

雷州半岛红树林表层沉积物正构烷烃组成分布特征研究

罗涛¹, 王遥平^{1,2,3}, 朱昀¹, 宋之光^{1,2}

(1.广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088; 2.南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524013; 3.广东海洋大学 深圳研究院, 广东 深圳 518120)

摘要: 本文研究了雷州半岛高桥镇、特呈岛、湖光镇和金沙湾 4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃的含量、组成分布及来源特征。结果表明, 研究区域红树林表层沉积物中总有机碳 (TOC) 含量为 0.10%~5.62%, 正构烷烃总含量 ($\sum n\text{-Alk}$) 为 0.69~16.60 $\mu\text{g/g}$ (dw)。红树林表层沉积物中正构烷烃组成以中长链 ($n\text{-C}_{23}\sim n\text{-C}_{31}$) 为主, 呈单峰型分布。除金沙湾以外, 其他区域红树林表层沉积物中正构烷烃组成奇偶优势明显。正构烷烃组成分布及平均链长 (ACL)、碳优势指数 (CPI)、短链/长链比值 ($\sum n\text{-C}_{20}^-/\sum n\text{-C}_{21}^+$)、陆海来源比值 (TAR)、水生植物贡献比值 (P_{aq}) 等指标的主成分分析 (PCA) 结果显示, 研究区域红树林表层沉积物中正构烷烃主要来源于高等植物, 其中, 高桥镇红树林表层沉积物中正构烷烃主要来源于陆源高等植物, 而部分湖光镇、特呈岛红树林表层沉积物中正构烷烃的水生植物来源贡献较大, 金沙湾红树林表层沉积物中正构烷烃可能受人类活动的影响。因此, 本研究认为, 红树林表层沉积物中正构烷烃的组成分布可以较好地反映其物源输入特征。

关键词: 红树林; 表层沉积物; 总有机碳; 正构烷烃; 雷州半岛

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)00-0001-09

Composition and distribution of *n*-alkanes in surface sediments of mangrove of Leizhou peninsula

LUO Tao¹, WANG Yao-ping^{1,2,3}, ZHU Yun¹, SONG Zhi-guang^{1,2}

(1.College of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524013, China; 3.Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China)

Abstract: The content, composition distribution, and source characteristics of *n*-alkanes in the surface sediments from four mangrove forests of Gaoqiao town, Techeng island, Huguang town, and Jinsha bay of Leizhou peninsula are studied. The results show that the content of total organic carbon (TOC) in these mangrove surface sediments is between 0.10% to 5.62%, and the content of total *n*-alkanes ($\sum n\text{-Alk}$) ranges from 0.69 to 16.60 $\mu\text{g/g}$ (dw). The composition of *n*-alkanes in these surface sediments is dominated by medium to long chains *n*-alkanes ($n\text{-C}_{23}$ to $n\text{-C}_{31}$), that are distributed as unimodal patterns. The *n*-alkanes display a clear odd-even predominance with an exception of samples from Jinsha bay. The composition and distribution of *n*-

收稿日期: 2021-09-17, 修订日期: 2022-01-20

基金项目: 始新世晚期—渐新世早期气候过渡时间 (EOT) (41602139); 广东海洋大学特别人才专项资助项目 (002026002004); 广东海洋大学“创新强校”资助项目 (Q18301); 广东海洋大学“冲一流”项目 (231419029); 广东海洋大学博士科研启动项目 (R17001)

作者简介: 罗涛 (1995—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为海洋有机地球化学, E-mail: luotao9509@163.com

通讯作者: 王遥平 (1990—), 男, 江西南昌人, 博士, 主要研究方向为海洋有机地球化学, E-mail: wangyp@gdou.edu.cn

alkanes and the principal component analysis of related index of average chain length (*ACL*), carbon predominance index (*CPI*), short-chain/long-chain ratio ($\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$), terrigenous/aquatic ratio (*TAR*), and proxy of aquatic macrophyte input (P_{aq}) shows that the *n*-alkanes in mangrove sediments is mainly sourced from higher plants, among these the *n*-alkanes in Gaoqiao town mangrove surface sediments are mainly originated from the terrestrial higher plant, while the aquatic plant sourced contribution in the Techeng island and some samples of Huguang town are higher, and the mangrove surface sediments in Jinsha bay is effected by human activities. Therefore, we believe that the composition and distribution of *n*-alkanes in mangrove surface sediments could be used to reflect the characteristic of their source inputs.

