

# 九龙江口红树林湿地沉积物中有机碳和氮的分布特征及来源辨析\*

## Distributions and Sources of Organic Carbon and Nitrogen in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary

于宇<sup>1\*\*</sup>, 李学刚<sup>2</sup>, 袁华茂<sup>2</sup>

YU Yu<sup>1</sup>, LI Xuegang<sup>2</sup>, YUAN Huamao<sup>2</sup>

(1. 青岛农业大学海洋科学与工程学院, 山东青岛 266109; 2. 中国科学院海洋研究所生态与环境科学重点实验室, 山东青岛 266071)

(1. Marine Science and Engineering College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong, 266109, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China)

**摘要:**【目的】探讨九龙江口红树林湿地沉积物中总有机碳(TOC)和总氮(TN)的影响因素及来源, 加深对红树林湿地中碳和氮的生物地球化学过程的认识。【方法】测定九龙江口红树林湿地表层沉积物粒度、TOC和TN含量, 并对其分布特征进行分析。利用TOC/TN比值分析有机质来源及不同来源的贡献率。【结果】九龙江口红树林湿地沉积物中TOC和TN的含量分别为1.24%~3.81%和1.19~2.05 mg/g, TOC/TN比值为11.6~26.3, TOC、TN含量和TOC/TN的平面分布均呈现出由陆向海方向逐渐降低的趋势。沉积物中TOC和TN含量没有表现出明显的粒度效应。【结论】控制沉积物中TOC和TN含量分布的主要因素并不是粒度效应, 而可能是其来源。沉积物中TOC和TN的主要来源可能是红树林植物碎屑、养殖废水输入的有机碳和氮污染, 以及海洋浮游植物碎屑。

**关键词:** 沉积物 总有机碳 总氮 来源 红树林 九龙江口

**中图分类号:** X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2017)02-0075-07

**Abstract:**【Objective】In order to investigate the influencing factors and sources of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in mangrove wetland sediments, TOC and TN in mangrove sediments in the Jiulong River estuary were analyzed. This would increase the understanding about the biogeochemical processes of carbon and nitrogen in mangrove wetlands.【Methods】The sediment grain size, TOC and TN contents in surface sediments in the mangrove wetland in the Jiulong River estuary were analyzed, and their spatial distribution characteristics were investigated. TOC/TN ratios were used to analyze the sources of sediment organic matter and the contributions of different sources.【Results】Total organic carbon and TN concentrations and TOC/TN ratios in mangrove sediments ranged from 1.24%—3.81%, 1.19—2.05 mg/g and 11.6—26.3, respectively. As for the spatial distributions of TOC and TN concentrations and C/N ratios, they were all decreased gradually from land to

收稿日期: 2016-10-31

作者简介: 于宇(1986—), 女, 讲师, 主要从事海洋生物地球化学研究, E-mail: yuyu08@mails.ucas.ac.cn.

\* 国家自然科学基金项目(41406087), 国家海洋公益性项目(201205008)和青岛农业大学高层次人才科研基金项目(1114347)资助。

\*\* 通信作者。

ment organic matter and the contributions of different sources.【Results】Total organic carbon and TN concentrations and TOC/TN ratios in mangrove sediments ranged from 1.24%—3.81%, 1.19—2.05 mg/g and 11.6—26.3, respectively. As for the spatial distributions of TOC and TN concentrations and C/N ratios, they were all decreased gradually from land to

ward sea. **【Conclusion】**The major influencing factor of TOC and TN in mangrove sediments is not the grain size effect, but likely is the material source. The sources of TOC and TN in sediments likely are the mangrove detritus, organic carbon and nitrogen pollution from the aquaculture waste water and marine phytoplankton detritus.

**Key words:** sediment, total organic carbon, total nitrogen, source, mangrove, Jiulong River estuary

## 0 引言

**【研究意义】**红树林湿地生态系统具有高生产力的特点,通过潮汐的作用与其毗邻水域进行有机碳、氮、磷等营养盐的交换,是维持近海生物生产力的基础<sup>[1]</sup>。据估计,全球海洋中大于10%的陆源输入的溶解有机碳来自于红树林湿地<sup>[2]</sup>。红树林湿地同时是巨大的碳储库与碳汇,在全球碳循环中发挥着重要的作用<sup>[3]</sup>。沉积物是碳的重要埋藏地,研究红树林湿地沉积物中有机碳、氮的分布与影响因素,对了解其生物地球化学循环过程及生态作用具有重要的意义。**【前人研究进展】**九龙江口红树林是福建省面积最大、种类最多、生长最好的红树林分布区。关于九龙江口红树林湿地的研究中,余小青等<sup>[4]</sup>研究了沉积物中碳氮的平面分布,发现碳氮含量随着潮位升高而升高的分布特征。潘齐坤等<sup>[5]</sup>研究了九龙江口红树林湿地沉积物中氮的形态和分布特征,显示总氮中有约19%为可转化态,且可转化态与总氮含量同样呈现高潮位含量高的特征。**【本研究切入点】**目前对于影响九龙江口红树林湿地沉积物中有机碳和氮平面分布的影响因素,以及对于沉积物中碳、氮

