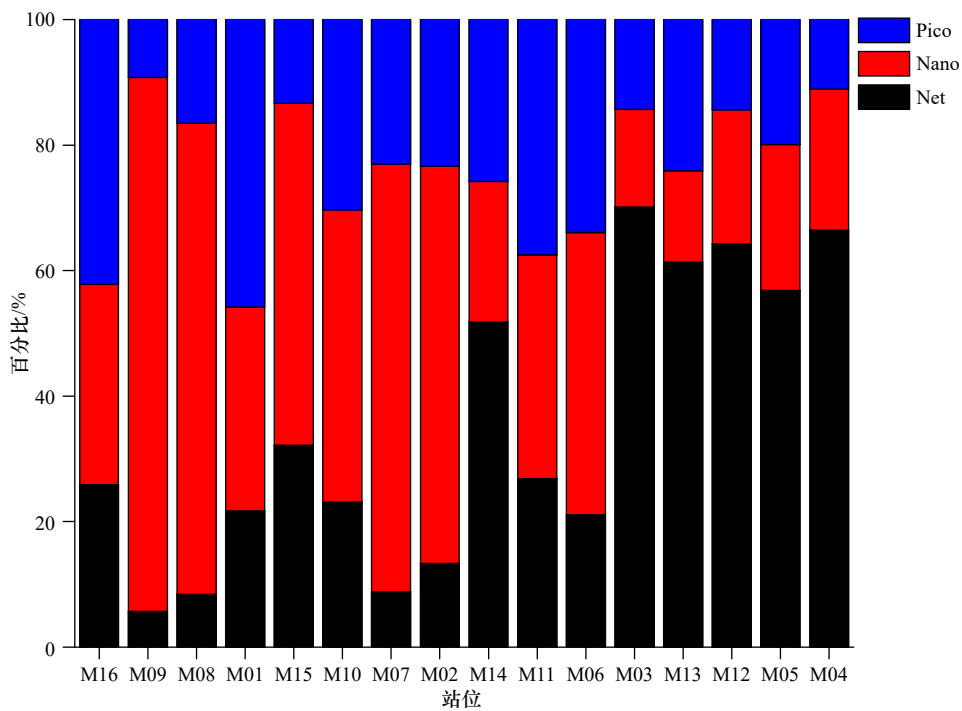


图5 闽东沿海叶绿素 a 粒径相对组成结构

Fig. 5 Size fractions of Chl a in the coast of eastern Fujian

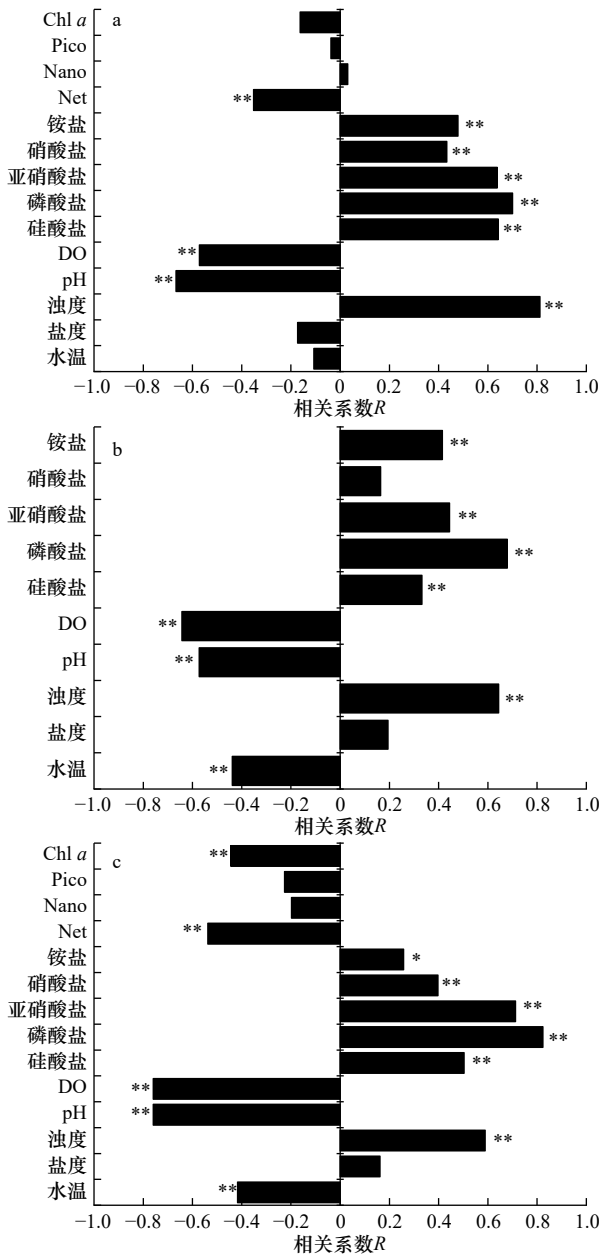


图 6 闽东沿海各参数的相关性

Fig. 6 Correlation of various parameters along the the coast of eastern Fujian

a. TEP 与各参数的相关性; b. TEP 含量/Chl *a* 浓度与各参数的相关性; c. TEP 对 POC 的贡献率与各参数的相关性; *表示 $p < 0.05$,

**表示 $p < 0.01$

a. Correlation between TEP and various parameters; b. correlation between TEP content/Chl *a* concentration and various parameters; c. correlation between the contribution rate of TEP to POC and various parameters;

* represents $p < 0.05$, ** represents $p < 0.01$

盐、磷酸盐等营养盐浓度仍处于浮游植物生长的最低阈值之上,说明海域受营养盐限制的可能性较小。计算得到的溶解氧饱和度整体上小于 100%,即溶解氧在调查期间处于不饱和状态,说明海域此时的生物

呼吸作用大于光合作用。遥感数据(图 7)显示,曲线的峰值代表藻华暴发的最高值,峰值左侧则表示藻华处于暴发阶段,右侧则表示藻华开始进入衰退阶段,因此调查期间该海域近岸表层水体(除 M15 站位)处于藻华暴发之后的衰退阶段,仅 M04、M05、M12 和 M13 站位所处的远岸水体处于藻华暴发阶段。本文图 6a 结果显示,TEP 含量分别与 DO 浓度和 pH 呈负相关($R = -0.572, p < 0.01$; $R = -0.667, p < 0.01$),表明海域浮游植物整体趋向于衰退阶段,此时浮游植物的分解和代谢活动远大于光合作用,从而导致海域溶解氧处于不饱和状态。伴随着 DO 的减少和 CO_2 的增加, pH 降低,TEP 也因浮游植物衰老死亡而大量产生。

