Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.01.005

2019年夏秋季温州近海海水透明胞外聚合颗粒物 (TEP)的分布及影响因素分析

薛思佑,胡佶,蔡昱明,于培松,冯毓彬,刘小涯,潘建明 (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)具有高黏性、低密度和高碳氮比等特性,在颗粒有机物的聚集以及食物网循环中发挥着重要作用。为了解近岸海域TEP的分布动力学规律与机制,本文对温州近海夏秋季节水体中透明胞外聚合颗粒物的分布进行调查,并结合多项环境要素的主成分分析与相关性分析,探究了浙江南部近岸海域TEP分布的影响因素。结果显示,温州近海TEP秋季平均含量明显高于夏季,夏季TEP分布变化主要受陆地径流(瓯江)作用影响,而秋季主要受闽浙沿岸流影响。受沿岸流影响,秋季TEP的主要来源可能是其他海域以及底层颗粒物再悬浮。此外,由浮游植物释放的TEP对夏季的POC贡献最大,而秋季外源性TEP对POC的贡献较夏季有所升高。
关键词:透明胞外聚合颗粒物;季节变化;沿岸流;温州近海中图分类号:P734.2+5
文章编号:1001-6932(2022)01-0039-11

Distribution and influencing factors of transparent exopolymer particles (TEP) in coastal waters of Wenzhou in the summer and autumn of 2019

XUE Siyou, HU Ji, CAI Yuming, YU Peisong, FENG Yubin, LIU Xiaoya, PAN Jianming (Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Transparent exopolymer particles (TEP) have the characteristics of high viscosity, low density and high carbon to nitrogen ratio, hence they are playing an important role in the aggregation of organic particles and even the circulation of marine food web. In order to understand the dynamics and mechanisms of TEP distribution, the TEP in summer and autumn in the coastal waters of Wenzhou was investigated. The influencing factors of TEP were explored using principal component analysis and correlation analysis. The results showed that the average TEP content in the coastal waters of Wenzhou in autumn was significantly higher than that in summer. The distribution of TEP in summer is mainly affected by the export of Oujiang River, while in autumn it is mainly affected by the coastal current of Fujian and Zhejiang Provinces. Affected by coastal currents, the main source of TEP in autumn may be brought from the adjacent areas and the resuspension from bottom. In addition, TEP released by phytoplankton contributes the most to POC in summer, while the portion of allochthonous TEP to POC in autumn is higher than that in summer.

Keywords: transparent exopolymer particles; seasonal changes; coastal currents; coastal waters of Wenzhou

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-09-27

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

作者简介: 薛思佑 (1994—), 硕士研究生。主要从事海洋生物地球化学研究。电子邮箱: 184839869@qq.com

通讯作者:胡佶,博士,副研究员。主要从事海洋生物地球化学研究。电子邮箱:huj@sio.org.cn

透明胞外聚合颗粒物(Transparent exopolymer particles, TEP)是海洋中大量存在的透明胶状多 糖物质^[1],具有低密度、高黏性、高碳氮比、负电 性等特性,在水生生态系统的颗粒聚集、沉积、 碳埋藏和物质转运等过程中起着重要作用^[2],对 整个海洋生态系统,尤其是海洋生物碳泵有着重 要贡献^[3-5]。

该物质最早在 20 世纪 70 年代被人们注意和描 述[6-8],然而当时由于受可视化与定量技术限制, 难以被显微镜直接观察。直到 Alldredge 等¹⁹和 Passow¹¹⁰提出了量化方法,其在海洋系统中的分布 状况才被逐渐揭示。现今 TEP 含量的测定主要 是利用阿尔新蓝(alcian blue)染色,用比色法测 定^[1,9]。研究表明:不同海域中 TEP 的含量存在一 定的差异,例如大西洋东北部^四、南大洋^四等开阔 大洋海域的 TEP 含量往往会小于圣劳伦斯河口¹¹³、 日本 Otsuchi 海湾^[14]、珠江口^[15]等近岸海域。近岸 海域由于环境复杂多变,其不同海域 TEP 含量在 时间和空间尺度上均存在差异,例如长江口处夏 季的 TEP 含量要高于春、秋季节^[16]; 英吉利海峡的 Lingreville-surmer 区域的平均 TEP 含量要比 Baie des Veys 区域高一倍左右[17]。TEP 属于有机碳的一 类,其在近岸海域的来源、迁移和转化受多种因素 影响,因此研究 TEP 对于理解近岸海域的有机碳 输运及分布具有重要意义。

天然水体中的 TEP 主要来自生物释放^{[11}和 TEP 前体物质转化^{118]}。海洋中的 TEP 主要来自于浮游植物 [1^{9]},例如硅藻能释放大量的 TEP ^{120]}。并且TEP 在浮游植物的生长、稳定和衰老阶段都有产生^[21]。 TEP 作为浮游植物释放的胞外多糖之一,含量变化 受浮游植物分布影响。而盐度和营养盐变化往往 影响着浮游植物的时空演替^[22],因此,TEP 也会受 到水体盐度和营养盐的间接影响。此外,浮游植 物释放的 TEP 前体对 TEP 形成的贡献占有很大比 重^[23-24]。这些前体物质的丰度和性质不仅受中上层 群落的组成影响,而且还受个体生物的生理状态影 响^[10]。由此可见,在不同的浮游植物群落结构、个 体生理状态和环境生长条件(营养盐、盐度等)影 响下,TEP 的时空分布会存在差异。