Key words: mangrove; surface sediments; total organic carbon; *n*-alkanes; Leizhou peninsula

红树林是分布于热带、亚热带海岸潮间带的木本盐生植物生态群落,是陆地向海洋过渡的特殊生态系统,也是重要的海岸生态湿地资源,为生物的栖息繁衍提供了良好的场所^[1]。同时,由于红树林湿地环境及其地理位置的特殊性,红树林沉积物除了保留红树林自身产生的有机质外,还能够截获并掩埋由河流和海洋带来的有机质^[2]。因此,研究红树林沉积物中有机质的输入与来源具有重要科学意义。

沉积物中有机质的来源可以通过生物标志化合物及其相关指标进行推断。生物标志化合物是生物体死亡后在沉积物中经过物理化学和生物地球化学作用后残留的有机化合物,可以反映生物输入、物源环境、沉积环境和成岩变化等多方面的信息^[3]。沉积物中生物标志化合物的种类繁多,主要包括脂类、糖类、木质素酚类、氨基酸和氨基糖等^[4-5]。其中,正构烷烃是一类常用的脂类生物标志化合物。研究表明,陆源高等植物主要产生长链正构烷烃($n-C_{27} \sim n-C_{33}$),水生植物主要产生中等链长正构烷烃($n-C_{23} \sim n-C_{25}$),而细菌和藻类主要产生短链正构烷烃($<n-C_{21}$)^[6-8]。因此,沉积物中不同链长正构烷烃相对丰度的差异,可以反映陆源高等植物、水生植物以及细菌和藻类的相对贡献。例如,正构烷烃的平均链长(*ACL*)和陆海来源比值(*TAR*)越大,陆源高等植物对沉积物中正构烷烃的贡献越大;正构烷烃短链/长链比值($\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$)大于1时,细菌和藻类对沉积物中正构烷烃的贡献越大;水生植物贡献比值(P_{aq})越大,水生植物对沉积物中正构烷烃的贡献越大,一般水生植物的 P_{aq} 为0.51~1^[9-12]。同时,正构烷烃的碳优势指数(*CPI*)可以反映石油烃的占比,进而反映人类

活动(交通运输等产生的石油烃)的影响,*CPI*接近1时,正构烷烃主要来源于石油烃^[13-14]。

本文通过分析雷州半岛4个区域红树林表层沉积物中正构烷烃的组成分布差异,探讨了红树林表层沉积物中正构烷烃的来源特征,以期对红树林沉积体系的生物地球化学研究、红树林生态体系的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

中国红树林资源主要分布于热带和亚热带沿海地区。其中,雷州半岛拥有中国面积最大的红树林国家级自然保护区—湛江红树林国家级自然保护区。湛江红树林国家级自然保护区处于热带和亚热带季风气候区域,全年受海洋气候调节,年平均气温为23℃,年平均降水量为1417~1802 mm,干湿季节分明,每年4月—9月为多雨季,10月—次年3月雨量较少,夏、秋之间热带风暴和台风较为频繁^[15]。

本研究选取了位于雷州半岛西部的高桥镇以及东部的特呈岛、湖光镇和金沙湾红树林作为采样区域。高桥镇红树林是我国红树林成片面积最大的区域,主要的红树植物有桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)和白骨壤(*Avicennia marina*)等。湖光镇红树林位于湛江市东南部,分布在河道两侧和淤滩上的红树植物主要有无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)和白骨壤等。特呈岛是湛江湾水道南端的一座岛屿,分布在岛屿南端海岸潮间带上的红树植物主要有白骨壤和红海榄(*Rhizophora stylosa*)^[16],林间还有大量的浒苔(*Enteromorpha*)和石莼(*Ulva lactuca*)等大型藻

类。金沙湾红树林位于湛江市观海长廊东北侧, 毗邻城市中心, 附近水域是湛江最繁忙的航道, 该区域的主要优势红树植物是无瓣海桑。

1.2 样品采集

金沙湾红树林表层沉积物样品于 2020 年 1 月采集, 高桥镇、湖光镇和特呈岛红树林表层沉积物样品于 2020 年 12 月采集。在当日潮位最低时, 用取样铲采集表层(0~5 cm)泥质沉积物。沉积物样品保存在聚乙烯采样袋中, 并置于干冰盒中运送至实验室分析。红树林沉积物采样点按照与河道和海域平行分布的原则设置, 以保证采样点在整个区域的代表性。

1.3 沉积物中脂质的提取、分离与鉴定

结合文献中的方法^[17-18], 对沉积物样品中的脂质进行提取、分离和鉴定。沉积物样品经过真空冷冻干燥后, 剔除石子和植物等杂物, 研磨过 100 目网筛。称取 20 g 样品, 采用快速溶剂萃取仪(VFSE-6, 北京维克托公司)提取脂质, 萃取溶剂为二氯甲烷和甲醇(体积比 9:1)的混合溶剂, 在 100 °C 和 10 Mpa 的条件下, 循环萃取两次。萃取池中加入活化的铜片, 以除去沉积物中的硫元素。总提取物用氮气吹干至恒重, 用正己烷溶解后, 使用柱色谱法分离成饱和烃、芳烃和非烃 3 个组分。饱和烃组分通过旋转蒸发仪浓缩至 1 mL 待测。