的来源归宿仍缺乏深入的研究与探讨。**【拟解决的关键问题】**以九龙江口红树林湿地为研究对象,深入研究沉积物中总有机碳(TOC)和总氮(TN)的含量与分布特征,探讨沉积物中碳、氮的控制因素及其来源,加深对红树林湿地沉积物中有机碳、氮的生物地球化学循环过程的认识,为红树林湿地的环境管理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

九龙江是福建省的第二大河流,年平均入海径流量为 $1.48 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,流域面积 $1.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。九龙江口红树林保护区是福建省省级红树林保护区,是省内面积最大、种类最多的红树林分布区。研究区域位于九龙江口浒茂洲甘文片区的红树林湿地,主要树种为秋茄。

于2012年8月,在九龙江口红树林保护区布设4条断面(A、B、C、D),共采集10个表层沉积物样品(图1)。沉积物样品置于洁净的塑料密封袋中,带回实验室冷冻保存。

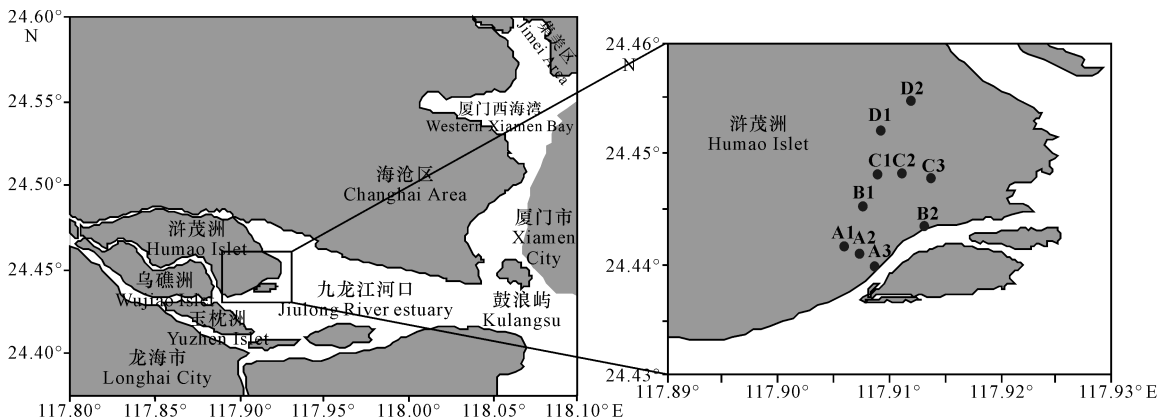


图1 九龙江口红树林湿地沉积物样品采样区域与采样点分布

Fig. 1 Study area and sampling sites in mangrove wetlands in the Jiulong River estuary

### 1.2 测定方法

沉积物样品于60℃烘干,用玛瑙研钵捣碎混匀,尽量保持样品的自然粒度<sup>[6]</sup>。取一定量沉积物样品,加纯水后超声分散,用激光粒度仪(Cilas 1190L)测定沉积物的粒度。根据沉积物粒度累积

百分含量,得到沉积物中值粒径(Median)及砂(0.063~2.000 mm)、粉砂(0.004~0.063 mm)和粘土(<0.004 mm)的含量。沉积物中值粒径用PHI值表示:

$$\text{Median}(\text{PHI}) = -\log_2 D_{50},$$

$D_{50}$  为累积百分含量达到 50% 时对应的粒径 (mm)。

用重铬酸钾氧化法测定表层沉积物中 TOC 的含量<sup>[7]</sup>; 用过硫酸钾氧化法测定表层沉积物中 TN 含量<sup>[8]</sup>。

用软件 SPSS19 对相关数据进行 Spears 相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物粒径分布特征

九龙江口红树林湿地沉积物的中值粒径、粘土、粉砂和砂含量范围如表 1 所示。九龙江口红树林湿地沉积物中值粒径为 6.73~7.41  $\Phi$ , 变异系数较小 (2.76%), 说明沉积物粒径差异较小, 研究区域内水动力环境条件较为一致。中值粒径分布与粘土含量分布相似 (图 2), B、D 断面沉积物中值粒径较高, 沉

