

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20201211002

http://www.yykxjz.cn/

聂梦晨, 黄翠玲, 隋琪, 邹立, 朱琳, 孙雪梅, 赵信国, 夏斌, 陈碧鹃, 曲克明. 桑沟湾沉积物有机质的碳氮稳定同位素分析及其来源解析. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 84-97

NIE M C, HUANG C L, SUI Q, ZOU L, ZHU L, SUN X M, ZHAO X G, XIA B, CHEN B J, QU K M. Carbon and nitrogen stable isotope analysis and source identification of organic matter in sediments of Sanggou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 84-97

桑沟湾沉积物有机质的碳氮稳定同位素 分析及其来源解析*

聂梦晨^{1,2,3} 黄翠玲⁴ 隋琪^{1,2} 邹立¹ 朱琳^{2,3}
孙雪梅^{2,3} 赵信国^{2,3} 夏斌^{2,3①} 陈碧鹃^{2,3} 曲克明²

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院 山东 青岛 266003; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所
农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室
海洋生态与环境科学功能实验室 山东 青岛 266071; 4. 通标标准技术服务(青岛)有限公司 山东 青岛 266101)

摘要 本研究分析了桑沟湾表层沉积物的粒度、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、碳和氮稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)的时空分布特征,估算了贝藻生物沉积对近海沉积物有机质的贡献。结果显示,桑沟湾沉积物成分组成以粉砂为主,且粒径分布与海水养殖和水动力学条件密切相关;TOC、TN的季节变化和平面分布均呈相似性,数值上总体表现为春季最高,秋季最低,季节差异不大,在贝藻、鱼贝和贝类养殖区域出现较高值;而 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的季节变化和平面分布有较大差异。从相关性分析可以看出,TOC和TN呈极显著正相关($r=0.955, P<0.001$),表明桑沟湾表层沉积物的TOC和TN具有同源性。根据对 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N的综合分析表明,贝类生物沉积、海带(*Saccharina japonica*)和土壤有机质是桑沟湾沉积物有机质的主要来源。采用三元混合模型估算得到贝类生物沉积贡献率为67.52%,土壤有机质贡献率为26.47%,海带贡献率为5.97%。研究表明,海洋贝藻生物沉积对近海碳埋藏具有显著影响。

关键词 海水养殖;桑沟湾;有机质;稳定同位素;来源

中图分类号 S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)05-0084-14

海洋具有地球上最大的碳汇功能,在调节全球气候变化中发挥着重要作用。开展近海养殖,从而增加海洋碳汇是应对全球气候变化的一条新的科学途径(张永雨等,2017)。近海养殖区沉积物中总有机碳(TOC)的储存是其从生物圈向地圈迁移的主要途径,有助于调节全球碳循环(Walsh *et al.*, 1981)。贝类通过

生物沉积作用加速近海养殖区水体中的颗粒物向沉积环境的输送,桑沟湾养殖的栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)通过生物沉积作用,每年碳的沉积量达 8.71×10^4 t(张明亮等,2011)。碳沉积是养殖碳汇的重要组成部分,也是以往研究中易被遗漏的部分。所以,解析海水养殖区沉积物中有机质的来源,对于阐明海水养殖对近

* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0900703)和中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD12)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFD0900703), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD12)]. 聂梦晨, E-mail: niemc1030@163.com

① 通讯作者:夏斌,研究员, E-mail: xiabin@ysfri.ac.cn

收稿日期:2020-12-11, 收修改稿日期:2021-01-08

海碳循环的影响具有重要意义(Bauer *et al.*, 2013)。碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)是一种可靠的地球化学指标,可以用来指示有机质的来源,有机碳氮摩尔比(C/N)和氮稳定同位素($\delta^{15}\text{N}$)受成岩作用的影响,也可以作为辅助指标(Zhang *et al.*, 2009)。因此,通常将 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 进行联合用来分析有机质的来源。

我国是世界上养殖规模最大的国家,其中,贝藻养殖占主要部分,2019年贝、藻养殖产量为1 712.33万t,占全国水产养殖产量的33.71%,贝藻养殖面积为1 345 990 hm^2 ,占全国海水养殖面积的67.56% (农业农村部渔业渔政管理局, 2020)。养殖藻类通过光合作用直接吸收海水中的 CO_2 ,促进并加速了大气 CO_2 向海水中扩散,从而减少大气中的 CO_2 含量。而养殖贝类在生长过程中,直接吸收海水中的碳酸氢根转化形成 CaCO_3 的外壳。所以,海水贝藻养殖具有高效的“固碳”作用(唐启升等, 2016)。

桑沟湾位于山东省荣成市东岸,是我国北方海域典型的贝、藻养殖基地。已有研究表明,桑沟湾海藻的光合作用可以去除海水中的无机碳,降低溶解无机碳和二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)水平,提高 pH_7 值;相反,双壳贝类的呼吸作用会释放 CO_2 到海水中,增加溶解无机碳和 $p\text{CO}_2$ 水平,同时,降低 pH_7 水平。所以,海藻和贝类养殖对海水碳酸盐系统产生了影响(Li *et al.*, 2020),但关于贝、藻生物沉积对近海碳循环的影响研究还很少(Xia *et al.*, 2018)。本研究以桑沟湾为研究区域,分析了该海湾不同区域沉积物的粒度、TOC、总氮(TN)、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 时空分布特征,阐明了沉积物有机质的主要来源,并对贝、藻生物沉积对有机质的贡献进行了定量分析和讨论,为阐明海洋贝、藻养殖对近海碳循环的贡献提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

桑沟湾是位于山东半岛东端的浅层半封闭海湾($37^\circ 01' \sim 37^\circ 09' \text{N}$, $122^\circ 24' \sim 122^\circ 35' \text{E}$)。海湾的总面积约为144 km^2 ,海湾基底平坦,地形从中央向外部海岸加深,平均水深约为7.5 m,潮流主要为半日分潮(赵俊等, 1996)。桑沟湾用于水产养殖已有40余年的历史,是中国北方重要的海水养殖基地。桑沟湾近2/3的区域用于贝藻养殖,海带(*Saccharina japonica*)年产量估计高达84 500 t(毛玉泽等, 2018),贝类的年产量约为10万t(Zhang *et al.*, 2009)。栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)和长牡蛎(*Ostrea gigas*)在每年5月开始养殖,养殖周期大约为2年,同时,海带在每年11月播种,次

年5月下旬收获。网箱养殖品种主要为大黄鱼(*Larimichthys crocea*)和许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*),放养期一般从5—10月。

1.2 现场采样

2019年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和12月(冬季)对桑沟湾进行科研调查,共布设21个站位(图1)。其中,D1、D2和D3位于外海海域(OA),D4位于交错带区域(TT),D5、D6、D7、D9和D10位于海藻养殖区(SW),D8、D11和D14位于贝藻混养区(SF-SW),D15、D16和D18位于鱼贝混养区(F-SF),D12、D13、D17、D19、D20和D21位于贝类养殖区(SF)。使用Van Veen抓斗式采泥器采集表层沉积物(0~2 cm),采集完成后,样品放入密封的聚乙烯封口袋中,并立即存放入装满冰块的培养箱中,迅速将样品运送到实验室,并在 -20°C 下冷冻保存,用于测定沉积物的粒度、TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 。由于天气原因,4月的D10站、7月的D3、D4和D21站、12月的D4站未采集到沉积物样品。