饱和烃组分使用 Agilent 7890 B 气相色谱-火焰检测器(GC-FID, 美国安捷伦公司, 配置 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm 的 HP-5 毛细管色谱柱)进行色谱分析。气相色谱条件为: 初始温度为 50 °C, 保持 5 min, 然后以 40 °C/min 升温至 230 °C, 再以 20 °C/min 升温至 320 °C, 保持 20 min。根据正构烷烃标准品($n\text{-C}_7 \sim n\text{-C}_{40}$ 混标)对饱和烃组分进行定性与定量分析。配制 0.1、0.4、0.8、1.0、10 mg/L 浓度梯度的标准品正构烷烃溶液, 绘制其峰面积标准曲线, 根据标准曲线计算样品中正构烷烃的浓度。

1.4 总有机碳(TOC)和总氮(TN)分析

称取适量研磨后的沉积物样品, 用 1 mol/L 盐酸除去样品中的无机碳, 用超纯水洗至 pH 中性, 置于烘箱中 60 °C 干燥至恒重。称取处理后的样品 25 mg 包入锡杯中, 随后使用 Elementar

公司的 vario MACRO cube 有机元素分析仪测定样品中的 TOC 和 TN 含量。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中 TOC 与正构烷烃总含量

由表 1 可知, 4 个区域红树林表层沉积物中 TOC 含量为 0.10% ~ 5.62%, 正构烷烃总含量($\sum n\text{-Alk}$)为 0.69 ~ 16.60 μg/g(dw, 干重)。高桥镇和湖光镇沉积物中 TOC 含量总体较高, 平均值分别为 2.74% 和 1.61%; $\sum n\text{-Alk}$ 含量的平均值分别为 3.06 μg/g(dw) 和 2.80 μg/g(dw)。金沙湾和特呈岛沉积物中 TOC 含量总体较低, 平均值分别为 0.85% 和 0.65%; $\sum n\text{-Alk}$ 含量平均值分别为 9.43 μg/g(dw) 和 2.09 μg/g(dw)。其中, 高桥 1 号(GQ-1)采样点的 TOC 含量和金沙湾 7 号(JSW-7)采样点的 $\sum n\text{-Alk}$ 呈异常高值, 分别为 5.62% 和 16.60 μg/g(dw)。GQ-1 采样点沉积物中 TOC 含量远高于同区域其他采样点, 这可能与该采样点的位置有关, 该采样点位于红树林中心地带, 红树植物对沉积物有机质的贡献高于红树林边缘地带^[19]; 同时, 高桥镇红树林面积广阔, 红树林中心地带水动力条件可能更稳定, 红树林中心地带与边缘地带有机质来源与贮藏可能存在差异。

TOC 含量和 $\sum n\text{-Alk}$ 的相关性分析结果显示, 红树林表层沉积物中 TOC 含量和 $\sum n\text{-Alk}$ 含量整体上呈正相关关系; 但金沙湾沉积物中 TOC 含量和 $\sum n\text{-Alk}$ 含量的皮尔逊相关系数($r=0.96$)明显高于其他 3 个区域($r=0.73$, GQ-1 作为异常点排除, 见图 1)。这种相关性差异表明, 金沙湾沉积物中正构烷烃总含量在总有机质中的占比相对恒定, 其有机质来源可能与其他 3 个区域红树林沉积物不同。沉积有机质中正构烷烃除来自植物叶蜡之外, 还有来自其他的脂质、多糖和蛋白质等的贡献^[5,7]。这些有机质在沉积成岩过程会发生不同程度的降解和生物作用, 最终有少部分会转化成正构烷烃^[4,20]。因此, 当沉积物中正构烷烃含量与总有机质含量之间呈较复杂关系时, 可能显示有外源性有机质的输入, 如人类活动(交通运输等)或来自地下深处的石油烃渗漏等。

沉积物中碳氮比(C/N)可以反映有机质的母质来源。例如,陆源高等植物的有机质 C/N 大于 15,海洋生物的有机质 C/N 为 5~7,但是沉积物中无机氮含量会影响到该比值^[21]。高桥镇、特呈岛和湖光镇红树林表层沉积物中 C/N 基本接近 15 或大于 15,表明沉积物有机质以陆源高等植物输入为主;而金沙湾沉积物 C/N 的平均值

为 8.55,可能存在海洋生物有机质的输入(表 1)。红树林表层沉积物中 TOC 和 TN 含量整体呈正相关关系,这个结果表明,4 个区域红树林表层沉积物中有机质整体来源较为一致(图 1)。但是,金沙湾区域 TOC 和 TN 的线性拟合斜率和整体斜率差异较大,表明金沙湾红树林表层沉积物中有机质可能有外源物质的输入。

表 1 红树林表层沉积物中 TOC、 $\sum n\text{-Alk}$ 和 TN 含量以及 C/N 比值

Tab.1 The content of TOC, $\sum n\text{-Alk}$, TN and C/N ratio in surface sediments of mangrove forests