积物颗粒较细, 与这两断面沉积物中粘土含量较高 (26.72%~35.28%) 相一致。

表 1 九龙江口红树林湿地沉积物的粒度特征

Table 1 Grain size characteristics of mangrove sediments in the Jiulong River estuary

项目 Items	范围 Range	均值 Mean ( $M \pm SD$ )	变异系数 Coefficient of variation (%)
中值粒径 Median	6.73~7.41 $\Phi$	(7.07 $\pm$ 0.20) $\Phi$	2.76
粘土 Clay	22.17%~35.28%	(27.77 $\pm$ 3.83)%	13.78
粉砂 Silt	64.72%~76.50%	(72.07 $\pm$ 3.61)%	5.00
砂 Sand	0.00%~1.29%	(0.17 $\pm$ 0.40)%	241.45
分选系数 Sort	2.39~3.16	2.72 $\pm$ 0.25	9.11

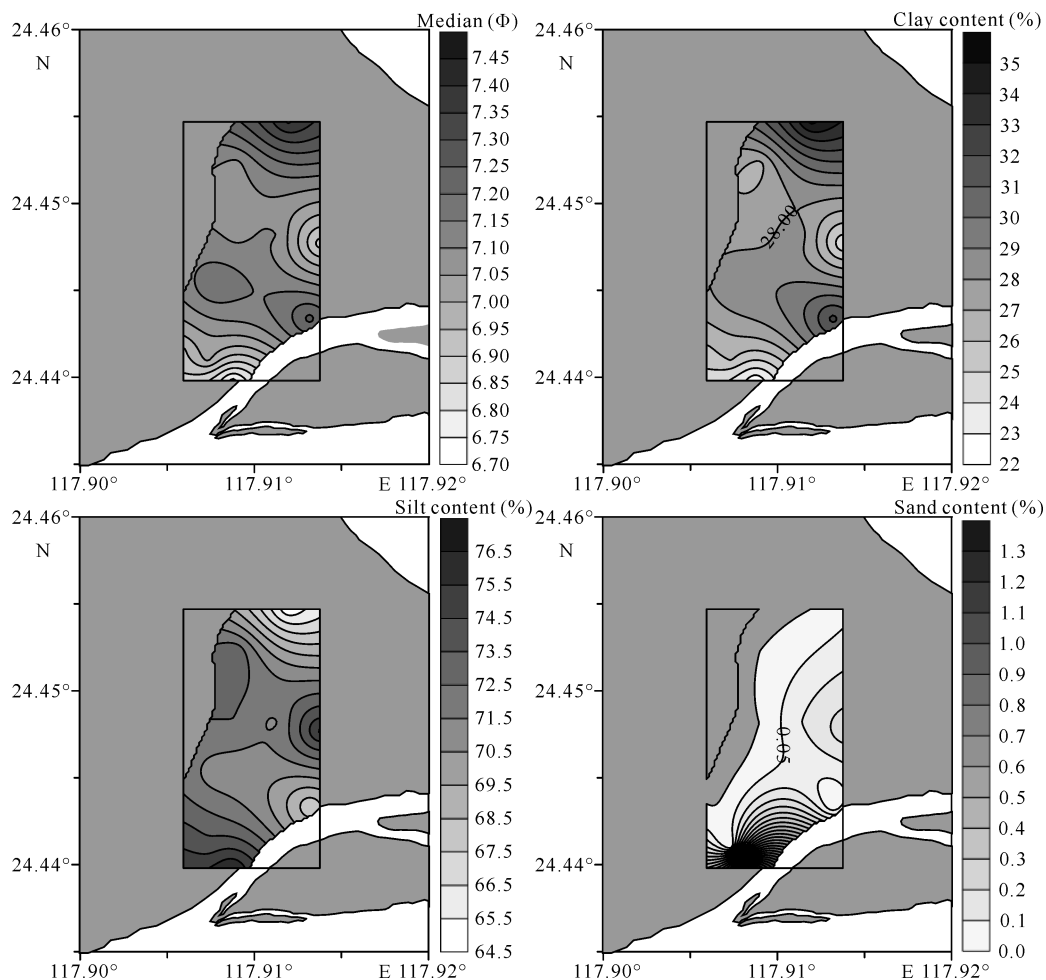


图 2 九龙江口红树林湿地沉积物的中值粒径、粘土、粉砂和砂含量的平面分布

Fig. 2 Spatial distributions of median and contents of clay, silt and sand in mangrove sediments in the Jiulong River estuary