1.3 分析方法

先使用真空冷冻干燥机对沉积物样品进行真空冷冻干燥,再将干燥完的样品取出一部分用于粒度检测,一部分用于TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的检测。沉积物粒度采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., 英国)进行测定。沉积物样品在仪器分析前,通过超声波振荡30 s进行均质。粒度分为5类:黏土($<4 \mu\text{m}$)、粉砂($4 \sim 63 \mu\text{m}$)、极细砂($63 \sim 125 \mu\text{m}$)、细砂($125 \sim 250 \mu\text{m}$)和中砂($250 \sim 500 \mu\text{m}$)。然后,使用1 mol/L HCl处理0.2 g沉积物以去除无机碳,之后采用去离子水冲洗,直到滤液pH呈中性,并在 -60°C 冷冻干燥。使用元素分析仪(VARIO EL Cube, 德国)和稳定同位素质谱仪(Thermo MAT253, 美国)对样品进行分析,分别测定TOC、TN含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成。同位素比率使用 δ 符号表示,并根据以下公式(Gu *et al.*, 2018)计算:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 或 } \delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中, R_{sample} 值和 R_{standard} 值分别为样品和标准品的相应比值($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)。根据实测的TOC和TN计算出沉积物样品的C/N值, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的分析误差分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$;TOC和TN的测量精度分别为 $\pm 0.02\text{‰}$ 和 $\pm 0.03\text{‰}$ 。

1.4 统计分析

使用Excel 2010软件整理分析数据,采用Surfer 13.0软件绘制站位图和等值线图,并采用IBM SPSS

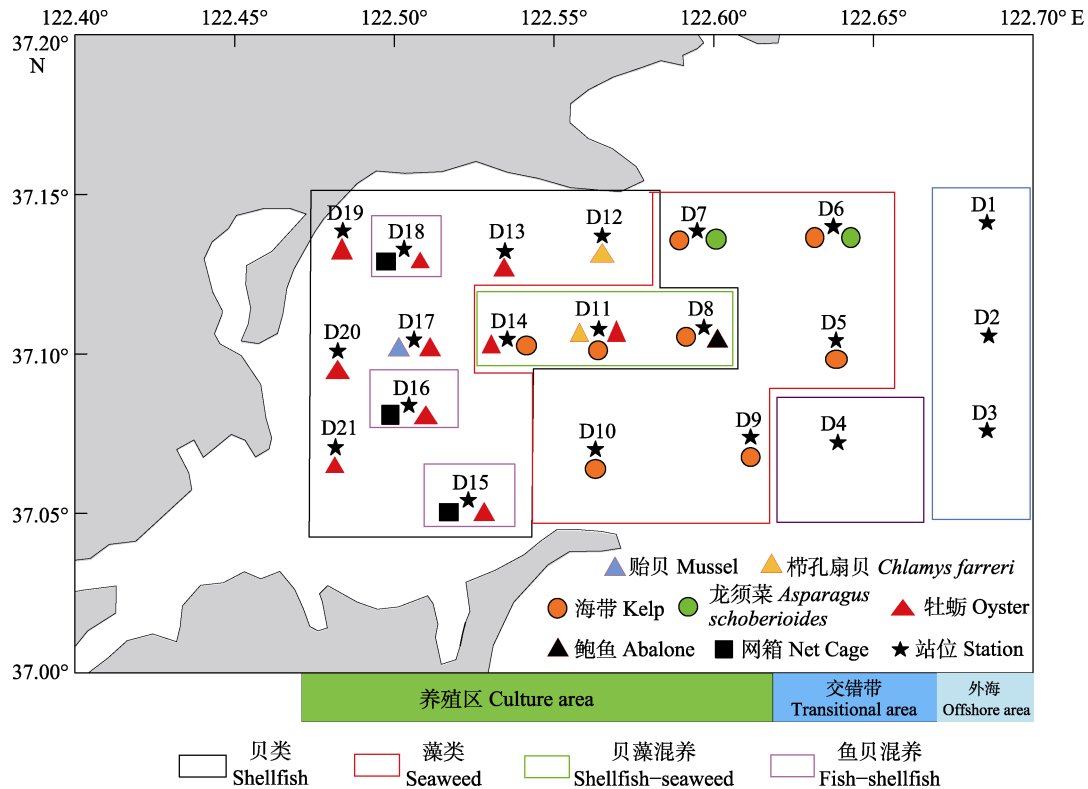


图 1 桑沟湾采样点位置
Fig.1 Sampling stations in Sanggou Bay

Statistics 25.0 统计软件进行皮尔逊相关分析和显著差异性检验。

2 结果与讨论

2.1 沉积物粒度分布

从表 1 可以看出, 4、7、10 和 12 月桑沟湾表层沉积物的平均中值粒径分别为(21.74±9.93)、(22.23±7.17)、(24.24±7.54) 和(27.10±14.79) μm , 12 月最大, 4 月最小。其中, OA、TT、SW、SF-SW、F-SF 和 SF 区域 4 个季节表层沉积物的平均粒径分别为(24.40±5.57)、(28.97±3.20)、(24.72±8.10)、(22.52±7.44)、(18.59±9.65)和(25.96±14.66) μm (图 2A)。TT 区域的平均粒径最大, F-SF 区域的最小。从表层沉积物粒度组成来看, 粉砂在各区域均占主导地位, 4、7、10 和 12 月所占比例分别为 72.26%、71.97%、73.17%和 68.98%, 其次是黏土和极细砂(图 2B)。沉积物的粒度分布特征主要受控于物源和沉积。桑沟湾大部分区域为养殖区域, 与天然沉积物相比, 生物沉积导致沉积物具有更细小的结构(Biggs *et al.*, 1984; Franzo *et al.*, 2014)。此外, 桑沟湾的水交换能力较弱。史洁等(2009)研究发现, 桑沟湾养殖活动导致湾口的流速减小 40%, 整个海湾平

均半交换时间增加 71%。所以, 桑沟湾沉积物的粒度分布与海水养殖和水动力条件有关。

2.2 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的时空分布特征

桑沟湾沉积物 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 结果见表 1。从表 1 可以看出, 4、7、10 和 12 月沉积物 TOC 的平均值分别为(0.42±0.17)%、(0.42±0.18)%、(0.37±0.16)%和(0.40±0.24)%; 4、7、10 和 12 月沉积物 TN 的平均值分别为(0.071±0.024)%、(0.067±0.021)%、(0.053±0.019)%和(0.054±0.027)%。TOC 和 TN 季节变化呈现出相似性, 总体表现为春季最高, 秋季最低, 季节差异不大。从平面分布进行分析(图 3), 桑沟湾沉积物 TOC 和 TN 呈现出相似分布趋势, 在 SF-SW、F-SF 和 SF 区域出现较高值。4 月呈现从外海向养殖区增加的趋势(图 3A 和图 3B); 7 月呈从外海向 SF-SW 区增加的趋势(图 3D 和图 3E); 10 月呈现出从北向南逐渐增加的趋势(图 3G 和图 3H); 而在 12 月呈现从四周向 SF 区递增的趋势(图 3J 和图 3K)。这主要是由于桑沟湾养殖密度大, 养殖品种产量高, 鱼、贝排泄物和海带碎屑会积累在表层沉积物中(Sui *et al.*, 2019)。此外, SF 区域的 TOC 和 TN 在 4 和 7 月含量相对较高(图 4A 和图 4B), 这主要因为在适宜的环境温度下, 贝藻