此外,TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度的比值能间接反映浮游植物生长状况与周围环境因素的关系^[39],因此,在营养盐受限制的区域或者是浮游植物处于衰退期,其比值往往会升高。本文通过计算其比值发现,近岸比值比远岸要高,且最高值出现在 M01 站位附近。结合图 6b 来看,TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度的比值与浊度和各项营养盐浓度(除硝酸盐外)呈正相关,与 DO 浓度和 pH 呈负相关,其结果与图 6a 中一致,这便证明海域此时营养盐浓度并非限制因素,海域 TEP 的大量形成与浮游植物衰退有关。浮游植物在近岸达到衰退阶段,同时受浊度等因素影响,释放大量的 TEP,此时叶绿素 *a* 的浓度已经降低,因此 TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度的比值在近岸较高。而随着离岸距离增加,浮游植物生长状态发生变化,远岸仍处于生长阶段,此时的比值较近岸低。造成其比值南北差异的原因有可能是因为南部海域浮游植物已经过了生长衰退期,又开始新的生长期阶段,之前累积的 TEP 大部分已经沉降和降解。至于 TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度的比值与水温呈现负相关的结果,本文认为,这可能与底层生物有关。随着深度增加,水温逐渐降低,相对于浮游植物,底层环境更适合一些微型底栖生物等生长。Wolfstein 等^[40]利用潮间带数据估算出了微型底栖生物在胞外聚合物(包含 TEP)中的贡献,其释放的碳含量可达 70% 左右。此外,高含量的碎屑物质和异养细菌^[41]能够产生 TEP,并通过 TEP 的黏性聚集沉降至底层。说明微型底栖生物及一些异养细菌也可能会影响 TEP 的形成,从而导致 TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度的比值增大。由于本研究缺少底栖生物与细菌的有关鉴定信息,因此底栖生物及异养细菌对底层 TEP 的贡献比例仍待进一步研究。