研究区域	样品编号	TOC/(%)	$\sum n\text{-Alk}/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}(\text{dw})$	TN/(%)	C/N
高桥镇	GQ-1	5.62	3.38	0.32	17.69
	GQ-2	1.52	3.75	0.11	13.84
	GQ-3	1.86	2.57	0.13	14.11
	GQ-5	1.37	2.20	0.12	11.95
	GQ-8	3.34	3.40	0.20	16.45
	均值	2.74	3.06	0.18	14.81
特呈岛	TCD-1	0.10	0.70	0.00	32.33
	TCD-2	0.47	2.03	0.03	18.23
	TCD-3	2.01	5.10	0.14	14.68
	TCD-4	0.16	0.69	0.01	18.11
	TCD-5	0.57	2.00	0.04	16.03
	TCD-6	0.56	2.00	0.04	15.91
	均值	0.65	2.09	0.04	19.22
湖光镇	HGZ-1	3.04	5.94	0.17	17.54
	HGZ-2	0.81	1.05	0.04	19.90
	HGZ-3	0.98	1.41	0.05	20.16
	均值	1.61	2.80	0.09	19.20
金沙湾	JSW-1	0.14	5.86	0.03	5.65
	JSW-2	0.21	6.46	0.02	8.72
	JSW-4	0.29	9.31	0.04	7.36
	JSW-7	2.74	16.60	0.27	10.17
	JSW-8	0.86	8.91	0.08	10.87
	均值	0.85	9.43	0.09	8.55

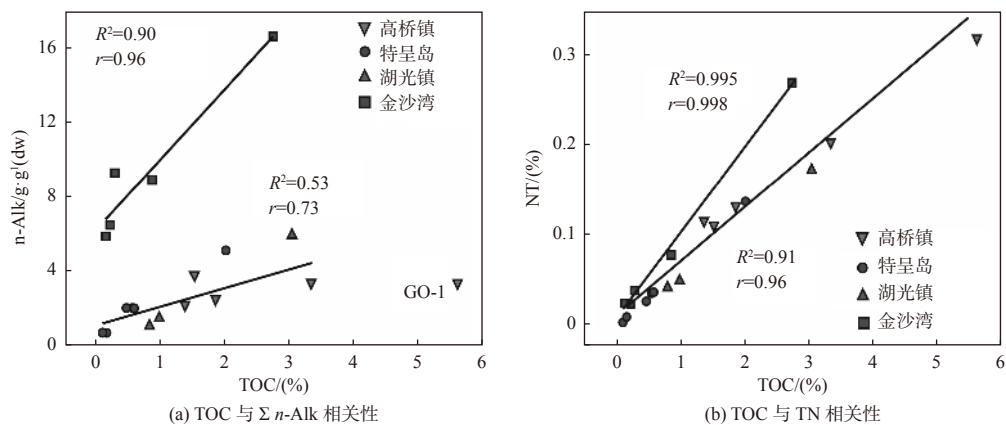


图 1 雷州半岛红树林表层沉积物中 TOC 与 $\sum n\text{-Alk}$ 、TN 的相关性

Fig. 1 The correlation between TOC with the $\sum n\text{-Alk}$ and TN in the surface sediments of mangrove forests from Leizhou Peninsula

2.2 沉积物中正构烷烃组成分布特征

本研究 4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃的碳数分布范围为 $n\text{-C}_{12} \sim n\text{-C}_{39}$, 总体呈以中长链正构烷烃($n\text{-C}_{23} \sim n\text{-C}_{31}$)为主的单峰型分布(图 2 和图 3)。当沉积物中正构烷烃受到高等植物和细菌或藻类(或石油烃)共同输入时, 正构烷烃往往表现出双峰型分布的特征, 这种现象在近海沉积物中较为常见^[11-12]。4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃以单峰型分布为主, 表明沉

积物中来自细菌和藻类的正构烷烃贡献较少。高桥镇、特呈岛和湖光镇红树林表层沉积物中正构烷烃以奇碳数($n\text{-C}_{25}$ 、 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$)为主峰碳, 正构烷烃奇偶优势明显, 表明沉积物中正构烷烃以高等植物输入为主; 金沙湾红树林表层沉积物中正构烷烃以奇碳数($n\text{-C}_{25}$ 和 $n\text{-C}_{27}$)和偶碳数($n\text{-C}_{26}$ 和 $n\text{-C}_{28}$)为主峰碳, 正构烷烃无明显奇偶优势, 表明金沙湾沉积物中正构烷烃来源比较多(图 2 和图 3)。