表 1 桑沟湾表层沉积物的粒度、TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 分布
Tab.1 The grain size, TOC, TN, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and C/N in surface sediment of Sanggou Bay, China

时间 Time	区域 Area	站点 Station	中值粒径 Median grain size/ μm		百分比 Percentage/%			粉砂 Silt 4~63 μm		黏土 Clay <4 μm		总有机碳 TOC/%		总氮 TN/%		碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$		氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}\text{‰}$		碳/氮 C/N	
			数值 Value	平均 Mean	中砂 Medium sand 250~500 μm	细砂 Fine sand 125~250 μm	极细砂 Very fine sand 63~125/ μm	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean
2019-04	OA	D1	14.61	22.65	0.78	0.34	4.41	73.53	20.94	0.48	0.34	0.075	0.059	-22.28	-22.35	3.12	1.34	7.38	6.67		
		D2	23.13		0	0	8.95	74.55	16.50	0.25	0.047			-22.27		-0.17		6.23			
		D3	30.2		0	0.03	14.15	73.21	12.61	0.30	0.055			-22.49		1.05		6.40			
	TT	D4	26.71	26.71	1.27	0.01	10.16	73.32	15.23	0.31	0.057	0.057	0.057	-22.31	-22.31	1.14	1.14	6.42	6.42		
	SW	D5	19.03	26.90	0	0.03	6.43	74.70	18.83	0.31	0.056	0.058	0.058	-22.55	-22.08	0.93	-0.72	6.43	6.44		
		D6	27.92		1.39	0.17	11.51	73.22	13.30	0.31	0.056			-22.36		2.07		6.41			
		D7	18.47		1.22	0.72	5.57	74.35	18.12	0.43	0.076			-21.44		2.55		6.59			
		D9	42.19		0.70	1.50	23.64	66.62	7.53	0.23	0.043			-21.98		-8.45		6.31			
		D10	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SF-SW	D8	35.02	22.51	0.54	0.94	18.30	69.88	10.33	0.25	0.41	0.044	0.068	-22.29	-22.20	0.59	2.79	6.48	6.86		
		D11	18.31		0	0	6.11	75.62	18.27	0.46	0.075			-22.12		3.77		7.09			
		D14	14.21		0	0	3.30	76.61	20.10	0.51	0.085			-22.19		4.01		7.00			
	F-SF	D15	9.74	17.08	0	0.61	2.28	70.54	26.56	0.55	0.54	0.089	0.090	-22.14	-21.93	4.15	4.81	7.17	6.60		
		D16	8.38		0	0.38	2.70	70.01	26.90	0.90	0.143			-21.68		5.35		7.33			
		D18	33.13		0.88	0.52	17.62	67.50	13.48	0.17	0.037			-21.97		4.92		5.30			
	SF	D12	18.51	18.97	0.84	0.04	6.70	73.58	18.85	0.44	0.48	0.074	0.080	-22.19	-21.79	2.36	3.87	6.90	6.92		
		D13	14.75		0.85	0.65	4.62	72.48	21.40	0.53	0.088			-21.99		3.84		7.02			
		D17	26.11		0	0.02	11.60	73.01	15.37	0.41	0.069			-22.17		3.48		6.87			
		D19	34.71		0.60	1.57	18.94	69.12	9.78	0.39	0.069			-21.41		3.49		6.65			
		D20	6.27		0	0.05	12.57	71.92	15.46	0.47	0.081			-21.24		5.08		6.74			
		D21	13.49		0.73	0.08	4.95	71.42	22.82	0.63	0.100			-21.74		4.98		7.35			

续表 1

时间 Time	区域 Area	站点 Station	中值粒径 Median grain size/ μm			百分比 Percentage/%			总有机碳 TOC/%		总氮 TN/%		碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$		氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}\text{‰}$		碳/氮 C/N		
			数值 Value	平均 Mean	中砂 Medium sand 250~500 μm	细砂 Fine sand 125~250 μm	极细砂 Very fine sand 63~125/ μm	粉砂 Silt 4~63 μm	黏土 Clay <4 μm	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean
2019-07	OA	D1	28.13	25.67	1.70	2.25	13.26	68.57	14.21	0.34	0.32	0.058	0.055	-22.47	-22.51	3.15	2.80	6.89	6.79
		D2	23.21		0	0.18	9.51	73.97	16.34	0.30		0.053		-22.55		2.46		6.68	
		D3	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TT	D4	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SW	D5	31.83	24.03	0.42	0.18	15.79	72.50	11.10	0.25	0.43	-	0.076	-22.60	-22.32	-	3.82	-	7.16
		D6	27.22		2.93	0.03	11.05	71.77	14.21	0.37		0.054		-22.72		3.42		7.98	
		D7	19.12		3.50	0.05	6.13	71.93	18.40	0.59		0.095		-22.05		4.17		7.28	
		D9	31.21		0.36	0.61	14.61	73.38	11.03	0.27		0.052		-22.25		3.06		6.14	
		D10	10.78		1.40	0.02	2.03	72.12	24.44	0.65		0.104		-21.99		4.62		7.24	
	SF-SW	D8	32.07	24.43	0	0	13.61	76.82	9.58	0.24	0.36	0.042	0.061	-22.24	-22.31	2.22	3.21	6.67	6.87
		D11	24.04		0.53	1.62	8.19	75.22	14.44	0.38		0.064		-22.31		3.55		6.98	
		D14	17.17		0	0	4.09	77.74	18.17	0.46		0.077		-22.39		3.87		6.96	
	F-SF	D15	20.33	20.48	0	0	9.23	70.64	20.14	0.46	0.31	0.058	0.058	-24.00	-23.89	8.88	9.65	9.23	8.59
		D16	28.26		0.81	1.71	11.79	68.97	16.72	0.40		0.059		-23.78		10.41		7.95	
		D18	12.86		0.45	2.32	4.93	69.63	22.67	0.06		-		-		-		-	
	SF	D12	26.94	18.78	7.28	1.36	9.99	67.26	14.12	0.41	0.54	0.070	0.072	-22.11	-22.40	3.89	5.08	6.82	7.68
		D13	17.42		0	0	5.33	76.56	18.11	0.66		0.105		-22.06		4.96		7.34	
		D17	23.87		7.43	0.23	8.16	68.18	16.00	0.32		0.041		-23.88		11.76		8.89	
		D19	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		D20	9.51		0.34	1.36	4.27	66.96	27.07	0.78		-		-21.87		0.36		-	-
		D21	16.17		0	0	5.09	73.21	21.70	0.55		-		-22.08		4.42		-	-