沉积物中砂含量除站点 A3 外,范围为 0.00~0.18%,含量均极低,且变化小。站点 A3 砂含量较高(1.29%),与其它站点含量差异较大,可能是由测量失误所导致。沉积物中主要成分为粉砂(平均 74.64%),沉积物类型主要为粘土质粉砂,少部分站点(A1、A3 和 C3)粉砂含量高于 75.00%,沉积物为粉砂类型。A 和 C 断面沉积物中粉砂含量较高(平均 74.00%),B 和 D 断面中含量较低(平均 69.17%)。沉积物分选系数为 2.39~3.16,说明沉积物分选差<sup>[9]</sup>。

## 2.2 沉积物中营养盐含量与分布特征

九龙江口红树林沉积物中 TOC 和 TN 的含量范围如表 2 所示。TOC 含量的变异系数为 38.74%,TN 含量的变异系数为 19.06%。较之沉积物粒度,沉积物中 TOC 和 TN 含量的变异系数较大,表明研究区域沉积物中 TOC 和 TN 的含量变化较大。

与其它区域相比(表 2),九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC 含量与福建漳江口和广西大冠沙红树林湿地沉积物中含量相近,比广东湛江红树林中含量低。九龙江口红树林沉积物中 TN 含量与漳江口红树林中含量相近,高于广西大冠沙和广东湛江红树林湿地。将几个红树林湿地沉积物中 TOC、TN 含量与苏北潮滩和长江口崇明东滩沉积物中含量相比,红树林湿地沉积物中 TOC 和 TN 含量普遍较高,说明红树林湿地沉积物中有机质含量较其它类型潮滩的沉积物中含量高。同一流系内,九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC 和 TN 含量也要高于九龙江江东水库沉积物中的含量。这些均印证了红树林生态系统高生产力的特点<sup>[10]</sup>。

九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC 和 TN 的平面分布如图 3 所示,TOC 和 TN 的含量均表现出由东向西、陆向海方向逐渐降低的趋势。TOC 的最高值出现在 A1 站位(3.81%),TN 最高值出现在 B1 站位(2.05 mg/g)。沉积物中 TOC 和 TN 的这种分布趋势与余小青等<sup>[4]</sup>报道的红树林湿地沉积物中高潮位 C、N 含量高于中潮位和低潮位含量的分布趋势相一致。

表 2 不同研究区域的沉积物中 TOC 和 TN 含量比较

Table 2 TOC and TN contents in sediments from different study areas

研究区域 Study area	TOC (%)	TN (mg/g)	数据来源 Data source
九龙江口红树林湿地 Mangrove wetland in the Jiulong River estuary	1.24~3.81 (2.00±0.77)	1.19~2.05 (1.59±0.30)	本研究 This study
福建漳江口红树林湿地 Mangrove wetland in the Zhangjiang estuary	0.91~2.86	0.25~2.21	文献 Reference[11]
广西大冠沙红树林湿地 Mangrove wetland in Daguansha	2.26±1.84	0.45±0.34	文献 Reference[12]
广东湛江红树林湿地 Mangrove wetland in Zhanjiang	3.71±1.86	0.43±0.21	文献 Reference[12]
九龙江江东水库沉积物 Jiangdong reservoir sediment along the Jiulong River	0.91~1.78	0.95~1.60	文献 Reference[13]
苏北潮滩沉积物 Tidal flat sediment in the Northern Jiangsu	0.16~2.00	0.19~2.86	文献 Reference[14]
长江口崇明东滩 Chongming Dongtan in the Changjiang River estuary	0.1~0.7	0.14~0.78	文献 Reference[15]