浊度往往反映海域颗粒再悬浮作用的影响,当悬浮颗粒物含量达到一定水平,光线透过水体受阻,从

表2 世界不同海域 TEP 含量分布
Table 2 Summary of TEP contents around the world

海域	季节	采样层次	TEP含量/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	TEP含量/Chl <i>a</i> 浓度	文献
加州圣巴巴拉海峡	春	0~20 m	131~290	-	[36]
南极罗斯海	冬	0~150 m	0~2 800	89.1(均值)	[37]
大西洋东北部	夏	表层	≤ 124	49~104	[30]
南极半岛(南大洋)	春	0~200 m	0~48.9	40.9(均值)	[31]
日本Otsuchi海湾	春	0~15 m	24~2 321	125~144	[35]
以色列亚喀巴海湾	春	0~300 m	23~228	-	[32]
圣劳伦斯河口	夏、秋	0~320 m	15~1 548	-	[29]
Baie des Veys (英吉利海峡)	春、秋	表层	36.90~1 735.05	9.43~677.0	[34]
Lingreville-sur-mer(英吉利海峡)	春、秋	表层	26.45~3 604.52	8.81~1 239.13	[34]
印度多纳波拉湾	全年	3 m	1.3~149.1	-	[33]
闽东沿海	夏	0~40 m	25.2~935.5	5.25~636.37	本文
珠江口	夏	0~30 m	85.0~1 234.9	3.9~467.4	[21]

注: -代表TEP含量/Chl *a*浓度的计算值在原文献中缺失。

而导致海域处于光限制环境^[5]。已有许多研究分别通过现场以及实验室培养证明,受环境胁迫的浮游植物产生的 TEP 要比健康的浮游植物产生的多^[35],并且由于 TEP 的黏性特征^[6,42],使其在伴随着由潮汐涨落导致的盐度梯度和湍流作用过程中,促进了悬浮颗粒物质的聚集和沉降,反过来影响河口悬浮颗粒的动态分布^[5]。在沉降管实验^[43]中也发现,TEP 富集与沉降颗粒物的比例呈正相关,使得悬浮颗粒物聚集的高浊度水体往往是 TEP 的高值区。本文图 6a 显示,TEP 含量与浊度具有良好的正相关性,且其相关性($R=0.812$, $p<0.01$)较其他参数而言最大,由此可见,海域 TEP 分布主要受颗粒再悬浮作用影响。颗粒物再悬浮作用不仅扰动水体导致营养盐的增加,同时也遮蔽光线抑制了浮游植物的生长,而且水体混合促进了 TEP 的形成。因此,相比于开阔大洋的主控因素为浮游植物,影响本研究海域 TEP 分布的主控因素为颗粒物再悬浮作用,TEP 与浮游植物之间的直接联系受其影响而改变。其他研究中报道的 TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度相关性较弱的地区大多为贫营养海域^[33],本文调查海域 TEP 含量与叶绿素 *a* 浓度之间的相关性并非营养盐造成,而是浮游植物生长衰退后释放的 TEP 受再悬浮作用等水动力因素造成。

4.3 闽东沿海 TEP 含量变化与浮游植物粒径的关系

图 6a 结果显示,TEP 含量与 Net 粒径级别的小型浮游生物量整体上呈负相关关系($R=-0.352$, $p<0.01$),

表明随着海域中小型浮游生物整体上处于生长衰退阶段,Chl *a* 浓度降低但生物释放的 TEP 含量增加。通过图 5 的叶绿素 *a* 粒径组分分析,我们发现,近岸海域以微型浮游生物为主,远岸以小型浮游生物为主要优势种。闽东沿岸夏季硅藻类在种类和数量上均占主导地位,且优势种主要是中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)和柔弱伪菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)等^[25],而这些硅藻类主要为 Net 级的小型浮游植物。结合遥感数据(图 7)结果推测,闽东海域近岸可能经历了小型浮游生物向微型浮游生物转变的过程,而远岸正处于小型浮游生物旺发阶段。这些小型浮游生物以上述的硅藻为主,因此近岸海域的硅藻在衰退阶段释放的 TEP 会比远岸要高。