续表 1

时间 Time	区域 Area	站点 Station	中值粒径 Median grain size/ μm			百分比 Percentage/%			总有机碳 TOC/%		总氮 TN/%		碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$		氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}\text{‰}$		碳/氮 C/N		
			数值 Value	平均 Mean	中砂 Medium sand 250~500 μm	细砂 Fine sand 125~250 μm	极细砂 Very fine sand 63~125/ μm	粉砂 Silt 4~63 μm	黏土 Clay <4 μm	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean
2019-10	OA	D1	18.36	25.59	0.16	0.29	6.55	74.36	18.64	0.49	0.36	0.081	0.058	-22.45	-22.53	11.81	9.67	7.10	7.36
		D2	26.02		1.83	0.15	10.04	73.17	14.81	0.31		0.052		-22.49		9.37		7.02	
		D3	32.38		5.35	2.23	14.51	65.13	12.78	0.28		0.041		-22.64		7.83		7.97	
	TT	D4	31.23	31.23	1.23	1.26	15.78	69.97	11.76	0.33	0.33	0.047	0.047	-22.40	-22.40	6.37	6.37	8.23	8.23
	SW	D5	21.73	22.39	0.70	0.42	8.51	73.40	16.97	0.32	0.41	0.044	0.058	-22.60	-22.37	5.04	4.90	8.56	8.25
		D6	26.91		2.59	1.39	10.86	71.05	14.11	0.32		0.043		-22.37		4.38		8.66	
		D7	25.13		0.22	0.49	8.87	77.32	13.10	0.43		0.063		-22.36		5.24		7.99	
		D9	26.23		0	0.08	10.85	74.67	14.40	0.35		0.052		-22.27		4.69		7.85	
		D10	11.95		0.58	0.21	4.66	71.92	22.63	0.61		0.086		-22.23		5.17		8.20	
	SF-SW	D8	24.98	22.53	0	0.02	10.28	74.52	15.18	0.31	0.29	0.042	0.040	-22.44	-22.57	4.38	4.53	8.67	8.39
		D11	18.12		0.03	0.65	11.19	69.29	18.84	0.22		0.035		-22.37		4.61		7.54	
		D14	24.49		0.61	0.09	11.24	73.01	15.05	0.32		0.042		-22.90		4.60		8.95	
	F-SF	D15	21.75	22.43	0.28	1.57	7.44	77.16	13.55	0.40	0.47	0.059	0.058	-22.33	-23.41	4.74	4.18	8.03	8.52
		D16	13.07		0	0.43	3.18	73.00	23.39	0.86		0.091		-25.10		4.94		11.02	
		D18	32.48		0	0.02	14.62	77.32	8.04	0.14		0.025		-22.79		2.85		6.51	
	SF	D12	14.95	25.72	0.12	0.93	6.22	72.54	20.19	0.45	0.35	0.068	0.051	-22.07	-22.22	5.11	5.04	7.62	7.90
		D13	17.14		0	0	4.50	76.86	18.64	0.31		0.047		-22.27		4.78		7.82	
		D17	27.61		0.16	0.05	12.27	73.01	14.51	0.41		0.058		-22.48		5.09		8.17	
		D19	40.44		0	0.16	21.61	71.78	6.45	0.16		0.026		-22.44		4.07		7.40	
		D20	35.78		0.28	0.17	17.49	71.79	10.27	0.26		0.037		-22.05		5.31		8.30	
		D21	18.39		0	0	4.98	75.21	19.81	0.50		0.072		-22.00		5.85		8.07	

续表 1

时间 Time	区域 Area	站点 Station	中值粒径 Median grain size/ μm				百分比 Percentage/%				总有机碳 TOC/%		总氮 TN/%		碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}\%$		氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}\%$		碳/氮 C/N	
			数值 Value	平均 Mean	中砂 Medium sand 250~500 μm	细砂 Fine sand 125~250 μm	极细砂 Very fine sand 63~125/ μm	粉砂 Silt 4~63 μm	黏土 Clay <4 μm	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value	平均 Mean	数值 Value
2019-12	OA	D1	17.87	24.11	0.92	0.42	5.52	73.97	19.17	0.43	0.33	0.061	0.046	-22.25	-22.37	4.23	4.20	8.17	8.18	
		D2	26.1		1.66	0.70	11.20	71.35	15.09	0.24	0.035			-22.42		3.99		8.09		
		D3	28.36		0.81	0.77	13.18	71.63	13.61	0.31	0.043			-22.43		4.38		8.28		
	TT	D4	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SW	D5	18.9	25.97	1.83	0.14	6.00	73.21	18.82	0.34	0.38	0.046	0.053	-22.35	-22.24	4.41	4.60	8.60	8.31	
		D6	24.85		2.72	0.71	9.37	72.08	15.12	0.30	0.042			-22.29		4.40		8.42		
		D7	32.19		0.86	1.02	15.74	70.39	11.99	0.31	0.042			-22.22		4.55		8.50		
		D9	36.7		3.20	4.57	14.33	69.62	8.28	0.21	0.032			-22.32		4.16		7.80		
		D10	17.23		1.30	1.38	3.78	76.96	16.58	0.73	0.103			-22.02		5.49		8.21		
	SF-SW	D8	32.25	20.59	0.25	0.85	15.35	73.16	10.39	0.22	0.42	0.034	0.062	-22.09	-22.05	4.28	4.92	7.49	7.78	
		D11	14.78		1.57	0.27	4.53	72.93	20.70	0.61	0.088			-22.09		5.44		8.03		
		D14	14.74		0	0.02	5.54	73.70	20.74	0.43	0.064			-21.98		5.04		7.83		
	F-SF	D15	7.52	14.36	3.01	0.86	1.61	63.41	31.11	0.75	0.44	0.114	0.068	-21.95	-22.01	5.79	4.54	7.69	7.43	
		D16	9.32		0.58	0.30	3.17	68.63	27.32	0.45	0.067			-22.06		5.40		7.87		
		D18	26.24		0.79	0.21	11.05	74.16	13.79	0.12	0.021			-22.03		2.43		6.73		
	SF	D12	23.39	39.15	0	0.03	8.15	77.43	14.39	0.27	0.42	0.040	0.047	-22.18	-22.38	4.46	4.47	7.78	7.46	
		D13	10.72		2.72	0.16	3.84	69.07	24.21	0.56	0.083			-22.01		5.64		7.90		
		D17	40.63		13.36	13.30	8.67	51.96	12.71	0.34	0.045			-21.79		4.49		8.89		
		D19	51.72		0	1.46	32.91	61.42	4.21	0.09	0.020			-22.30		3.38		5.34		
		D20	44.13		2.98	0.14	22.13	69.20	5.55	0.16	0.025			-21.86		4.39		7.39		
		D21	64.33		9.26	16.96	23.24	45.31	5.23	1.07	0.067			-24.13		4.50		-		

注：“-”表示无测定数据。OA：外海区；TT：交错带；SW：海藻区；SF-SW：贝-藻区；F-SF：鱼-贝区；SF：贝类区

Note: “-” in the table means no measured data. OA: Offshore area; TT: Transitional area; SW: Seaweed area; SF-SW: Shellfish-seaweed area; F-SF: Fish-shellfish area; SF: Shellfish area