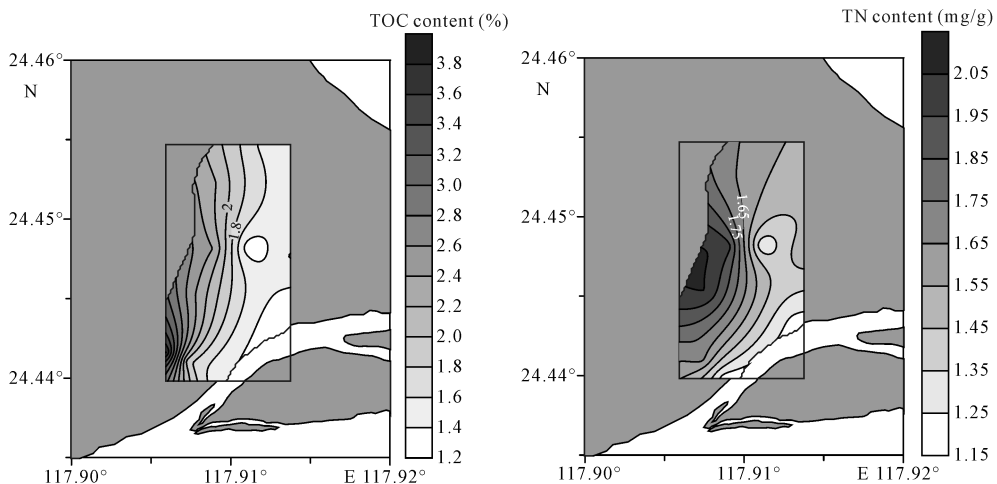


图 3 九龙江口红树林沉积物中 TOC 和 TN 的平面分布图

Fig. 3 Spatial distributions of TOC and TN contents in mangrove sediments in the Jiulong River estuary

### 2.3 沉积物中 TOC/TN 比值特征

九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC/TN 比值为 11.6~26.3, 均值  $14.5 \pm 4.5$ 。TOC/TN 比值的平面分布特征与 TOC、TN 的平面分布类似, 呈现出由陆向海方向 TOC/TN 值逐渐降低的趋势(图 4)。

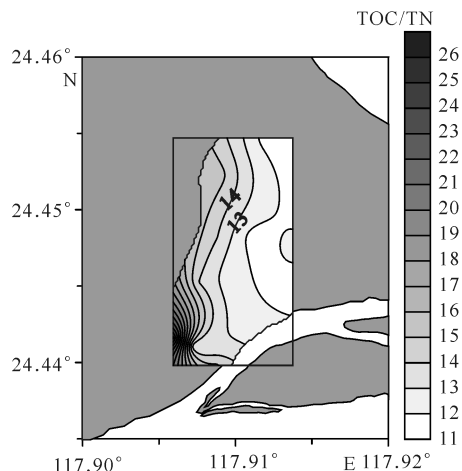


图 4 九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC/TN 值平面分布

Fig. 4 Spatial distribution of TOC/TN in mangrove sediments in the Jiulong River estuary

## 3 讨论

### 3.1 粒度效应

细颗粒物具有更大的比表面积, 能吸附更多的有机质、Fe/Mn 氧化物、粘土矿物等物质, 通常细颗粒物中有机碳、氮、磷的含量较高<sup>[16]</sup>。因此, 沉积物中 TOC 和 TN 含量的平面分布特征常常受到沉积物粒度效应的影响<sup>[17]</sup>。但在九龙江红树林湿地沉积物中, TOC 和 TN 含量与沉积物中值粒径、粘土、粉砂或砂含量的平面分布并不一致(图 2~3)。并且通过相关性分析, 只有 TN 与沉积物中泥含量(粘土与粉砂含量之和)表现出显著正相关( $R = 0.746, P < 0.01$ ), TOC 与泥含量的相关系数为 0.528, TOC、TN 与其它粒度参数间的相关性并不显著(表 3)。表明沉积物中 TOC 和 TN 只表现出微弱的细颗粒富集, 受到沉积物粒度效应的控制并不显著。

红树林有发达的根系及树枝的阻挡, 潮汐、波浪的能量因此大大损耗, 并使得红树林有很好的促淤功能。九龙江红树林沉积物中各粒度参数的变异系数均较小(中值粒径、粘土和粉砂的变异系数分别为 2.76%、13.87% 和 5.00%), 说明沉积物的粒径差异较小, 水动力环境的空间变化较小。并且沉积物

的分选系数表明沉积物的分选较差。说明红树林中沉积物受到潮汐、波浪的冲刷和分选作用较弱。在水动力对沉积物的分选改造作用很弱的情况下, 沉积物中的 TOC 和 TN 含量没有表现出显著的粒度效应是合理的, 说明粒度效应并不是控制红树林湿地沉积物中营养盐含量的主要因素。另外, 沉积物中 TOC 和 TN 的平面分布特征可能主要由其物质来源决定, 而其主要来源可能与沉积物中细颗粒的来源并不一致, 这可能是沉积物中 TOC 和 TN 的粒度效应表现较弱的另一原因。

表 3 九龙江口湿地沉积物中 TOC 和 TN 含量与沉积物粒度参数的相关性系数

Table 3 Correlation coefficients between sediment TOC and TN contents and sediment grain size parameters in the Jiulong River estuary