近岸海域作为陆地与海洋的交界处,受到各种物理、化学和生物因素的影响,海域 TEP 的动态分布十分复杂¹¹⁶。在以往文献中,海域 TEP 与叶绿

http://hytb.nmdis.org.cn

素 a浓度呈正相关^[12,25-26],这是因为 TEP 主要由浮 游植物释放。然而在有些近岸海域系统中,TEP 与 叶绿素 a之间没有显著的相关性^[27-29],研究人员认 为这可能是由于浮游植物没有大量释放 TEP 物质或 者TEP 被迅速消耗、降解或输出。实际上,浮游 动物^[30]的捕食、细菌的分解^[3]和转化^[31]以及水体湍流 混合作用^[28]等因素都有可能影响 TEP 与叶绿素 a之 间的相关性。而且陆地径流以及沿岸流作用常常对 近岸海域水体中的元素分布和归趋产生巨大影响。 一般情况下,陆地径流将淡水和营养物质输送进海 洋中,会对近海的生态系统产生巨大影响^[32]。沿岸 流往往会给海域带来区别于原海域的水体环境,对 海域的物质输送和生态环境造成影响^[33]。因此,研 究陆地径流与沿岸流在 TEP 动态分布中的作用对 了解近岸海域 TEP 分布规律具有深刻的意义。

温州近海位于东海中部,属于亚热带海洋性季 风气候,受浙江沿岸水、黑潮次表层水和台湾暖流 等海流水团的共同影响^[34]。本文调查海域受黑潮次 表层水与台湾暖流影响较小^[35]。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^[36]。 而在夏季,闽浙沿岸流的影响范围主要分布于浙江 北部沿岸海域,对浙江南部和福建海域无明显影响。 并且海域内存在陆地径流——瓯江,瓯江为浙江 省第二大河,全长 375 km,具有大流量历时短、低 流量历时长的特点,最大洪峰流量可达 23 000 m³/s, 最小枯水流量仅 10.6 m³/s^[37]。由于温州近海属于典 型的受陆地径流与沿岸流作用的海域,且夏季和秋 季水体的环境动力学作用存在明显差异,故将该区 域作为本文研究的对象,以此探究近海 TEP 的分 布规律及机制。

1 采样方法

1.1 调查站位和采样水层

本研究以温州近海西南部 (27.4°N—28.1°N, 120.7°E—122.2°E) 作为研究区域,站位分布见图1。 采样时间分别为 2019 年 7 月 30 日至 8 月 2 日 (夏 季)和 2019 年 10 月 28 日至 10 月 31 日 (秋季), 两次调查采样站位一致。测量参数包括水温、盐 度、pH、溶解氧 (Dissolved Oxygen, DO)、浊度、 五项营养盐、叶绿素 *a* (Chlorophyll *a*, Chl *a*)、颗 粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 以及 TEP 含量。每个站位采样层均参照《海洋调查规范》(GB/T 12763.4)进行设置,包括表层(0 m)、5 m、10 m、20 m、30 m、50 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。



1.2 研究方法

1.2.1 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。DO、pH、五项营养盐样品测定参照 《海洋调查规范》(GB/T 12763.4),其中 DO 检出 限为 0.2 mg/L, pH 精度为±0.01,营养盐检出限为 0.02 μmol/L。分析过程中所用标准溶液均为自然资 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。

1.2.2 POC 的采集与测定 量取 0.3~0.5 L 海水, 用 450 ℃灼烧过的 GF/F 玻璃纤维膜过滤,滤膜于 -20 ℃下冷冻保存并带回实验室测定分析。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 ℃条件下烘干,用总有机碳 分析仪(TOC-L+SSM-5000A)测定样品(检出限: 4 μg/L)。

 1.2.3 Chl a 测定 水样 50 mL 通过 GF/F 滤膜过 滤,使用 Trilogy 荧光计分析测量 Chl a,测定依据 参考《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》 (GB/T 12763.6—2007),检出限为 0.5 μg/L。海表 遥感 Chl a 数据则是利用海洋遥感在线分析平台 (SatCO2-Pro.V1.0, www.SatCO2.com)获取。

1.2.4 TEP 测定 TEP 的测定方法主要参考 Passow 等^[38]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 人 500 μL 质量分数为 0.02%的阿尔新蓝 (8 GX, pH = 2.5, Sigma) 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,检 出限为 0.02 μmol/L。测定的吸光值以改进的黄原 胶 (Xanthan gum)标定方法进行校准^[39],最终结 果以 μg Xeq/L 表示。需要注意的是,阿尔新蓝染 色剂存放时间过长会出现沉淀颗粒等变化,因此在 每次调查期间需现场配制整个航次的染色剂用量, 并分别对其进行校准。最后通过分析计算得到标准 曲线。

1.2.5 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。

2 结果分析

2.1 各项基本参数

表1汇总了温州近海两个季节各项参数整体的 平均结果。相比于夏季,秋季温州近海的温度、盐 度、铵盐和 Chl a 较低。pH 在两个季节变化不大。 而海域中 DO、浊度、硅酸盐、磷酸盐、亚硝酸 盐、硝酸盐、POC 以及 TEP 秋季要比夏季高,且 秋季浊度、TEP 和 POC 是夏季的 3 倍左右。