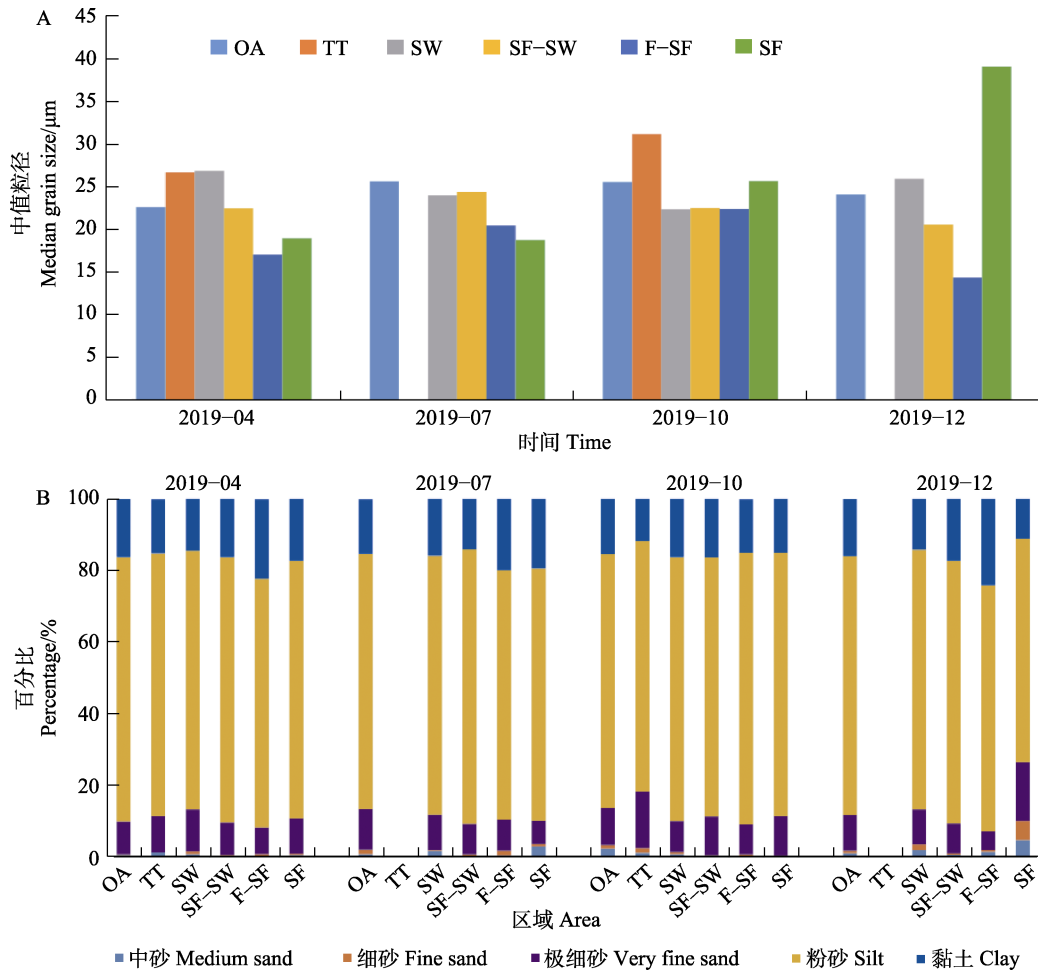


图 2 桑沟湾表层沉积物的平均粒度(A)以及不同组分在桑沟湾沉积物中的百分比(B)
 Fig.2 The median grain size in surface sediments from Sanggou Bay (A) and the percentage of different components in sediments from Sanggou Bay (B), respectively

OA: 外海区; TT: 交错带; SW: 海藻区; SF-SW: 贝-藻区; F-SF: 鱼-贝区; SF: 贝类区
 OA: Offshore area; TT: Transitional area; SW: Seaweed area; SF-SW: Shellfish-seaweed area;
 F-SF: Fish-shellfish area; SF: Shellfish area

等生物的新陈代谢增强,生物沉积与其生活习性和环境条件存在密切关系(周毅等, 2003)。而对于沉积物的 C/N 值,在 4 月呈海湾边缘向海湾内部增加,海湾内部由北向南增加的趋势(图 3C); 7 月呈从海湾边缘到近岸水域增加的趋势(图 3F); 10 月呈从海湾北部向西南逐渐增加的趋势(图 3I); 12 月呈现从四周向海湾中部逐渐增加的趋势(图 3L)。

从图 5A 可以看出,中值粒径与 TOC 的相关系数 $r=-0.764$,呈极显著负相关($P<0.001$),这表明沉积物粒度是控制桑沟湾表层沉积物 TOC 含量的主要因素之一,且粒径越小,TOC 含量越大,主要是由于小粒径的贝藻生物沉积物增加了沉积物中 TOC 的含量。从图 5B 可以看出,沉积物 TOC 和 TN 呈极显著正相关($r=0.955, P<0.001$),表明沉积物 TOC 和 TN 的来源具有一致性。根据回归方程:

$$TN\% = 0.1405 \times TOC\% + 0.0057$$

确定沉积物中无机氮(DIN)含量 ≤ 0.0057 ,表明 DIN 在表层沉积物中所占比例较小,可以忽略不计。C/N 值通常用于识别水生生态系统中有有机质的主要来源。研究表明,海洋有机质的 C/N 值一般 < 8 ,陆地有机质的 C/N 值一般 > 12 (Bordovskiy, 1965; Prah et al, 1980; Ogrinc et al, 2004)。水生植物的 C/N 值一般为 6~8 或 10~30 (Kendall et al, 2001)。本研究中,4 月的沉积物 C/N 值范围为 5.30~7.38,平均值为 6.70 ± 0.49 ; 7 月的沉积物 C/N 值在 6.14~9.23 之间,平均值为 7.36 ± 0.87 ; 10 月的沉积物 C/N 值在 6.51~11.02 之间,平均值为 8.08 ± 0.90 ; 12 月的沉积物 C/N 值为 5.34~8.89,平均值为 7.84 ± 0.78 (表 1 和图 4C)。表明桑沟湾沉积物有机质来源于海源和陆源的混合。稳定同位素($\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$)组成也能用来识别有机质的主