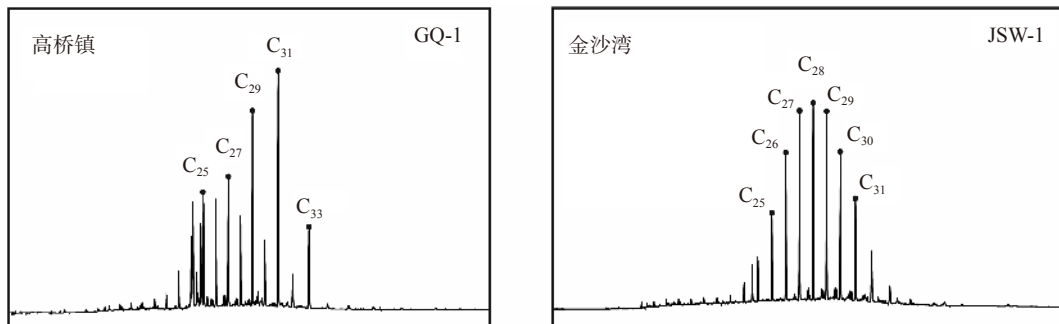


图 2 红树林沉积物样品中正构烷烃气相色谱(GC)图

Fig. 2 Gas chromatography(GC) diagram of n -alkanes in the surface sediments of mangrove forests

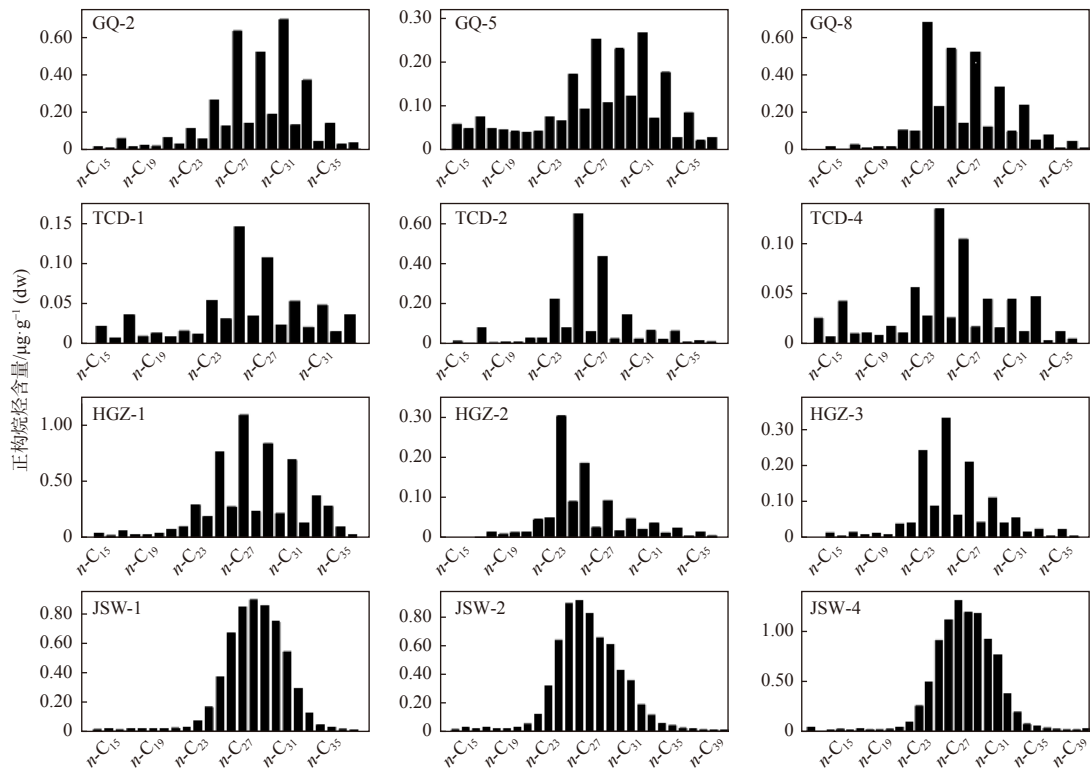


图 3 高桥镇、特呈岛、湖光镇和金沙湾红树林表层沉积物中正构烷烃组成分布

Fig. 3 Distribution of n -alkanes of mangrove surface sediments from Gaoqiao town, Techeng island, Huguang town and Jinsha bay

不同区域红树林表层沉积物中正构烷烃主峰碳数存在明显差异。高桥镇区域主峰碳为 $n-C_{31}$ ($n=4$), 其中, 高桥 8 号 (GQ-8) 采样点主峰碳为 $n-C_{23}$; 特呈岛区域主峰碳为 $n-C_{25}$ ($n=6$); 湖光镇 1 号、2 号和 3 号 (HGZ-1, HGZ-2, HGZ-3) 采样点主峰碳分别为 $n-C_{27}$ 、 $n-C_{23}$ 和 $n-C_{25}$; 金沙湾 1 号和 2 号采样点 (JSW-1, JSW-2) 主峰碳为 $n-C_{28}$ 和 $n-C_{26}$ (图 3), 金沙湾 4 号和 7 号 (JSW-4, JSW-7) 采样点主峰碳为 $n-C_{27}$, 金沙湾 8 号 (JSW-8) 采样点主峰碳为 $n-C_{25}$ 。陆源高等植物产生的正构烷烃主峰碳一般为 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$, 水生植物 (如海草) 产生的正构烷烃主峰碳一般为 $n-C_{23}$ 和 $n-C_{25}$ [6,12,22]。因此, 高桥镇红树林表层沉积物中正构烷烃主要以陆源高等植物贡献为主, 而在 GQ-8 采样点、特呈岛和湖光镇表层沉积物中, 水生植物来源的正构烷烃具有较大比例的贡献。同时, 在湖光镇红树林内不同区域表层沉积物中, 陆源高等植物和水生植物的相对贡献变化差异较为明显。而金沙湾红树林表层沉积物可能受陆源高等植物、水生植物和人类活动等输入的共同影响。