2.2 温盐、TEP 及 Chl a 分布

2.2.1 温盐分布 夏季(图2),温州近海表层 水温较高且变化差异较小, 10 m 层的水温近岸较 远岸低,底层水温呈现近岸向远岸降低的分布趋 势。表层盐度在靠近瓯江径流处最低,并且随离岸 距离的增加而逐渐增大,远岸盐度变化不明显。 10 m 层盐度差异较小,分布均匀。底层盐度与表 层盐度分布相近。由此可见夏季温州近海水体分层 明显,并且瓯江淡水的输入对海域近岸造成了一定 程度的影响。而在秋季(图 3),海域表层、10 m 层和底层的水温基本上都呈现近岸低, 远岸高的分 布趋势(除 WT23 站位的底层外),盐度同样呈现 近岸低,远岸高的趋势。闽浙沿岸流的特性为低 温、低盐和高营养盐,由此表明温州近海在秋季受 闽浙沿岸流影响较为明显,水体混合显著。

41

41 卷

表1 夏秋季温州近海近岸各项参数均值汇总

| 参数 | 夏季 | 秋季 |
|------------------------------|---------------------|---------------------|
| 温度/℃ | 26.33(±2.49,75) | 22.67(±0.93,74) |
| 盐度 | 33.16(±1.73,75) | 30.55(±2.81,74) |
| pН | 8.09(±0.09,75) | $8.05(\pm 0.05,74)$ |
| $DO/mg \cdot L^{-1}$ | $5.97(\pm 1.06,75)$ | 7.32(±0.27,74) |
| 浊度/NTU | 21.97(±31.44,75) | 66.14(±125.56,74) |
| 硅酸盐/μmol・L⁻¹ | 7.36(±8.30,75) | 23.55(±20.01,74) |
| 磷酸盐/µmol・L⁻¹ | $0.19(\pm 0.19,75)$ | $0.81(\pm 0.55,74)$ |
| 亚硝酸盐/μmol·L ⁻¹ | $0.42(\pm 0.49,75)$ | $0.95(\pm 0.70,74)$ |
| 硝酸盐/μmol・L ⁻¹ | 6.13(±5.82,75) | 16.80(±14.44,74) |
| 铵盐/μmol・L ⁻¹ | 0.68(±0.18,75) | $0.59(\pm 0.93,74)$ |
| $POC/mg \cdot L^{-1}$ | 0.17(±0.18,75) | $0.65(\pm 1.09,74)$ |
| TEP/µg Xeq·L ⁻¹ | 197.43(±272.01,69) | 618.49(±711.01,45) |
| Chl $a / \mu g \cdot L^{-1}$ | 1.85(±2.93,75) | $1.08(\pm 0.50,74)$ |
| | | |

注:括号内为(±SD,n),SD表示标准偏差,n代表样本数量。

温州近海夏季的 TEP 平

2.2.2 海域 TEP 分布

均含量为 197.4(±274.0,69)µg Xeq/L,秋季 TEP平均含量高于夏季,其值为 618.5(±719.0, 45)µg Xeq/L。根据图 2 和图 3 的分布结果,夏季表 层 TEP 含量在 WT05 站位最高,为 924.3 µg Xeq/L, TEP 分布表现为近岸高,远岸低的趋势。夏季底 层 TEP 含量在 WT06 站位附近达到最高,为 1166.5 µg Xeq/L⁻¹,且近岸处的 TEP 含量要比远岸 高。整体上看,底层 TEP 含量相对于表层更高, 10 m 层的 TEP 含量分布介于两者之间。秋季表层 TEP 的高值出现在 WT03 和 WT05 站位附近,为 1296.3 µg Xeq/L,海域 TEP 分布呈近岸高远岸低的 趋势。秋季底层的 TEP 高值则是在 WT06 站位附 近,为 1374.7 µg Xeq/L,秋季 10 m 层以及底层的 TEP 分布与表层相似,均表现为近岸高远岸低。

2.2.3 Chl a 分布 夏季 Chl a 的平均浓度为 1.85
(±2.93, 75) μg/L。其分布如图 2、图 3 所示,表





层、10 m 层和底层的 Chl a 分布趋势基本一致,呈现从近岸向远岸逐渐减小的趋势,靠近瓯江处 Chl a 含量最高。夏季 Chl a 含量的变化趋势与夏季 TEP 分布趋势相近。秋季 Chl a 的平均浓度为 1.08 (±0.50,74) μg/L,含量要小于夏季。秋季 Chl a 含量的分布变化幅度较夏季不明显,最高值出现在站位 WT01 的底层处,且南部海域含量要高于北部

海域。

2.2.4 Chl a 遥感数据分析 为了能更好地反映 海域 Chl a 所代表的浮游植物总量的动态变化,本 文结合遥感数据对其进行分析,如图 4 所示。根据 遥感 Chl a 分布时序图可知,调查海域在 7 月份 (2019/7/1—2019/7/28)处于藻华阶段。至本文调 查的夏季时期(2019/7/28—2019/8/2),浮游植物



注:其中, a、b、c 为夏季采样航次之前; c、d、e、f 为夏季航次采样期间; g、h、i、j、k、l、m、n 为夏季采样之后, 秋季采样航次之前; n、o、p 为秋季采样航次期间; 变化范围: 0~10 μg·L⁻¹

43

http://hytb.nmdis.org.cn

1期





逐渐衰退。浮游植物在 8 月份基本处于衰退后期, 直到 9 月上旬(2019/8/28—2019/9/10)才出现又 一次藻华。而到了 9 月下旬以及调查的秋季时期 (2019/10/28—2019/10/31),海域的浮游植物基本 不再出现大范围的藻华现象,其整体处于衰退稳定 阶段。