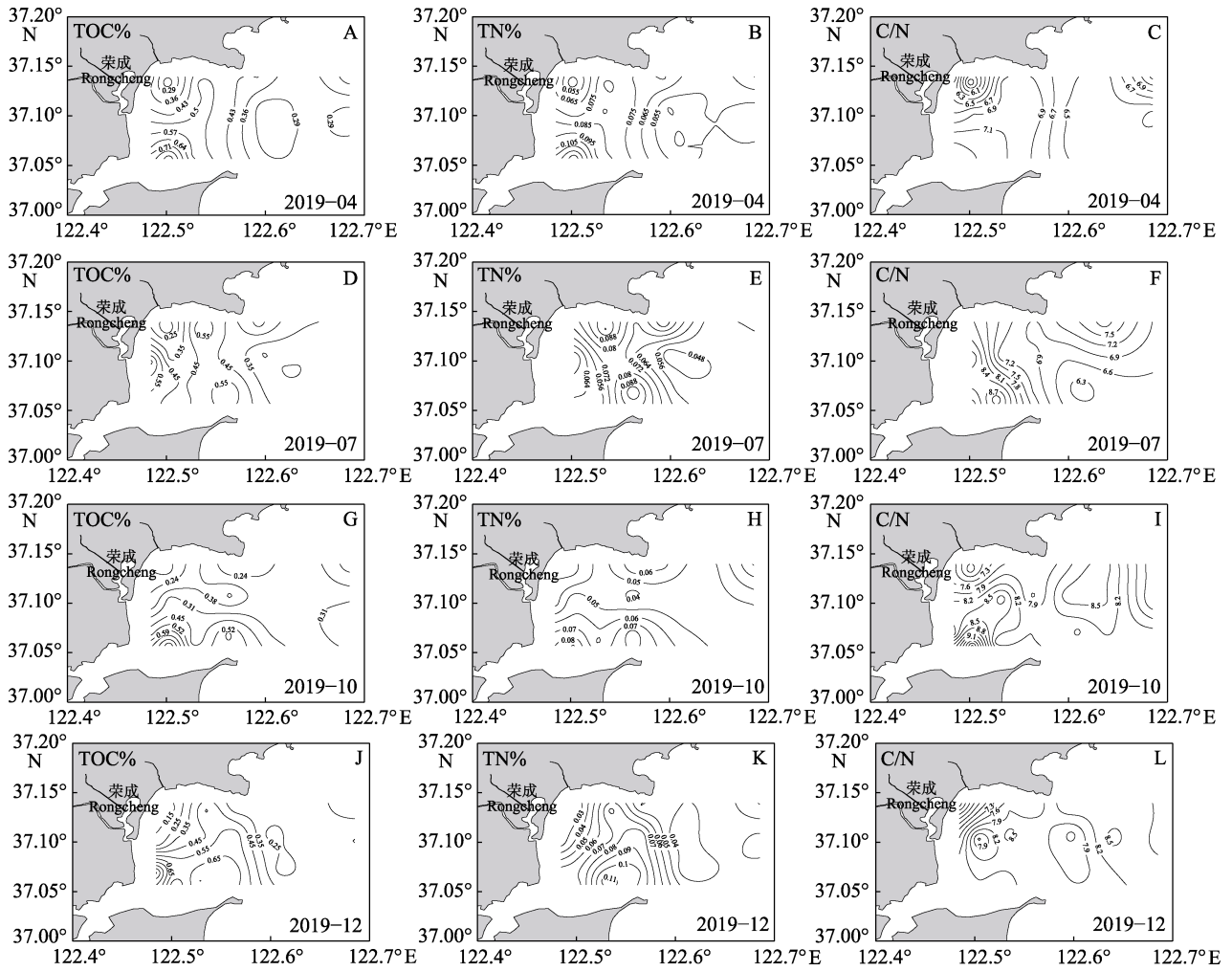


图3 2019年4月(A~C)、7月(D~F)、10月(G~I)和12月(J~L)

桑沟湾表层沉积物中 TOC%、TN%和 C/N 的水平分布

Fig.3 Horizontal distribution of TOC%, TN%, and C/N in surface sediments from Sanggou Bay in April (A~C), July (D~F), October (G~I) and December (J~L) of 2019, respectively

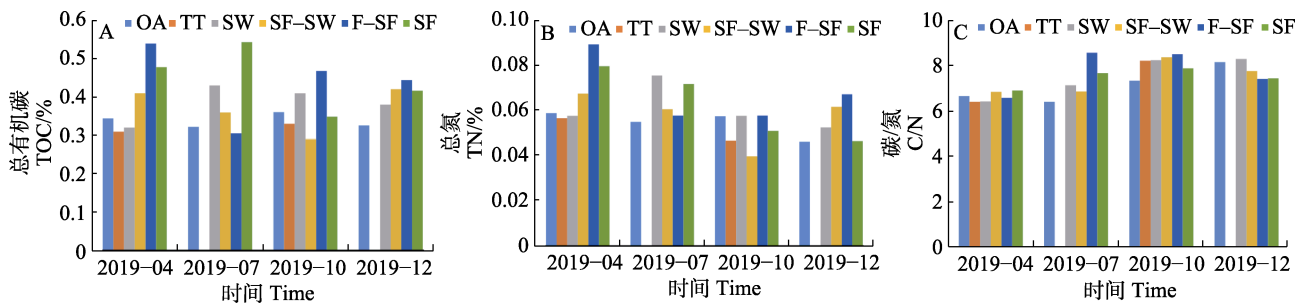


图4 桑沟湾表层沉积物中的 TOC (A)、TN (B)和 C/N (C)分布特征

Fig.4 TOC (A), TN (B) and C/N (C) in surface sediments of Sanggou Bay, respectively

要来源。但 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 相比, $\delta^{15}\text{N}$ 更易受到水体中有机质的转化和微生物活动的干扰,不能准确反应有机质的来源(Waser *et al*, 1998)。已有研究表明,陆源 C3 和 C4 植物残渣的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -33‰ ~ -25‰ 和 -17‰ ~ -9‰ (Pancost *et al*, 2004; Lamb *et al*, 2005; Yu

et al, 2010); 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -26.0‰ ~ -21.18‰ (Lu *et al*, 2013); 海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -22.8‰ ~ -7.7‰ (Shimoda *et al*, 2007)。表 1 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的结果表明,桑沟湾沉积物有机质来源于海源和陆源,这与 C/N 结果相一致。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的平面分布见图 6。

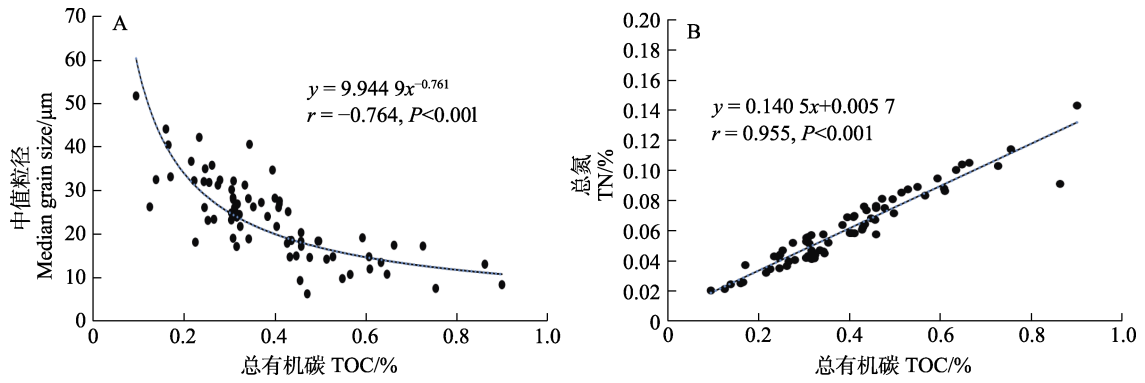


图 5 桑沟湾表层沉积物中 TOC 与中值粒径(A)、TOC 与 TN (B)的相关性

Fig.5 Correlation between TOC and median grain sizes (A), between TOC and TN (B) in surface sediments of Sanggou Bay