2.3 沉积物中正构烷烃来源分析

沉积物中不同链长正构烷烃相对丰度的差异可以用来指示正构烷烃母源输入的变化 [18]。4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃的平均链长 (ACL) 为 24.96 ~ 28.66; 短链正构烷烃碳优势指数 (CPI_L) 为 1.26 ~ 4.66; 长链正构烷烃碳优势指数 (CPI_H) 为 0.97 ~ 7.02; 短链/长链比值 ($\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$) 为 0.01 ~ 0.18; 陆海来源输入比值 (TAR) 为 2.43 ~ 41.43; 水生植物贡献比值 (P_{aq}) 为 0.24 ~ 0.85 (表 2)。4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃整体具有较高的 ACL 值和较低的 $\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$ 值, 表明沉积物中正构烷烃主要来源于高等植物。特呈岛红树林表层沉积物中正构烷烃具有较低的 TAR 值和较高的 P_{aq} 值, 平均值分别为 5.65 和 0.74, 表明沉积物中正构烷烃来自水生植物的贡献较大。金沙湾红树林表层沉积物中长链和短链正构烷烃的 CPI 均接近 1, 且金沙湾整体的 CPI_H (1.20) 略低于 CPI_L (1.42), 可能说明人类活动产生的正构烷烃对该区域沉积物中长链正构烷烃组成的影响较大。

表 2 雷州半岛红树林表层沉积物正构烷烃指标

Tab.2 The indexes of n -alkanes in the surface sediments of mangrove forests of Leizhou Peninsula

研究区域	样品编号	ACL	CPI_L	CPI_H	$\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$	TAR	P_{aq}
高桥镇	GQ-1	28.53	NA	2.24	0.01	NA	0.25
	GQ-2	28.66	2.75	3.82	0.04	17.48	0.24
	GQ-3	28.18	2.30	3.53	0.06	10.76	0.28
	GQ-5	27.13	1.26	2.49	0.17	4.14	0.33
	GQ-8	26.00	3.76	3.44	0.03	16.30	0.68
	均值	27.70	2.52	3.10	0.06	12.17	0.36
特呈岛	TCD-1	25.44	2.65	NA	0.17	2.91	0.66
	TCD-2	25.71	4.52	7.02	0.02	5.93	0.80
	TCD-3	26.56	3.93	5.20	0.03	12.45	0.75
	TCD-4	25.58	2.99	4.15	0.18	2.43	0.68
	TCD-5	25.95	4.66	4.13	0.1	3.62	0.76
	TCD-6	26.14	3.27	4.94	0.07	6.57	0.77
	均值	25.90	3.67	5.09	0.10	5.65	0.74
湖光镇	HGZ-1	27.75	1.68	2.99	0.04	18.40	0.41
	HGZ-2	24.96	NA	3.57	0.06	NA	0.85
	HGZ-3	25.64	2.93	3.39	0.05	8.72	0.77
	均值	26.12	2.30	3.32	0.05	13.56	0.68

续表

研究区域	样品编号	ACL	CPI_L	CPI_H	$\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$	TAR	P_{aq}
金沙湾	JSW-1	28.05	1.29	0.97	0.02	33.74	0.24
	JSW-2	26.91	1.42	1.06	0.03	23.12	0.56
	JSW-4	27.70	1.48	1.07	0.02	41.43	0.37
	JSW-7	27.47	1.50	1.72	0.05	18.79	0.36
	JSW-8	26.27	NA	NA	0.02	NA	0.64
	均值	27.28	1.42	1.20	0.03	29.27	0.44

注: ①表中NA代表样品中正构烷烃与计算公式不同, 未列出结果; ②短链正构烷烃($n-C_{15} \sim n-C_{23}$)碳优势指数 $CPI_L = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{15} + C_{17} + \dots + C_{21}}{C_{16} + C_{18} + \dots + C_{22}} + \frac{C_{15} + C_{17} + \dots + C_{23}}{C_{16} + C_{18} + \dots + C_{22}} \right)$; ③中长链正构烷烃($n-C_{23} \sim n-C_{35}$)碳优势指数 $CPI_H = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{25} + C_{27} + \dots + C_{35}}{C_{26} + C_{28} + \dots + C_{34}} + \frac{C_{25} + C_{27} + \dots + C_{35}}{C_{26} + C_{28} + \dots + C_{34}} \right)$; ④正构烷烃短链/长链比值 $\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+ = \frac{\sum C_{12-20}}{\sum C_{21-38}}$; ⑤陆海来源比值 $TAR = \frac{C_{27} + C_{29} + C_{31}}{C_{15} + C_{17} + C_{19}}$; ⑥平均链长 $ACL = \frac{\sum (Ci) \times i}{\sum (Ci)}$; ⑦水生植物贡献比值 $P_{aq} = \frac{C_{23} + C_{25}}{C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31}}$