2.3 各参数主成分分析

由于本研究涉及两个季节的变化,为了能够说 明季节变化下主控因素存在差异,本文对温州近海 的不同季节进行了主成分分析 (PCA),结果如图 5 所示。

夏季 PCA 结果显示, 浊度、TEP、POC、硝酸盐、硅酸盐和 Chl a 在 PC1 上有较高正载荷, 对整体的贡献率为 44.5%; 水温、DO 和 pH 在 PC2 上有较高正载荷, 盐度、磷酸盐 和亚硝酸盐在 PC2 上有较高负载荷, 其贡献率为 27.0%。秋季结果显示, TEP、浊度、POC、DO、硅酸盐、磷酸盐和硝酸盐在 PC1 上有较高正载荷, 亚硝酸盐、盐度、水温、pH 在 PC1 上有较高负载荷, 其对整体的贡献率达 66.7%; Chl a 在 PC2 上有较高负载荷, 其对整体的贡献率为 11.5%。

2.4 TEP 与各参数的相关性

表 2 汇总了 TEP 与各参数之间的相关性。在 夏季温州近海中, TEP 与盐度、pH 和 DO 呈显著 负相关,与浊度、硅酸盐、磷酸盐、亚硝酸盐、硝 酸盐、Chl a 和 POC 呈显著正相关。与夏季相比较 而言,秋季 TEP 与水温出现显著的负相关性,DO 从显著负相关变为显著正相关,亚硝酸盐从正相关 变为负相关,Chl a 与 TEP 不再相关。

http://hytb.nmdis.org.cn

表 2 TEP 与各参数之间的相关性

| 参数 | 夏季 | 秋季 |
|-------------|-------------|----------|
| 水温 | -0.023 | -0.537** |
| 盐度 | -0.442** | -0.843** |
| 浊度 | 0.910** | 0.776** |
| $_{\rm pH}$ | -0.422** | -0.831** |
| DO | -0.489** | 0.598** |
| 硅酸盐 | 0.645** | 0.848** |
| 磷酸盐 | 0.341** | 0.844*** |
| 亚硝酸盐 | 0.278^{*} | -0.738** |
| 硝酸盐 | 0.507** | 0.843** |
| 铵盐 | 0.161 | -0.022 |
| Chl a | 0.687** | 0.162 |
| POC | 0.941** | 0.771** |
| | | |

注:相关性的显著水平:*, P<0.05 (双尾); **, P<0.01 (双 尾)

3 讨论

3.1 TEP 与 Chl a 的关系

本文的研究结果显示,调查海域 TEP 与 Chl a 之间的相关性存在季节性差异。夏季 TEP 与 Chl a 呈正相关(*R* = 0.687, *p* < 0.01),秋季 TEP 与 Chl a 不相关(*R* = 0.162, *p* > 0.05)。而通过图 4 的 Chl a 遥感数据结果可以发现,夏季浮游植物处于衰退阶 段,秋季浮游植物早已处于衰退阶段后期。由此可 见,夏季 TEP 主要来自浮游植物细胞衰退死亡后 释放^[12,16,25,40]。而在秋季,海域现存浮游植物对 TEP 的贡献减少,此时 TEP 的分布可能受到其他因素 影响。

3.2 夏、秋季节 TEP 的分布差异分析

在本次调查研究中,秋季的 TEP 平均含量是 夏季的3倍多。然而秋季的浮游植物生物量却低于 夏季,由季节变化引发的这种水体浮游植物存量与 TEP 分布非耦合现象需要对其机制做进一步的分析 讨论。

3.2.1 夏季 本文研究海域属于典型的河口近 岸,并且存在明显的陆地径流输入——瓯江。在 夏季,温州近海汛期持续时间长,瓯江下泄流量 大四,淡水输入充沛。河口位于陆地与海洋的交界 处,接受了大量的淡水与营养的输入[42-43],往往维 持了不成比例的高生物生产力。此时河口处盐度相 较于远岸海域较低,但营养盐含量相对较高,浮游 植物生长也较为旺盛。而且由于淡水的输入,近岸 处水体混合作用相对于远岸要强,同时伴随着大 量的悬浮颗粒物进入河口,浊度也随之升高。因此, 图 5(a)中 PC1 的结果可以表征为温州近海的淡水 输入作用。此外,夏季太阳辐射较强,表层水温较 高,较强的光照在促进浮游植物生长的同时,也消 耗了表层的营养盐物质,随后浮游植物光合作用加 强, 增加了表层 DO 含量。然而层化作用阻碍了不 同水层之间的物质交换,底层水体分解有机物时无 法交换表层的溶解氧,从而使得底层 DO 偏低,营 养盐偏高。因此,图 5(a)的 PC2结果主要表征为水 体层化作用的影响。