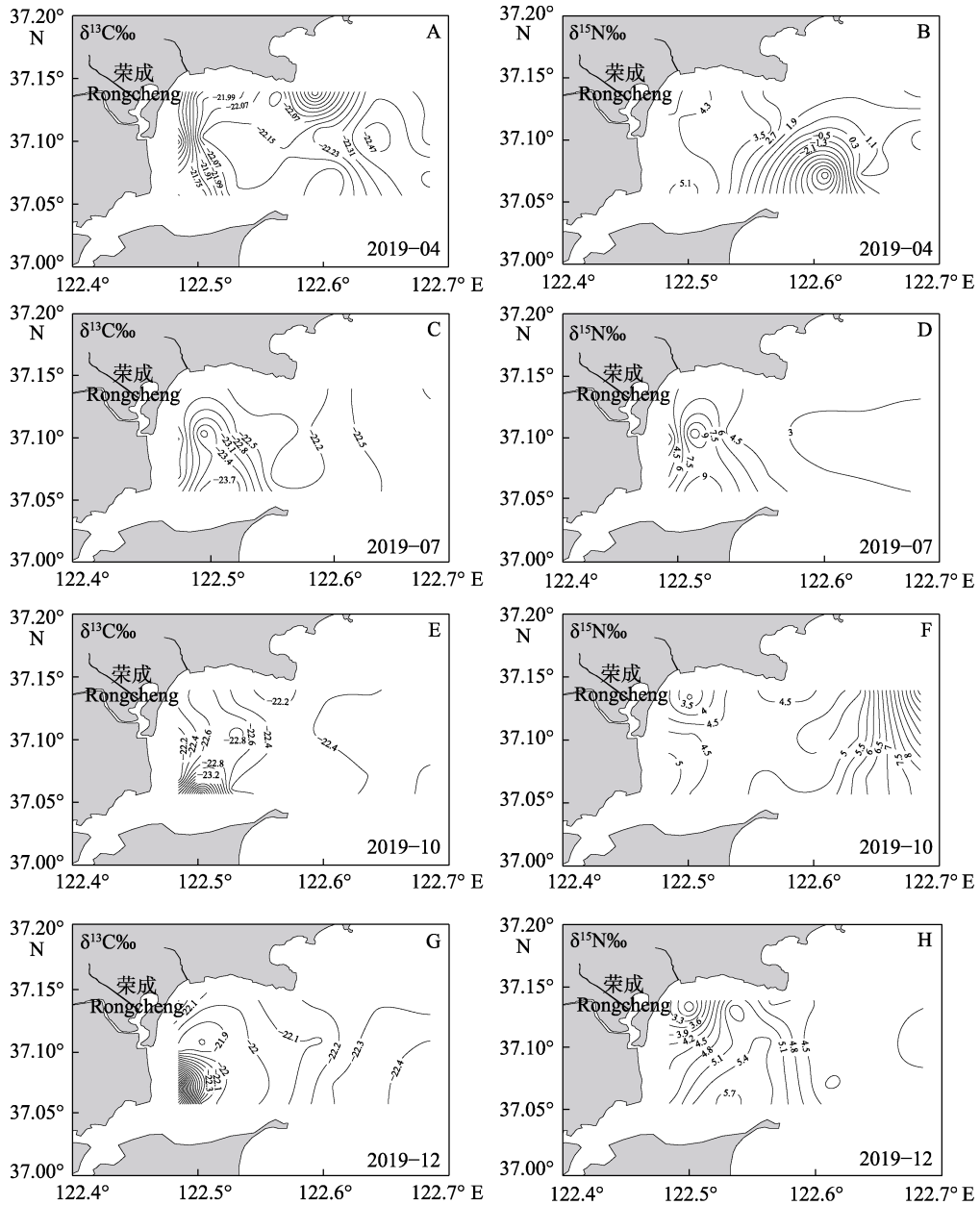


图 6 2019 年 4 月(A~B)、7 月(C~D)、10 月(E~F)和 12 月(G~H)桑沟湾表层沉积物中 δ¹³C‰和 δ¹⁵N‰的水平分布

Fig.6 Horizontal distribution of δ¹³C‰ and δ¹⁵N‰ in surface sediments from Sanggou Bay in April (A~B), July (C~D), October (E~F) and December (G~H) of 2019, respectively

从图6可以看出,4月 $\delta^{13}\text{C}$ 值从海湾中部向四周逐渐增大,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值从海湾边缘到近海呈逐渐增加的趋势(图6A和图6B);7月 $\delta^{13}\text{C}$ 值从四周向海湾内部逐渐降低,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值从四周向海湾内部逐渐增加(图6C和图6D);10月 $\delta^{13}\text{C}$ 在西南方向呈现较低的值,然后向其他方向逐渐降低,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值从各个方向向西南方向逐渐增加(图6E和图6F);12月 $\delta^{13}\text{C}$ 值从海湾内部向四周逐渐降低,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值从西北和东北向南部逐渐增加(图6G和图6H)。

2.3 沉积物有机质来源解析

Xia等(2014、2018)和Sui等(2019)研究表明,贝类生物沉积、海藻养殖、陆生高等植物(C3和C4植物)和土壤有机质是海水养殖区沉积物有机质的潜在来源。桑沟湾沉积物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值见图7。从图7可以看出,5种可能来源(贝类生物沉积、海带养殖、土壤有机质、C3植物和C4植物)的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值。从C/N和 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系可以分析得出,桑沟湾沉积物有机质主要有贝类生物沉积、海带和土壤有机质3个来源,而C3和C4植物在其中的贡献率可以忽略不计(图7)。

多元混合模型已被广泛用于定量估算陆源和海洋有机质对海洋沉积物的贡献(Hedges *et al.*, 1979; Hu *et al.*, 2006)。本研究采用三元混合模型分析桑沟湾沉积物不同来源的贡献率。基于图7选定的3个端元是贝类生物沉积、海带和土壤有机质,三元混合模型如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \delta^{13}\text{C}_B \times f_B + \delta^{13}\text{C}_A \times f_A + \delta^{13}\text{C}_S \times f_S$$

$$\text{C/N}_{\text{sample}} = \text{C/N}_B \times f_B + \text{C/N}_A \times f_A + \text{C/N}_S \times f_S$$

$$1 = f_B + f_A + f_S$$

式中, $\delta^{13}\text{C}$ 为有机质的稳定碳同位素组成,C/N为有机质中C和N的摩尔比, f 为不同来源相对于总有机质的百分比, B 为贝类生物沉积源, A 为海带源, S 为土壤有机质源。前期研究测定了贝类生物沉积中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值,扇贝和长牡蛎排泄物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N平均值分别为 -21.86‰ 和5.8;海带的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N平均值分别为 -18.55‰ 和6.48(Xia *et al.*, 2014)。土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -24.2‰ ,C/N值为10.6(Lu *et al.*, 2013)。采用三元混合模型估算了贝类生物沉积、土壤有机质和海带对桑沟湾沉积物中有机质的贡献。从图8可以看出,4、7、10和12月桑沟湾沉积物中有机质的主要来源均是贝类生物沉积,平均贡献率分别为79.34%(4月)、77.86%(7月)、58.15%(10月)和57.82%(12月)。贝类生物沉积作用可能对整个近海生态系统的物质循环和能量流动产生了影响。一般来说,每年春季是扇贝和牡蛎收获的季节。

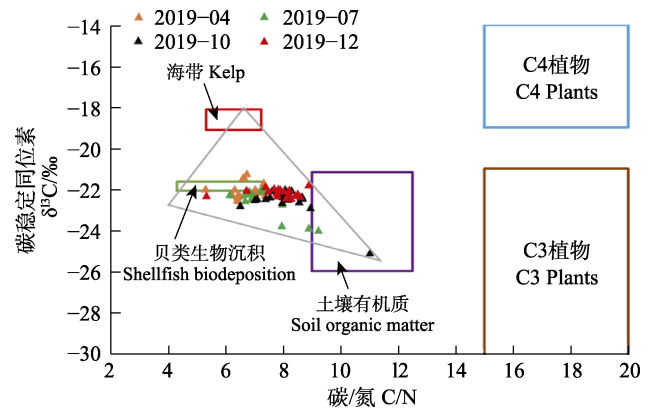


图7 桑沟湾沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N的关系
Fig.7 The relationship diagram of the $\delta^{13}\text{C}$ and C/N for the sedimentary organic matter in the Sanggou Bay