为了进一步分析 4 个研究区域红树林表层沉积物中正构烷烃的来源特征, 对 15 个采样点 (仅分析参数完整的采样点) 的 6 个正构烷烃指标进行了主成分分析 (PCA)。其中, 第一主成分 (PC1) 的方差贡献率为 65.02%, 第二主成分 (PC2) 的方差贡献率为 19.78%, 两个主成分累积方差贡献率为 84.80%, 可以反映原始数据集的大部分信息。第一主成分以 ACL 和 TAR 等陆生

植物指示参数为负载荷, 以 P_{aq} 、 CPI_L 和 CPI_H 等水生植物和人类活动影响的指标为正载荷, 表明 4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃主要受陆源高等植物、水生植物和人类活动的影响较大。第二主成分以细菌和藻类来源参数 $\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$ 指标为负载荷, 具有较强的相关性, 并以 P_{aq} 、 CPI_L 和 TAR 等参数指标为正载荷 (表 3)。

表 3 雷州半岛红树林表层沉积物正构烷烃指标的主成分分析载荷矩阵

Tab.3 Loading matrices of principal component analysis for n -alkanes proxies of surface sediment from Leizhou Peninsula

主成分	ACL	CPI_L	CPI_H	$\sum n-C_{20}^- / \sum n-C_{21}^+$	TAR	P_{aq}
PC1	-0.44	0.44	0.43	0.23	-0.42	0.45
PC2	-0.08	0.31	0.10	-0.80	0.40	0.30

根据 PCA 的因子得分图, 本研究 4 个研究区域 15 个沉积物样品可划分为 4 个类别。来自同一红树林区域的采样点划分到不同的类别, 表明同一区域内红树林表层沉积物中正构烷烃来源存在差异 (图 4)。具体来说, 高桥镇和特呈岛采样点在 PC2 上的投影变化大于 PC1, 表明这两个区域沉积物中正构烷烃来源差异主要受 PC2 控制。例如, 相比同区域的采样点, 高桥 5 号 (GQ-5) 和特呈岛 4 号 (TCD-4) 采样点沉积物中细菌和藻类来源的正构烷烃贡献可能更大。而 GQ-8、HGZ-3 采样点和特呈岛区域多数采样点在图 4 中位置相近, 并都具有较高的 P_{aq} 值, 表

明其沉积物中正构烷烃的水生植物贡献较大。此外, HGZ-1 和 JSW-7 采样点都具有较高的 TAR 以及较低的 P_{aq} 值, 并在图 4 中与高桥镇区域采样点位置相近, 说明其沉积物中正构烷烃的陆源高等植物来源贡献更大。因此, JSW-7 采样点的 $\sum n-Alk$ ($16.6 \mu g/g, dw$) 异常偏高, 可能是由于陆源高等植物 (包括红树植物) 的大量累积造成的。以上代表陆源高等植物和水生植物正构烷烃来源的采样点, 主要分布于得分图的第一和第四象限; 而对于金沙湾红树林沉积物来说, JSW-1、JSW-2 和 JSW-4 这些具有较低 CPI 值的采样点主要分布在得分图的第二象限 (图 4), 因

此,该象限可能代表人类活动产生的正构烷烃对红树林表层沉积物输入的影响。

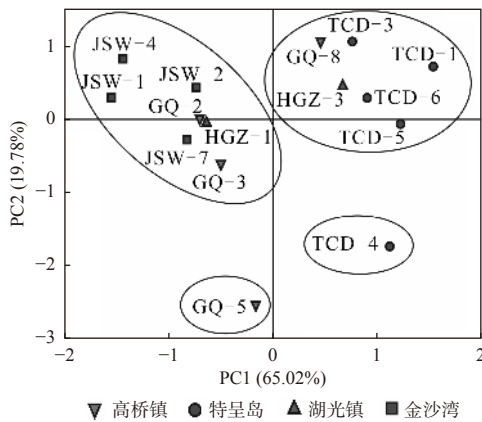


图4 雷州半岛红树林表层沉积物正构烷烃组成指标 PCA 因子得分图

Fig. 4 PCA analyses plots of *n*-alkanes indexes in surface sediments of Leizhou Peninsula mangrove forests

3 结论

(1) 本研究 4 个区域红树林表层沉积物中 TOC 含量为 0.10%~5.62%, 正构烷烃总含量为 0.69~16.60 $\mu\text{g/g}$ (dw); 不同区域红树林表层沉积物中正构烷烃组成、分布存在差异, 整体上正构烷烃组成呈以中长链($n\text{-C}_{23}$ ~ $n\text{-C}_{31}$)为主的单峰型分布, 除金沙湾红树林外, 高桥镇、特呈岛和湖光镇沉积物中正构烷烃奇偶优势明显, 并以奇碳数正构烷烃为主峰碳。