粒度参数 Grain size parameters	TOC	TN
中值粒径 Median	-0.016	0.268
粘土含量 Clay content	-0.308	-0.154
粉砂含量 Silt content	0.517	0.473
砂含量 Sand content	-0.529	-0.747**
泥含量 Mud content	0.528	0.746**

注: \*\* 在 0.01 水平上显著相关, 泥含量等于粘土与粉砂之和

Note: \*\* significantly correlated at 0.01 level, mud content is the sum of clay and silt contents

### 3.2 沉积物中营养盐的来源

九龙江口红树林沉积物中 TOC 和 TN 含量呈现出相似的分布趋势, 即含量由陆向海逐渐降低。同时, 沉积物中 TOC 与 TN 含量间存在显著相关性, 相关系数  $R$  为 0.778 ( $P < 0.01$ ), 说明沉积物中 TOC 与 TN 的分布和性质较为相似。TOC 和 TN 含量由陆向海逐渐降低的分布趋势, 说明沉积物中的有机质可能主要来源于红树林。红树林凋落物被分解成可溶性或不可溶的有机物碎屑, 被河口和邻近海域的异养生物利用, 是红树林生态系统中碎屑食物链的基础。红树林产生有机质使得林内沉积物中 TOC 和 TN 含量较高。沉积物中 TOC 和 TN 含量越向海端越低, 很可能说明沉积物中 C 和 N 存在向海水迁移的趋势。潮位越低沉积物与海水的接触时间越长、频率越高, 沉积物中有机碳、氮向海水中迁移的量越多, 使得沉积物中 TOC 和 TN 含量降低。邱悦等<sup>[18]</sup> 通过研究九龙江口红树林沉积物



与潮水的营养盐交换,发现沉积物具有向毗邻水域输出和溶解颗粒有机碳的作用,印证了本研究的上述推测,表明红树林沉积物是邻近河口水体中有机碳和氮的源。

海洋浮游藻类也是红树林生态系统中重要的初级生产力<sup>[19]</sup>,因此也是红树林沉积物中有机质的重要来源。藻类富含蛋白质而缺乏纤维素,而脉管类等陆地高等植物体内纤维素含量高,蛋白质含量较低。因此海洋植物有机质 C/N 比较低,通常在 4~10 左右;而陆地植物有机质物 C/N 较高,通常大于 20 或更高<sup>[20]</sup>。据报道,广西茅尾海红树林衰老的叶片中的 C/N 值为 25.3~68.3,平均值 37.4<sup>[21]</sup>。九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC/TN 的比值范围(11.6~26.3)介于红树林植物和海洋浮游植物的 TOC/TN 值之间,表明沉积物中有机质可能为红树林植物碎屑和海洋浮游植物碎屑的混合来源。

如果仅考虑红树林碎屑和海洋浮游植物碎屑作为沉积物中有机质来源,可应用一个有机质 C/N 的二元混合模型,大致估算红树林植物碎屑和海洋浮游植物碎屑二个端元分别对沉积物中有机质的贡献率<sup>[22]</sup>。海洋浮游藻类与红树林植物碎屑有机质 C/N 代表值分别取 7 和 37 进行计算。结果显示,红树林植物碎屑的贡献率为 35.7%~84.7%,平均值 74.9%,海洋浮游植物碎屑贡献率为 15.3%~64.3%,平均值 25.1%。总体而言,红树林植物的贡献要高于海洋浮游植物的贡献。TOC/TN 比值由陆向海方向逐渐降低,可能表明越向海方向,红树林碎屑所贡献的比例降低,而海洋浮游植物碎屑所贡献的比例升高。

另一方面,九龙江口甘文红树林保护区东部,一堤之隔,是密布的鱼、虾、蟹等海水养殖区。海水养殖过程中大量投放的饵料和养殖动物的代谢产物进入沉积物或悬浮于水中,致使养殖水体中氮、磷等营养要素和有机物含量猛增,水体富营养化严重<sup>[23-24]</sup>。海水养殖区通过海水的涨潮落潮进行换水,将氮、磷、有机质含量高的养殖废水排放到近岸水体。因此红树林东部的海水养殖区的有机质和氮污染物的排放,可能是红树林沉积物中有机碳和氮的另一个重要来源,并造成了红树林沉积物中较高含量的 TOC 和 TN,及其由东向西、由陆向海方向含量逐渐降低的分布趋势。但是,因对于养殖废水中颗粒态有机质的 C/N 比值尚不清楚,如要考虑养殖废水输入对于沉积物中有机质的贡献率,仍需进一步的调查研究。