此外,近岸海域浮游生物尺寸发生变化可能受到再悬浮作用的影响。有研究发现,在浊度较大的水层中经常观察到一系列适应弱光的浮游植物种类^[44],这类浮游植物种类往往体积较小,比表面积较大。其能够在高度混浊的环境中生长,通过降低暗呼吸速率,增加附属色素和叶绿素 *a* 细胞含量来提高它们光合利用的效率^[44]。而且河口的高度垂直混合和再悬浮条件增加了水体中的营养盐供给^[45],也为这些适合低光照条件的类群提供生长环境,形成竞争优势^[46],因此其常出现在河口等浑浊系统中。闽东海域硅藻作为主要的优势种群,虽然其主要属于小型浮游生物,

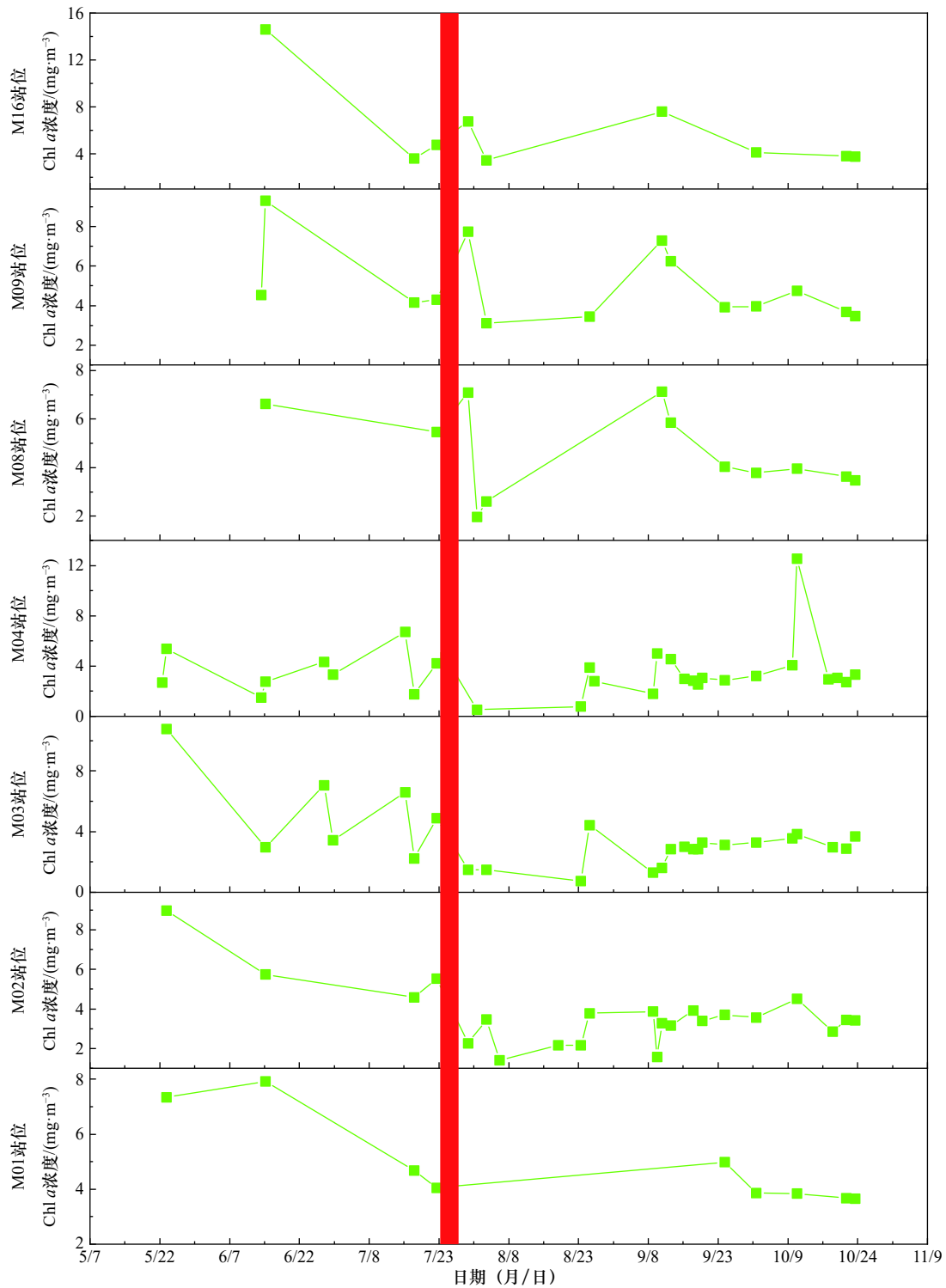


图 7 闽东沿海遥感 Chl a 浓度数据

Fig. 7 Remote sensing data of of Chl a concentration in the coast of eastern Fujian

红粗线表示调查的时间段(2019年7月24-27日); M01 站位为藻华后期, M04 站位为藻华时期; M01-M04 站位代表近岸到远岸的变化趋势;

M01、M08、M09 和 M16 站位代表近岸从北向南变化趋势

The red bold line represents the time period of the survey(July 24-27, 2019); Station M01 is in the later period of algal blooms, and M04 is in the period of algal blooms; the M01-M04 stations represent the changes from near-shore to far-shore; the stations M01, M08, M09, and M16 represent the changes of