结合图 5(a)的主成分贡献率和表 2 中夏季的 相关性分析结果,夏季调查海域 TEP 分布差异主 要受瓯江淡水输入影响,水体层化作用次之。淡水 的输入为海域浮游植物生长创造了条件,于是在调 查期间浮游植物释放大量的 TEP, 从而使得 TEP 呈现近岸河口高于远岸海域的分布趋势,该结果在 表层水体中表现最为明显。但在水体层化作用的影 响下,下层水体浮游植物含量减少,因此10m层 的 TEP 含量相对表层要少。底层一方面受层化作 用影响,来自上层的 TEP 含量有所减少,另一方面 又受到水体扰动作用影响,使其之前埋藏的 TEP 又重新回到底层水体中,导致底层 TEP 含量增加。 从 TEP 的分布结果来看,底层受后者影响更大。 本文认为底层 TEP 含量高于表层是由于底层浊度 变化造成。浊度反映了颗粒物再悬浮作用对水体的 影响,较高的颗粒物含量能够增加 TEP 前体物质 与其他颗粒物在水体中的碰撞概率[49],从而促进 TEP 的形成^[45]。调查海域底层靠近近岸河口处浊度 较高,本研究发现其 TEP 含量同样较高。然而, 有研究表明淡水中往往也含有 TEP 及前体物质^[26], 海域的 TEP 也可能部分来自淡水的直接输入。如 何区别浮游植物释放的 TEP 与淡水直接输入的 TEP 仍是未来需要深入探究的一个问题。

3.2.2 秋季 随着季节转变,闽浙沿岸流对温州 近海的影响逐渐加强^[30]。在沿岸流作用下,水体混 合作用加强,DO含量较高,而水温、盐度均低于 夏季,硅酸盐、磷酸盐等营养盐大体上要比夏季 高。图 5(b)的 PCA 结果显示,各项营养盐(除铵 盐外)、水温、盐度、浊度、DO 和 TEP 等均在 PC1 上占有较大比例,说明 PC1 主要表征为闽浙 沿岸流的影响。PC2 中以 Chl *a* 为主,因此 PC2 在 秋季可以表征为浮游生物的影响。

综合图 5(b)的主成分贡献率和秋季的相关性 结果(表2),海域此时的 TEP 分布主要受闽浙沿 岸流的影响,浮游生物的影响次之。在相关性分析 结果中,秋季海域的 TEP 与 Chl a 不相关,说明秋 季温州近海浮游生物并没有产生大量 TEP 及前体 物质,或者已有的 TEP 已被消耗、降解和输出^[16,27]。 遥感 Chl a 数据也显示秋季海域浮游植物已处于藻 华衰退后的稳定阶段,并持续了较长时间。而且瓯 江在秋季处于枯水期^[46],淡水输入没有夏季来得充 沛,此时海域初级生产力远没有夏季高,浮游生物 影响相对较弱。因此温州近海无论是浮游生物释放 还是其细胞衰退死亡后分泌的 TEP 含量理论上均 应小于夏季。然而实际上该海域秋季 TEP 含量远 高于夏季,这表明此时该海域的 TEP 很可能存在 其他来源。

国浙沿岸流起源于长江口与杭州湾一带,由长 江和钱塘江的径流入海后与海水混合形成^[36],途经 台州等地所在的鱼山海域,随后流经温州近海。这 种低温、低盐和高营养盐特性的沿岸流会给近海海 域海洋生物的繁殖提供有利条件。长江口在过去几 十年间富营养化程度普遍较高^[47],海域浮游植物生 物量高,硅藻和甲藻水华频繁可见^[48],且海域浮游 动物以桡足类为主^[49]。此外,鱼山海域的浮游植物 夏季以旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)为主, 秋季以中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为主^[50], 同时椒江径流对该海域存在明显影响^[51],浮游植物 生产力较高。这些生物作为 TEP 及其前体物质的 主要来源^[52],往往会提供大量的 TEP 及其前体物质。 闽浙沿岸流在夏季对温州近海的影响较小,其 影响范围主要集中在长江口、杭州湾和浙江北部沿 岸海域,因此在长江口和鱼山海域的 TEP 及前体 物质除了一部分被浮游动物捕食^[30,53],细菌降解^[10,31] 之外,还有部分会被沉降埋藏保留。这些埋藏保 留的 TEP 组分可能更不易被降解,富含甘露糖和 半乳糖的多糖易被优先降解^[54],而富含岩藻糖的部 分^[55]可能对降解更有抵抗力;不同多糖的原位水 解实验也表明,硫化多糖(如岩藻聚糖)是 TEP 的重要成分,其水解速率相对较低^[56],且能在底层 保留较长时间。这些高分子多糖类物质的周转时间 可长达数周^[57-58]。

当到了秋季, 闽浙沿岸流便可能携带着流经长 江口等海域新产生的以及埋藏的 TEP 及前体物质 输送到温州近海。秋季的浊度高于夏季, 说明秋季 海域的水体扰动比夏季剧烈, 这也大大促进了 TEP 前体物质通过物理化学过程, 如凝聚、凝胶等非生 物过程形成 TEP^[28]。因此, 秋季TEP 的分布呈现近 岸高于远岸的趋势。而且由于水体混合作用加强, 各水层的 TEP 分布变化趋于一致, 仅在个别站位 附近出现了 TEP 高值区。底层相对于表层和 10 m 层具有更强的水体扰动作用, 且在 Chl *a* 分布图 中, 底层 Chl *a* 含量在站位 WT01 处出现了相对于 上层水体更高的浓度。故底层的 TEP 含量高于上 层水体, 且影响范围更广。