## 4 结论

九龙江口红树林湿地沉积物中 TOC 和 TN 的含量分别为 1.24%~3.81% 和 1.19~2.05 mg/g,均值分别为(2.00±0.77)% 和(1.59±0.3) mg/g, TOC/TN 比值范围为 11.6~26.3,均值 14.5±4.5。红树林沉积物中 TOC、TN 含量与 TOC/TN 比值的平面分布呈现出由东向西、由陆向海方向逐渐降低的趋势。

沉积物中 TOC 和 TN 含量与沉积物的中值粒径、粘土和粉砂含量等粒径参数具有不同的分布趋势,且相关性较差,可见在九龙江口红树林湿地中,粒度效应并不是控制沉积物中 TOC 和 TN 含量分布的主要因素。这可能是由红树林中水动力弱、沉积物分选差造成的,也可能与沉积物中有机碳和氮的来源与细颗粒沉积物的来源并不一致有关。

根据沉积物中 TOC 和 TN 含量的平面分布以及 C/N 比值,推断红树林湿地沉积物中有机碳和氮的主要来源可能是红树林植物碎屑、红树林东部海水养殖区排放的有机碳和氮污染物输入,以及海洋浮游植物碎屑。

### 参考文献:

- [1] DITTMAR T, LARA R J. Do mangroves rather than rivers provide nutrients to coastal environments south of the Amazon River? Evidence from long-term flux measurements[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 213: 67-77.
- [2] DITTMAR T, HERTKORN N, KATTNER G, et al. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1): GB1012.
- [3] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1153-1159.  
ZHANG L, GUO Z H, LI Z Y. Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: Research progress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1153-1159.
- [4] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3739-3747.  
YU X Q, YANG J, LIU L M, et al. Spatial variations of biogenic elements in coastal wetland sediments of the Jiulong River estuary [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11): 3739-3747.

- [5] 潘齐坤, 罗专溪, 邱昭政, 等. 九龙江口湿地表层沉积物氮的形态分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, 24(6): 673-678.  
PAN Q K, LUO Z X, QIU Z Z, et al. Distribution characteristics of nitrogen forms in surface sediments of Jiulongjiang estuary wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(6): 673-678.
- [6] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷[J]. 海洋科学, 2000, 24(7): 42-45.  
SONG J M. Transferable phosphorus in sediments of the Huanghe River estuary adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2000, 24(7): 42-45.
- [7] 国家海洋局. 海洋监测规范: 第 5 部分 沉积物分析: GB 17378.5-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring — Part 5: Sediment analysis: GB 17378.5-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [8] 国家海洋局. 海洋调查规范: 第 4 部分 海水化学要素调查: GB/T 12763.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
State Oceanic Administration. Specifications for oceanographic survey—Part 4: Survey of chemical parameters in sea water: GB/T 12763.4-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [9] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [10] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
LIN P. Mangrove ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [11] 张祥霖, 石盛莉, 潘根兴, 等. 互花米草入侵下福建漳江口红树林湿地土壤生态化学变化[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 974-981.  
ZHANG X L, SHI S L, PAN G X, et al. Changes in eco-chemical properties of a mangrove wetland under spartina invasion from Zhangjiangkou, Fujian, China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 974-981.
- [12] 袁彦婷, 丁振华, 张玲, 等. 土地利用方式改变对红树林沉积物中营养元素含量的影响[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 385-390.  
YUAN Y T, DING Z H, ZHANG L, et al. Impact of different land use modes on nutrients of sediments from mangrove wetlands of China[J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 385-390.
- [13] 苏玉萍, 钟燕平, 林佳, 等. 福建省九龙江江东区沉积物微藻分布研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2389-2396.  
SU Y P, ZHONG Y P, LIN J, et al. Research on seasonal microalgae community structure in the sediments of Jiandong Reservoir in Jiulong River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(7): 2389-2396.
- [14] 高建华, 白凤龙, 杨桂山, 等. 苏北潮滩湿地不同生态带碳、氮、磷分布特征[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 756-765.  
GAO J H, BAI F L, YANG G S, et al. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments from different ecologic zones of tidal flats in north Jiangsu Province[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 756-765.
- [15] 周俊丽. 长江口湿地生态系统中有机的生物地球化学过程研究——以崇明东滩为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.  
ZHOU J L. Biogeochemical processes of organic materials in the salt marsh of the Changjiang Estuary—Illustrated by the salt marsh in the Chongming Island [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.
- [16] JENSEN H S, THAMDRUP B. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction[J]. Hydrobiologia, 1993, 253(1/2/3): 47-59.
- [17] YU Y, SONG J M, LI X G, et al. Environmental significance of biogenic elements in surface sediments of the Changjiang Estuary and its adjacent areas[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(11): 2185-2195.
- [18] 邱悦, 叶勇. 九龙江口红树林与毗邻水域营养盐和有机碳的潮水交换[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(5): 718-721.  
QIU Y, YE Y. Exchanges of nutrients and organic carbon between mangrove forest and its adjacent water area through tide actions in Jiulongjiang estuary[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2013, 52(5): 718-721.
- [19] BOUILLON S, KOEDAM N, RAMAN A, et al. Primary producers sustaining macro-invertebrate communities in intertidal mangrove forests[J]. Oecologia, 2002, 130(3): 441-448.