near-shore from north to south

但在海域中常常会有微型以及微微型级别的浮游生物存在(图 5 中 Pico、Nano 粒径的浮游生物仍有一定

占比), 因此其在一定程度上证明了海域再悬浮作用的影响。由于目前仍然缺乏浮游植物尺寸对其 TEP

生产能力差异的研究,因此对该海域不同尺寸浮游植物对 TEP 的贡献方面还需要更深入的研究。

4.4 闽东沿海 TEP 含量与 POC 的关系

在本文相关性数据分析中,TEP 含量与 POC 含量表现为正相关 ($R=0.573$, $p<0.05$),说明 TEP 与 POC 存在耦合关系。TEP 是多糖物质,其具有黏性特征,可以与其他颗粒有机质相结合,从而形成更大的颗粒有机质^[40],因此 TEP 在 POC 中往往会占有较大比例。通过换算,本研究中 TEP 对 POC 的贡献率为 9.8%~110.8%,平均为(44.8±101.7)%。考虑到本文 TEP 与 POC 过滤采用的膜截留效率存在差异^[27](孔径分别为 0.4 μm 和 0.7 μm),转换因子计算值偏高,同时 TEP 黏性作用聚集 POC,本文结果可能高估了 TEP 对 POC 贡献率。Malpezzi 等^[43]计算也发现,TEP 的平均碳含量占切萨皮克湾上游总 POC 测量值的 32%,最高可达 89%,本文结果与文献中描述的结论相近,也再次表明 TEP 对海水中 POC 的重要贡献。

POC 的来源途径分为陆源(陆地径流等输入)、海源(海洋生物生产)以及海底沉积物的再悬浮^[47]。由于本文的研究海域受陆地径流影响不明显,陆源对海域的影响相对较小,因此 POC 主要来源于海洋生物及其新陈代谢产物^[47]。浮游植物及其残骸作为 POC 的主要贡献者,受光照、营养盐和其他生物活动影响往往会导致 POC 含量分布发生变化。此外,沉积物中 POC 的再悬浮作为海洋 POC 的一个重要来源,其受风、海流和底栖生物扰动因素影响也会导致