3.3 TEP 对 POC 贡献的季节差异

TEP 对 POC 的贡献占有较大的比重[43,59-60]。例 如 Malpezzi 等(2013)发现,切萨皮克湾的 TEP-C 可能占全部 POC 的 32%^[43]。Sun 等在中国珠江口的 研究显示, TEP-C可能占总 POC 的 15%^[61]。 Beauvais 等计算地中海不同营养水平海水环境中 TEP 对有机碳通量的贡献发现, TEP-C 最高可占 总有机碳含量的 22%^[62]。目前对于TEP-C 的换算主 要来自 Engel 等的浓度关系,其转换因子 f 的范围为 0.53~0.88 µg C/(µg Xeq)^[63]。但实际上, TEP 中的 碳含量会因物种而异^[64],使用该转换因子对于估算 不同浮游植物群中的 TEP-C 可能存在一定偏差。 在其他文献中 f = 0.53 μg C/(μg Xeq) 这一转换因 子常作为与其他海域比较的数值[16,64],因此本文利 用该转换因子计算得到,夏秋季节 TEP-C的平均值 分别为 117.21 µg C/L 和 327.80 µg C/L, 分别占 POC 的 42.2%和 41.9%。对比其他文献资料结果发 现,夏季温州近海的 TEP-C 结果在 Engel 等^[11]和 Mari^[52]的报告值范围内,而秋季结果高于该值。秋 季 TEP-C 与 Guo 等^[16]测定的长江口夏季结果相近。 这进一步支持了本文提出的假设,即长江口等地区 大量形成的 TEP 可能在秋季于闽浙沿岸流作用下 运输到温州近海,从而导致温州近海秋季 TEP 含 量高于夏季。

TEP-C/POC 比值结果表明两个季节的 TEP 对 POC 均有较大贡献。从图 6 的 TEP-C/POC 比值分 布结果来看,夏季的比值表现为表层低、底层高的 分布趋势。结合图 2、图 3 的结果以及夏季海域的 主成分分析不难发现,夏季表层由于瓯江淡水输入, Chl a 含量较高,此时由浮游植物产生的 POC 含量 较高。随着水深增加,浮游植物减少,但水体扰动 增强,悬浮颗粒物含量增加,此时POC 含量主要 由沉降的 TEP 贡献。而秋季由于闽浙沿岸流的影 响,水体上下扰动作用较强,颗粒混合含量较高且 较夏季均匀,因此各个水层的 TEP 对 POC 的贡献 整体更高,且比值分布范围较夏季更广。该结果再 次证明了 TEP 对 POC 具有重要贡献,且贡献程度 与海域水体混合作用以及生物因素有很大关系。

此外,有研究报道,海水中存在许多浮游生物 的残体和海洋生物都能产生黏性的有机分泌物,它 们可以将碎屑颗粒(如 POC)"捕集"起来形成 大的絮凝体而迅速沉积⁶⁶,本文认为这类分泌的有 机物很可能为 TEP,即 TEP 能通过聚集作用转变 为 POC。为此本文利用 TEP 与 POC 和 Chl a 的相 关性(表 2) 以及 POC 与 Chl a 的线性关系(图 7) 进行探究。结果显示夏、秋两季的 TEP 与 POC 均 呈正相关(夏季: R=0.941, p<0.01; 秋季: R= 0.771, p < 0.01), 夏季 POC 与 Chl a 的线性关系 较好,但秋季线性关系较差。结合 TEP 与 Chl a 的 相关性来看,夏季温州近海的 POC 主要来自浮游 植物,其中浮游植物释放的 TEP 对此时海域的 POC 有较大贡献, 而秋季的POC 很有可能是其他 海域携带的 TEP 贡献。这些外源的 TEP 含量远高 于夏季, 故通过该部分 TEP 形成的 POC 含量也随 之升高,从而出现了低 Chl a、高 POC 的现象。严 宏强等^[65]推测,这种低 Chl a、高 POC 的特征是由 于该区域 POC 并非主要由浮游植物产生, 而是受 水团与再悬浮作用影响从陆地以及底层运输而来。 本研究的结果支持了这种推测并从 TEP 的角度提



供了一种新的解释。

底层



4 总结

温州近海的 TEP 整体上表现为秋季高于夏季 的特征。夏季 TEP 分布主要受瓯江的淡水输入影 响,淡水输入为海域浮游植物生长创造条件,浮游 植物因此释放大量的 TEP 及前体物质。同时在颗 粒物再悬浮作用下,TEP 的形成大大提高。秋季主 要受闽浙沿岸流影响,该水团可能将流经海域沿岸 新产生的以及保留的 TEP 及前体物质运输到温州 近海,在湍流、再悬浮等作用下形成大量 TEP。而 且水体扰动加强可能将埋藏的 TEP 重新释放到 水体中。此外,两个季节 TEP 对 POC 的贡献都 较大。然而与夏季不同的是,秋季受沿岸流影响,

0 m

10 m

海域 POC 可能是受水团与再悬浮作用影响从临近 海域以及底层运输而来,其中 TEP 可能起了重要 作用。

参考文献

- PASSOW U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments[J]. Progress in oceanography, 2002, 55(3/4): 287–333.
- [2] 孙军,郭聪聪,张桂成.透明胞外聚合颗粒物碳输运新途径[J].海 洋学报,2019,41(8):125-130.
- [3] 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.
- BHASKAR P V, BHOSLE N B. Microbial extracellular polymeric substances in marine biogeochemical processes[J]. Current Science, 2005,88(1):45-53.
- [5] HARLAY J, DE BODT C, 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.
- [6] GORDON JR D C. A microscopic study of organic particles in the North Atlantic Ocean[C]//Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. Elsevier, 1970, 17(1):175–185.
- [7] WIEBE W J, POMEROY L R. Microorganisms and their association with aggregates and detritus in the sea; a microscopic study [J]. Mem Ist Ital Idrobiol. 1972(29):325–352.
- [8] EMERY K O, JOHNS I A, HONJO S. Organic films on particulate matter in surface waters off eastern Asia[J]. Sedimentology, 1984, 31 (4):503–514.
- [9] 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.
- [10] PASSOW U. Production of transparent exopolymer particles (TEP) by phyto-and bacterioplankton[J]. Marine Ecology Progress Series, 2002,236:1-12.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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, 2005, 529: 17–34.
- [14] RAMAIAH N, YOSHIKAWA T, FURUYA K. Temporal variations in transparent exopolymer particles (TEP) associated with a diatom

http://hytb.nmdis.org.cn

spring bloom in a subarctic ria in Japan[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 212:79-88.