- 现状与评价[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1):45-48.
- LI G L, CUI Y, CHEN B J, et al. Status and evaluation on nutrients in Laizhou Bay in Autumn[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(1):45-48.
- [6] 夏斌, 张晓理, 崔毅, 等. 夏季莱州湾及附近水域理化环境及营养现状评价[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(3):103-111.
- XIA B, ZHANG X L, CUI Y, et al. Evaluation of the physicochemical environment and nutrition status in Laizhou Bay and adjacent waters in Summer[J]. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(3):103-111.
- [7] 单志欣, 郑振虎, 邢红艳, 等. 渤海莱州湾的富营养化及其研究[J]. 海洋湖沼通报, 2000(2):41-46.
- SHAN Z X, ZHENG Z H, XING H Y, et al. Study on eutrophication in Laizhou Bay of Bohai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2000(2):41-46.
- [8] 纪大伟, 杨建强, 高振会, 等. 莱州湾西部海域枯水期富营养化程度研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(5):427-429, 445.
- JI D W, YANG J Q, GAO Z H, et al. Eutrophication assessment in western sea area of Laizhou Bay in dry-period[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(5):427-429, 445.
- [9] 刘义豪, 杨秀兰, 靳洋, 等. 莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(4):1-5.
- LIU Y H, YANG X L, JIN Y, et al. Distribution and inter-annual variation of nutrients in Laizhou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(4):1-5.
- [10] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- State Environmental Protection Administration of Environmental Engineering Assessment Center. Compilation of technical guidelines and standards for environmental impact assessment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [11] 孙丕喜, 王波, 张朝辉, 等. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3):229-335.
- SUN P X, WANG B, ZHANG Z H, et al. Relationship between nutrient distributions and eutrophication in seawater of the Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3):229-335.
- [12] 石晓勇, 史致丽, 于恒, 等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨- I. 黄河口悬浮物对磷酸盐的吸附-解析研究[J]. 海洋与湖沼, 1993, 30(2):192-198.
- SHI X Y, SHI Z L, YU H, et al. Phosphate buffer-mechanisms in the Hanghe River estuary I. The adsorption and desorption of phosphate by suspended mater[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 30(2):192-198.
- [13] 高会旺, 吴德星, 白洁, 等. 2000年夏季莱州湾生态环境要素的分布特征[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(2):185-191.
- GAO H W, WU D X, BAI J, et al. Distributions of environmental parameters in Laizhou Bay in Summer, 2000[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(2):185-191.
- [14] 国家海洋局北海分局. 2011年北海区海洋环境公报[R]. 国家海洋局北海分局, 2012.
- North China Sea Branch of State Oceanic Administration. The marine environment bulletin of North China Sea in 2011[R]. North China Sea Branch of State Oceanic Administration, 2012.

(责任编辑:米慧芝)

(上接第 81 页 Continue from page 81)

- [20] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(2):261-289.
- [21] MENG X W, XIA P, LI Z, et al. Mangrove degradation and response to anthropogenic disturbance in the Maowei Sea (SW China) since 1926 AD: Mangrove-derived OM and pollen[J]. Organic Geochemistry, 2016, 98:166-175.
- [22] 于宇, 宋金明, 李学刚, 等. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J]. 生态学报, 2012, 32(5):1623-1632.
- YU Y, SONG J M, LI X G, et al. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5):1623-1632.
- [23] 崔毅, 陈碧鹃, 陈聚法. 黄渤海海水养殖自身污染的评价[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1):180-185.
- CUI Y, CHEN B J, CHEN J F. Evaluation on self-pollution of marine culture in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1):180-185.
- [24] 贾晓平, 蔡文贵, 林钦. 我国沿海水域的主要污染问题及其对海水增养殖的影响[J]. 中国水产科学, 1997, 4(4):79-82.
- JIA X P, CAI W G, LIN Q. The effects of major pollutions on mariculture and fishery resource enhancement along the coastal waters of China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1997, 4(4):79-82.

(责任编辑:陆雁)