POC 含量产生变化。本研究中 TEP 对 POC 的贡献率与 TEP 分布情况相近,这表明,影响 TEP 对 POC 贡献率的因素也可能与 TEP 分布的影响因素相似。从图 6c 的结果中,我们可以看到 TEP 对 POC 的贡献率与各参数的相关性与图 6a 的结果相近,说明海域此刻处于高营养环境,浮游植物(主要是 Net 粒径的小型浮游生物)在衰退阶段为水体提供了大量的 POC,而这当中很大一部分 POC 可能是由 TEP 在颗粒物再悬浮作用下形成。另外,我们发现,贡献率与水温出现负相关,这与 TEP 含量与 Chl *a* 浓度比值类似,表示底栖生物可能部分通过 TEP 的形式对 POC 有所贡献。

5 结论

综上所述,夏季闽东海域 TEP 分布具有较强的区域特性,表现为近岸高、远岸低,表层低、底层高的趋势。闽东沿海 TEP 含量与浊度、营养盐浓度等呈正相关,与 DO 浓度、pH 和小型浮游生物量呈负相关。近岸海域在调查期间处于藻类水华衰退阶段,TEP 在此时大量产生,而其分布主要受控于颗粒物再悬浮作用。相对于其他尺寸浮游植物,小型浮游生物可能对海域 TEP 的贡献最大。此外,TEP 对 POC 的贡献程度与 TEP 分布结果相近,这当中很大一部分 POC 可能是由 TEP 形成。浮游植物的生长及群落结构受季节变化的影响,因此,进一步了解闽东海域 TEP 的时空变化及产生机制需要我们开展长时间尺度的观测及研究。

参考文献:

- [1] Van der Maarel E. Ecotones and ecoclines are different[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1990, 1(1): 135-138.
- [2] Marinov I, Doney S C, Lima I D. Response of ocean phytoplankton community structure to climate change over the 21st century: partitioning the effects of nutrients, temperature and light[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7: 3941-3959.
- [3] Kaiser M J, Attrill M J, Jennings S, et al. *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [4] Porter E M, Bowman W D, Clark C M, et al. Interactive effects of anthropogenic nitrogen enrichment and climate change on terrestrial and aquatic biodiversity[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 114(1/3): 93-120.
- [5] Morelle J, Schapira M, Claquin P. Dynamics of phytoplankton productivity and exopolysaccharides (EPS and TEP) pools in the Seine Estuary (France, Normandy) over tidal cycles and over two contrasting seasons[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 131: 162-176.
- [6] Passow U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments[J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55(3/4): 287-333.
- [7] 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 Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(6): 1131-1140.
- [8] Passow U, Shipe R F, Murray A, et al. The origin of transparent exopolymer particles (TEP) and their role in the sedimentation of particulate matter[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(4): 327-346.
- [9] Bhaskar P V, Bhosle N B. Microbial extracellular polymeric substances in marine biogeochemical processes[J]. *Current Science*, 2005, 88(1): 45-53.
- [10] Mari X, Passow U, Migon C, et al. Transparent exopolymer particles: effects on carbon cycling in the ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 13-37.
- [11] Harlay J, Bodt C D, 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 Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(8): 1251–1265.
- [12] 孙军, 郭聪聪, 张桂成. 透明胞外聚合物碳运输新途径[J]. *海洋学报*, 2019, 41(8): 125–130.
Sun Jun, Guo Congcong, Zhang Guicheng. A new pathway for carbon transportation of transparent exopolymer particles[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(8): 125–130.
- [13] 孙军. 海洋中的凝集网与透明胞外聚合物[J]. *生态学报*, 2005, 25(5): 1191–1198.
Sun Jun. Transparent Exopolymer Particles (TEP) and aggregation web in marine environments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1191–1198.
- [14] Prieto L, Sommer F, Stibor H, et al. Effects of planktonic copepods on transparent exopolymeric particles (TEP) abundance and size spectra[J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, 23(5): 515–525.
- [15] Flood P R, Deibel D, Morris C C. Filtration of colloidal melanin from sea water by planktonic tunicates[J]. *Nature*, 1992, 355(6361): 630–632.
- [16] Discart V, Bilal M R, Vankelecom I F J. Critical evaluation of the determination methods for transparent exopolymer particles, agents of membrane fouling[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(2): 167–192.
- [17] Villacorte L O, Kennedy M D, Amy G L, et al. Measuring transparent exopolymer particles (TEP) as indicator of the (bio)fouling potential of RO feed water[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 5(1/3): 207–212.
- [18] Mari X, Rassoulzadegan F, Brussaard C P D, et al. Dynamics of transparent exopolymeric particles (TEP) production by *Phaeocystis globosa* under N- or P-limitation: a controlling factor of the retention/export balance[J]. *Harmful Algae*, 2005, 4(5): 895–914.
- [19] Fukao T, Kimoto K, Kotani Y. Production of transparent exopolymer particles by four diatom species[J]. *Fisheries Science*, 2010, 76(5): 755–760.
- [20] 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(S1): 38–42.
Peng Anguo, Huang Yipu. Study on TEP and its relationships with uranium, thorium, polonium isotopes in Jiulong estuary[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2007, 46(S1): 38–42.
- [21] 孙翠慈, 王友绍, 吴梅林, 等. 夏季珠江口透明胞外聚合物分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2011, 29(5): 81–87.
Sun Cuici, Wang Youshao, Wu Meilin, et al. Distribution of transparent exopolymer particles in the Pearl River Estuary in summer[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 29(5): 81–87.
- [22] 马丽丽, 陈敏, 郭劳动, 等. 北白令海透明胞外聚合颗粒物的含量与来源[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 81–90.
Ma Lili, Chen Min, Guo Laodong, et al. The content and source of transparent exopolymer particles in the Northern Bering Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5): 81–90.
- [23] 王翠, 郭晓峰, 方婧, 等. 闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(1): 1–8.
Wang Cui, Guo Xiaofeng, Fang Jing, et al. Characteristics of seasonal spatial expansion of Fujian and Zhejiang Coastal Current and their bay effects[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(1): 1–8.
- [24] 孙晓庆, 董树刚. 沙垵港春季浮游植物群落结构的初步研究[J]. *南方水产*, 2008, 4(3): 48–57.
Sun Xiaoqing, Dong Shugang. A preliminary study on phytoplankton community structure in Shacheng Harbour in spring season[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(3): 48–57.
- [25] 王雨, 林茂, 林更铭. 福建沿岸不同海区夏季浮游植物的组成与分布[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(4): 496–503.
Wang Yu, Lin Mao, Lin Gengming. Study on the composition and distribution of phytoplankton in different waters of coastal Fujian in summer[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2009, 28(4): 496–503.
- [26] Engel A, Passow U. Carbon and nitrogen content of transparent exopolymer particles (TEP) in relation to their Alcian Blue adsorption[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 219: 1–10.
- [27] Passow U, Alldredge A L. Aggregation of a diatom bloom in a mesocosm: the role of transparent exopolymer particles (TEP)[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1995, 42(1): 99–109.
- [28] Bittar T B, Passow U, Hamaraty L, et al. An updated method for the calibration of transparent exopolymer particle measurements[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2018, 16(10): 621–628.
- [29] Annane S, St-Amand L, Starr M, et al. Contribution of transparent exopolymeric particles (TEP) to estuarine particulate organic carbon pool[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 529: 17–34.
- [30] Engel A. Distribution of transparent exopolymer particles (TEP) in the northeast Atlantic Ocean and their potential significance for aggregation processes[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(1): 83–92.
- [31] Ortega-Retuerta E, Reche I, Pulido-Villena E, et al. Uncoupled distributions of transparent exopolymer particles (TEP) and dissolved carbohydrates in the Southern Ocean[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 115(1/2): 59–65.
- [32] Bar-Zeev E, Berman-Frank I, Stambler N, et al. Transparent exopolymer particles (TEP) link phytoplankton and bacterial production in the Gulf of Aqaba[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2009, 56(2/3): 217–225.
- [33] Bhaskar P V, Bhosle N B. Dynamics of transparent exopolymeric particles (TEP) and particle-associated carbohydrates in the Dona Paula bay, west coast of India[J]. *Journal of Earth System Science*, 2006, 115(4): 403–413.