- [15] 孙翠慈,王友绍,吴梅林,等.夏季珠江口透明胞外聚合颗粒物 分布特征[J].热带海洋学报,2010,29(5):81-87.
- [16] GUO S,SUN X. Concentrations and distribution of transparent exopolymer particles in a eutrophic coastal sea: a case study of the Changjiang (Yangtze River)Estuary[J]. Marine and Freshwater Research, 2019, 70(10): 1389–1401.
- [17] 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.
- [18] PASSOW U. Formation of transparent exopolymer particles, TEP, from dissolved precursor material[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 192:1–11.
- [19] STODEREGGER K E, HERNDL G J. Production of exopolymer particles by marine bacterioplankton under contrasting turbulence conditions[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 189:9–16.
- [20] MARI X, BURD A B. Seasonal size spectra of transparent exopolymeric particles (TEP) in a coastal sea and comparison with those predicted using coagulation theory[J]. Marine Ecology Progress Series, 1998, 171:63–76.
- [21] HONG Y, SMITH JR W O, WHITE A M, 1997. 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.
- [22] 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.
- [23] LEPPARD G G, WEST M M, FLANNIGAN D T, et al. A classification scheme for marine organic colloids in the Adriatic Sea: colloid speciation by transmission electron microscopy[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(10):2334–2349.
- [24] SANTSCHI P H, BALNOIS E, WILKINSON K J, et al. Fibrillar polysaccharides in marine macromolecular organic matter as imaged by atomic force microscopy and transmission electron microscopy[J]. Limnology and Oceanography, 1998, 43(5): 896–908.
- [25] RAMAIAH N, FURUYA K. Seasonal variations in phytoplankton composition and transparent exopolymer particles in a eutrophicated coastal environment[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002, 30(1): 69–82.
- [26] BERMAN T, PARPAROVA R. Visualization of transparent exopolymer particles (TEP) in various source waters[J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 21(1–3): 382–389.
- [27] 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.
- [28] 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 Research, 2002, 24 (8):817-833.

- [29] CORZO A,RODRÍGUEZ-GÁLVEZ S,LUBIAN L, et al. Spatial distribution of transparent exopolymer particles in the Bransfield Strait, Antarctica[J]. Journal of Plankton Research, 2005, 27(7): 635-646.
- [30] LING S C, ALLDREDGE A L. Does the marine copepod Calanus pacificus consume transparent exopolymer particles (TEP)[J]. Journal of plankton research, 2003, 25(5):507–515.
- [31] YAMADA Y, FUKUDA H, INOUE K, et al. Effects of attached bacteria on organic aggregate settling velocity in seawater[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2013, 70(3):261–272.
- [32] CHEN C T A, BORGES A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and nearshore ecosystems as sources of atmospheric CO₂[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2009, 56(8–10): 578–590.
- [33] YIN K, HARRISON P J, POND S, et al. Entrainment of Nitrate in the Fraser River Estuary and its Biological Implications. II. Effects of Springvs. Neap Tides and River Discharge[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(5):529–544.
- [34] 李建生, 严利平, 胡芬, 等, 2015. 温台渔场日本鲭的繁殖生物学特征[J]. 中国水产科学, 2015, 22(1): 99-105.
- [35] 王建丰,司广成,于非.台湾暖流变化特征及机制研究进展[J].海 洋科学,2020,371(5):143-150.
- [36] 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.
- [37] 茅志昌,沈焕庭.长江河口与瓯江河口最大浑浊带的比较研究[J]. 海洋通报,2001,20(3):8-14.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 许婷,麦苗,韩志远. 瓯江河口水动力泥沙环境分析[J]. 水利科技 与经济,2018,24(10):1-5.
- [42] VILES H, SPENCER T. Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast[J]. Oceanographic Literature Review 1995, 9 (42):812.
- [43] BARBIER E B, HACKER S D, KENNEDY C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. Ecological monographs, 2011,81(2):169–193.
- [44] MALPEZZI M A, SANFORD L P, CRUMP B C. Abundance and distribution of transparent exopolymer particles in the estuarine tur-

bidity maximum of Chesapeake Bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 486:23-35.