(2) 正构烷烃组成、分布及其指标(ACL 、 CPI 、 $\sum n\text{-C}_{20}^-/\sum n\text{-C}_{21}^+$ 、 TAR 和 P_{aq})的主成分分析(PCA)结果表明, 4 个区域红树林表层沉积物中正构烷烃主要为高等植物来源。其中, HGZ-1 采样点和高桥镇沉积物中正构烷烃主要来源于陆源高等植物, GQ-8、HGZ-3 采样点和特呈岛沉积物中正构烷烃的水生植物来源贡献较大, 而金沙湾红树林沉积物(如 JSW-1、JSW-2 和 JSW-4)中正构烷烃主要受人类活动的影响。

(3) 红树林表层沉积物中正构烷烃的组成、分布差异主要反映了陆源高等植物植物、水生植物、细菌和藻类以及人类活动来源有机质输入的差异。但红树植物对沉积物中有机质的贡献尚不能确定, 需要结合红树植物专属生物标志化合物和同位素做进一步研究。

参考文献:

- [1] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154-159.
- [2] SARKER S, MASUD-UL-ALAM M, HOSSAIN M S, et al. A review of bioturbation and sediment organic geochemistry in mangroves[J]. *Geological Journal*, 2021, 56(5): 2439-2450.
- [3] 鲁晓红, 陈颖军, 黄国培, 等. 黄渤海表层沉积物中正构烷烃和甾醇的分布及来源研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(6/7): 1117-1122.
- [4] 冯晓娟, 王依云, 刘婷, 等. 生物标志物及其在生态系统研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(4): 384-394.
- [5] KAAL J, CORTIZAS A M, MATEO M Á, et al. Deciphering organic matter sources and ecological shifts in blue carbon ecosystems based on molecular fingerprinting[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140554.
- [6] SACHSE D, RADKE J, GLEIXNER G. Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary *n*-alkanes record modern climate variability[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(23): 4877-4889.
- [7] 刘虎, 柳中晖, 赵成, 等. 水生植物烷基脂类含量和分布特征及其单体氢同位素组成[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(9): 1439-1451.
- [8] COLLISTER J W, RIELEY G, STERN B, et al. Compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ analyses of leaf lipids from plants with differing carbon dioxide metabolisms[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(6/7): 619-627.
- [9] 冷程程, 赵成, 崔巧玉, 等. 大兴安岭阿尔山天池沉积物中正构烷烃记录揭示的全新世古气候变化[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 976-985.
- [10] 李泽利, 马启敏, 程海鸥, 等. 锦州湾表层沉积物正构烷烃特征参数研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3300-3304.
- [11] 邝伟明, 陈文锋, 陈金民. 厦门海域正构烷烃组成特征及石油烃污染情况研究[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(1): 76-80.
- [12] MEAD R, XU Y P, CHONG J D, et al. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of *n*-alkanes[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(3): 363-370.
- [13] 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 等. 高等植物、燃煤和机动车排放正构烷烃特征分析[J]. *环境化学*, 2014, 33(5): 716-723.
- [14] 刘虎, 刘卫国. 植物叶蜡正构烷烃分子分布特征与植被类型的关系[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 168-179.
- [15] 湛江市人民政府. 气候特征[EB/OL]. [2021-06-10]. https://www.zhanjiang.gov.cn/qhtz/content/post_1202574.html.

- [16] 韩维栋, 高秀梅. 特呈岛红树林资源保护与利用研究[J]. [林业资源管理](#), 2007 (2): 77-81.
- [17] LADD S N, SACHS J P. Inverse relationship between salinity and *n*-alkane δD values in the mangrove *Avicennia marina*[J]. [Organic Geochemistry](#), 2012, 48: 25-36.
- [18] 刘丰豪, 胡建芳, 王伟铭, 等. 8.0 ka BP以来长江中下游南漪湖沉积记录的正构烷烃及其单体碳同位素组成特征和古气候意义[J]. [地球化学](#), 2018, 47(1): 89-101.
- [19] 江 睿, 吴云超, 陈丕茂. 珠江口淇澳岛红树林湿地沉积物碳、氮分布研究[J]. [南方水产科学](#), 2021, 17(1): 1-9.
- [20] 张慧芳, 吴欣松, 王 斌, 等. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展[J]. [沉积学报](#), 2016, 34(3): 463-477.
- [21] 胡利民, 石学法, 郭志刚, 等. 南黄海柱状沉积物中烃类化合物的地球化学特征及其对沉积环境的指示[J]. [沉积学报](#), 2013, 31(1): 108-119.
- [22] WÖSTMANN R, LIEBEZEIT G. Geochemical evidence for different peat sources in the siak estuary and along the east coast of Sumatra, Indonesia[J]. [Mires and Peat](#), 2012, 10: 02.