- [34] Klein C, Claquin P, Pannard A, et al. Dynamics of soluble extracellular polymeric substances and transparent exopolymer particle pools in coastal ecosystems[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 427: 13–27.
- [35] 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.
- [36] Azetsu-Scott K, Passow U. Ascending marine particles: significance of transparent exopolymer particles (TEP) in the upper ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(3): 741–748.
- [37] Hong Ying, Smith W O, White A M. Studies on transparent exopolymer particles (TEP) produced in the Ross sea (Antarctica) and by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae)[J]. *Journal of Phycology*, 1997, 33(3): 368–376.
- [38] Morelle J, Schapira M, Françoise S, et al. Dynamics of exopolymeric carbon pools in relation with phytoplankton succession along the salinity gradient of a temperate estuary (France)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 209: 18–29.
- [39] Prieto L, Navarro G, Cózar 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.
- [40] Wolfstein K, De Brouwer J F C, Stal L J. Biochemical partitioning of photosynthetically fixed carbon by benthic diatoms during short-term incubations at different irradiances[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 245: 21–31.
- [41] Heip C H R, Goosen N K, Herman P M J, et al. Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries[J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1995, 33: 1–149.
- [42] Engel A. The role of transparent exopolymer particles (TEP) in the increase in apparent particle stickiness (α) during the decline of a diatom bloom[J]. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(3): 485–497.
- [43] Malpezzi M A, Sanford L P, Crump B C. Abundance and distribution of transparent exopolymer particles in the estuarine turbidity maximum of Chesapeake Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 486: 23–35.
- [44] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 673–687.
- [45] Kjørboe T. Turbulence, Phytoplankton Cell Size, and the Structure of Pelagic Food Webs[M]. London: Academic Press, 1993, 29: 1–72.
- [46] Hobson L A, McQuoid M R. Temporal variations among planktonic diatom assemblages in a turbulent environment of the southern Strait of Georgia, British Columbia, Canada[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 150: 263–274.
- [47] 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[J]. *海洋科学*, 2004, 28(5): 44–49.
Liu Zilin, Pan Jianming, Chen Zhongyuan. Contribution of phytoplankton standing stock for the particulate organic carbon in the Southern Ocean[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(5): 44–49.

Distribution patterns and influencing factors of transparent exopolymer particles (TEP) in the coast of eastern Fujian in summer

Xue Siyou¹, Hu Ji¹, Han Zhengbing¹, Cai Yuming¹, Liu Xiaoya¹, Feng Yubin¹,
Yu Peisong¹, Zhang Huijuan¹, Pan Jianming¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Transparent exopolymer particles (TEP) play an important role in the marine micro-food web and the marine carbon cycle. The distribution patterns and influencing factors of TEP in the coast of eastern Fujian in summer are investigated in this research. The results show that the contents of TEP (calculated with xanthan gum as the standard substance, the same below) in the coast of eastern Fujian ranged from 25.2 $\mu\text{g/L}$ to 935.5 $\mu\text{g/L}$, with an average value of $(201.8 \pm 177.9) \mu\text{g/L}$. The level of TEP is high in the near-shore and low in the far-shore, which in surface layer is lower than that in bottom layer. Correlation analysis shows that TEP in the research area are positively correlated with turbidity, silicate, phosphate, nitrite, nitrate and ammonium concentration, negatively correlated with pH, DO concentration and Net-level phytoplankton. The results of chlorophyll *a* fractions show that Net-level phytoplankton in the area may contribute more to TEP than other size phytoplankton. Comparing with phytoplank-

ton as the main controlling factor of TEP in the open ocean, TEP in the coast of eastern Fujian in summer are mainly produced by phytoplankton in the decline stage, and its distribution is mainly affected by the resuspension of particles. The results can not only further clarify the differences between the influencing factors of TEP in the coastal waters and the open ocean, but also supplement the gaps in the study of TEP distribution in different regions of coastal waters in China.

Key words: the coast of eastern Fujian; transparent exopolymer particles; phytoplankton; distribution characteristics; influencing factors