- [45] KEPKAY P E. Colloids and the ocean carbon cycle [M]//Marine Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [46] 严晓焰,张云莲.瓯江河口水动力条件和泥沙运移特征分析[J]. 浙江水利水电专科学校学报,1999(2):18-20.
- [47] CHAI C, YU Z, SONG X, et al. The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang)Estuary and the adjacent East China Sea, China[J]. Hydrobiologia, 2006, 563(1):313– 328.
- [48] TANG D L, DI B P, WEI G, et al. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1):245–253.
- [49] 许卓昀,陈根,张靖尧,等. 舟山附近海域环境调查及浮游生物 分析[J]. 环境生态学,2019,1(5):43-46.
- [50] 孙鲁峰,徐兆礼,邢小丽,等. 鱼山渔场近海海域浮游植物数量 与上升流的关系[J]. 海洋环境科学,2012,31(6):881-887.
- [51] 李伯根,谢钦春,夏小明,等. 椒江河口最大浑浊带悬沙粒径分 布及其对潮动力的响应[J]. 泥沙研究,1999(1):18-26.
- [52] MARI X. Carbon content and C:N ratio of transparent exopolymeric particles (TEP)produced by bubbling exudates of diatoms[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 183:59–71.
- [53] PASSOW U, ALLDREDGE A L. Do transparent exopolymer particles (TEP) inhibit grazing by the euphausiid Euphausia pacifica?[J]. Journal of Plankton Research, 1999, 21(11):2203-2217.
- [54] ALUWIHARE L I, REPETA D J. A comparison of the chemical characteristics of oceanic DOM and extracellular DOM produced by marine algae[J]. Marine Ecology Progress Series, 1999, 186:105– 117.
- [55] ZHOU J, MOPPER K, PASSOW U. The role of surface-active carbohydrates in the formation of transparent exopolymer particles by bubble adsorption of seawater[J]. Limnology and Oceanography, 1998,43(8):1860-1871.
- [56] ARNOSTI C. Substrate specificity in polysaccharide hydrolysis: contrasts between bottom water and sediments[J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(5):1112–1119.
- [57] MCCARREN J, BECKER J W, REPETA D J, et al. Microbial community transcriptomes reveal microbes and metabolic pathways associated with dissolved organic matter turnover in the sea[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107 (38): 16420–16427.
- [58] SAAD E M, LONGO A F, CHAMBERS L R, et al. Understanding marine dissolved organic matter production: compositional insights from axenic cultures of *Thalassiosira pseudonana*[J]. Limnology and Oceanography, 2016,61(6):2222–2233.
- [59] VILLACORTE L O, EKOWATI Y, WINTERS H, et al. Characterisation of transparent exopolymer particles(TEP) produced during algal bloom: a membrane treatment perspective[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(4/6): 1021–1033.

(下转第60页)

http://hytb.nmdis.org.cn

- [56] YIM W S,HUANG G,FONTUGNE M, et al. Postglacial sea-level changes in the northern South China Sea continental shelf:evidence for a post-8200 calendar yr BP meltwater pulse[J]. Quaternary International, 2006, 145:55–67.
- [57] 赵晓晨. 黄海全新世浮游植物生产力和群落结构变化规律及控制机制[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [58] 吴鹏,肖晓彤,陶舒琴,等.运用生物标志物研究全新世南黄海 泥质区陆源有机质输入的变化[J].中国科学:地球科学,2016, 46 (6):799-808.
- [59] 李铁刚,江波,孙荣涛,等.末次冰消期以来东黄海暖流系统的 演化[J].第四纪研究,2007,27 (6):945-954.
- [60] 王利波,杨作升,赵晓辉,等.南黄海中部泥质区 YE-2孔 8.4 kaBP 来的沉积特征[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):1-11.
- [61] 胡邦琦,杨作升,赵美训,等.南黄海中部泥质区 7200 年以来东 亚冬季风变化的沉积记录[J].中国科学:地球科学,2012,42(10): 1568-1581.
- [62] 王利波,杨作升,张荣平,等.南黄海中部泥质区 ZY2 孔 6200 年 以来的海表温度记录及黄海暖流变化的影响[J].科学通报, 2011,56 (15):1213-1220.
- [63] 邢磊,赵美训,张海龙,等.二百年来黄海浮游植物群落结构变 化的生物标志物记录[J].中国海洋大学学报(自然科学版),

2009,39(2):317-322.

- [64] LIU S,ZHANG J, CHEN S Z, et al. Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23:1161– 1174.
- [65] 王星辰,邢磊,张海龙,等.北黄海-渤海表层沉积物中浮游植物 生物标志物的分布特征及指示意义[J].中国海洋大学学报(自然 科学版),2014,44(5):69-73.
- [66] 蔡德陵,孙耀,张小勇,等.由东海、黄海沉积物中有机碳含量及 稳定同位素组成重建 200 a 以来初级生产力历史记录[J].海洋 学报,2014,36(2):40-50.
- [67] ZHAO X, TAO S, ZHANG R, et al. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes in the Central Yellow Sea mud area during the Mid-late Holocene[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12:639–646.
- [68] XING L,ZHAO M,ZHANG H, et al. Biomarker evidence for paleoenvironmental changes in the southern Yellow Sea over the last 8200 years[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30:1–11.

(本文编辑:崔尚公)

(上接第49页)

- [60] 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.
- [61] SUN C C, WANG Y S, LI Q P, et al. Distribution characteristics of transparent exopolymer particles in the Pearl River estuary, China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117: G00N17.
- [62] BEAUVAIS S, PEDROTTI M L, VILLA E, et al. Transparent exopolymer particle(TEP) dynamics in relation to trophic and hydrological conditions in the NW Mediterranean Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 262:97–109.
- [63] 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.

- [64] PENNA A, BERLUTI S, PENNA N, et al. Influence of nutrient ratios on the in vitro extracellular polysaccharide production by marine diatoms from the Adriatic Sea[J]. Journal of Plankton Research, 1999,21(9):1681–1690.
- [65] 严宏强,余克服,谭烨辉. 夏季南海北部水体中颗粒有机碳的分 布特征[J]. 热带地理,2011 (2):133-137.

(本文编辑:杨瑞)

http://hytb.nmdis.org.cn