实心三角形代表沉积物有机质的数据点,矩形代表 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N的不同端元值范围。贝类生物沉积($\delta^{13}\text{C}$: -22.08‰ ~ -21.64‰ ; C/N: 4.31~7.30)和海带($\delta^{13}\text{C}$: -19.21‰ ~ -18.12‰ ; C/N: 5.32~7.24)向海洋环境输入的典型 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N范围的数据都是由Xia等(2014)编制的;C3植物($\delta^{13}\text{C}$: -32‰ ~ -21‰ ; C/N: >15)和C4植物($\delta^{13}\text{C}$: -19‰ ~ -9‰ ; C/N: >15)的数据来自Boutton(1991)和Lamb等(2005);土壤有机质数据($\delta^{13}\text{C}$: -26.0‰ ~ -21.18‰ ; C/N: 9.0~12.5)引自Lu等(2012)

The solid triangle represent the data points of sedimentary organic matter, the rectangles represent the range of different end-member values for $\delta^{13}\text{C}$ and C/N. The date of typical $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ranges of organic inputs to marine environments for shellfish biodeposition ($\delta^{13}\text{C}$: -22.08‰ ~ -21.64‰ ; C/N: 4.31~7.30) and kelp ($\delta^{13}\text{C}$: -19.21‰ ~ -18.12‰ ; C/N: 5.32~7.24) are both compiled from Xia *et al.* (2014) The data for C3 plant ($\delta^{13}\text{C}$: -32‰ ~ -21‰ ; C/N: >15) and C4 plant ($\delta^{13}\text{C}$: -19‰ ~ -9‰ ; C/N: >15) are compiled from Boutton (1991) and Lamb *et al.* (2005). Data for soil organic matter ($\delta^{13}\text{C}$: -26.0‰ ~ -21.18‰ ; C/N: 9.0~12.5) are quoted from Lu *et al.* (2012)

因此,收获前,4月贝类沉积的高贡献率(图8)可能与贝类对水产养殖的贡献量大有关,这将导致贝类排泄量增加。秋季扇贝、海带收获后,贝类排泄量也有所下降,土壤有机质的贡献率增加。综合4个季节的调查结果,贝类生物沉积、土壤有机质和海带的贡献率分别为 $67.52\% > 26.47\% > 5.97\%$ 。由此可以看出,海水养殖是桑沟湾沉积物有机质的主要贡献来源,平均贡献率为73.49%。Xia等(2018)对2014和2015年桑沟湾4个季节总体调查分析发现,贝类生物沉积、土壤有机质和海带的贡献率分别为 $48.53\% > 37.44\% > 14.03\%$ 。表明随着时间的推移,桑沟湾海域贝类养殖规模不断壮大,其生物沉积量在持续增加,未来可能会继续增大。

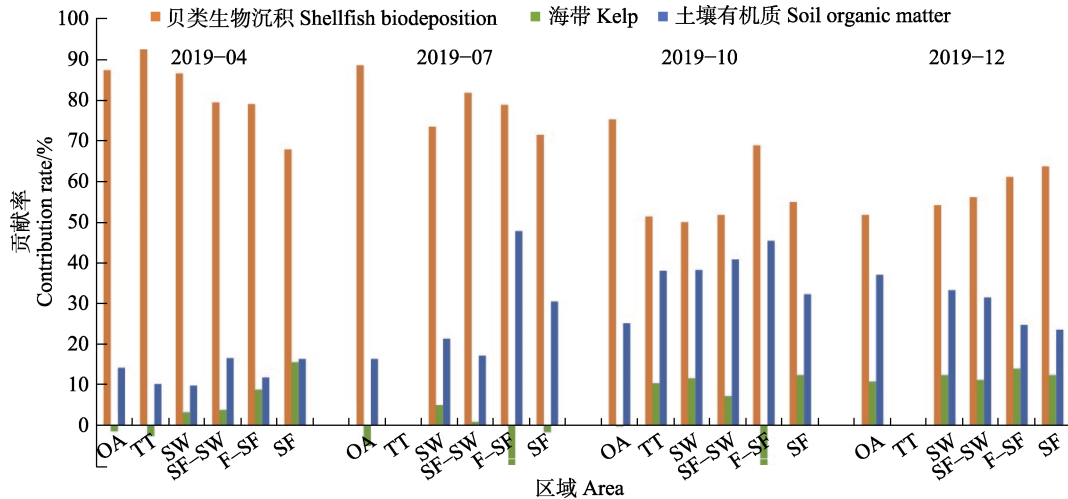


图 8 2019 年 4、7、10 和 12 月不同来源对桑沟湾表层沉积物有机质的贡献率

Fig.8 Contribution rates of the different sources to organic matters in surface sediments from Sanggou Bay in April, July, October and December of 2019, respectively

同时,也证实了海水养殖对桑沟湾沉积有机质的重要贡献。另外,剩下的近 30%是土壤有机质,这一贡献率相对较大,还有少数几个出现负贡献率的情况,这一情况在卢凤云等(2012)对潮白河上游有机质的碳、氮稳定同位素分析及来源探讨中也有存在,这可能是由于忽略了一些其他来源,例如来自网箱水产养殖的废弃食物、鱼粪和死亡鱼体。在今后的研究中,应进一步调查饲料垃圾和鱼类粪便,为桑沟湾沉积有机质的来源作补充。已有研究也报道了水产养殖区沉积有机质的来源,例如,爱莲湾是中国北方典型的集约化水产养殖区之一,海带和贝类的浮筏养殖是该地区独特的海水养殖方法。Zhe 等(2019)研究发现,爱莲湾表层沉积物的沉积类型为黏土和粉砂,表层沉积物以海洋源性有机碳为主,有机碳主要来源于贝藻生物沉积。另外, Sui 等(2019)在 2016 年对桑沟湾不同养殖区不同季节表层沉积物的调查中发现,桑沟湾沉积有机质是海洋浮游植物、陆源和养殖源的混合物,表层沉积物以海水养殖有机碳为主。因此,水产养殖作为沿海地区最重要的人类活动之一,对近海生态系统的碳循环会产生重要影响。

3 结论

本研究中,调查了桑沟湾表层沉积物中粒径分布, TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的时空分布及来源分析。结果表明,桑沟湾沉积物成分组成以粉砂为主,其次是黏土和极细砂,并且粒度分布与海水养殖模式和水动力学条件密切相关。TOC 和 TN 季节变化呈现出相似性,总体表现为春季最高,秋季最低,季节差异不大。从平面分布进行分析,桑沟湾沉积物 TOC 和 TN

呈相似的分布趋势,在贝类养殖区、贝藻混养区和鱼贝混养区出现较高值。沉积物粒度是控制桑沟湾表层沉积物 TOC 含量的主要因素之一,且粒径越小, TOC 含量越大。沉积物 TOC 和 TN 呈显著正相关,表明沉积物 TOC 和 TN 的来源具有一致性。表层沉积物中有机质的主要贡献来源有贝类生物沉积、海带养殖和土壤有机质。基于三元混合模型得到,贝类生物沉积贡献率为 67.52%,土壤有机质贡献率为 26.47%,海带贡献率为 5.97%。贝类生物沉积是桑沟湾沉积物中有机质的主要来源。所以,除了海水养殖环境中通过贝藻养殖生物体收获产生的可移出的碳汇外,贝藻生物沉积贡献的碳埋藏量也不可忽视,构成养殖环境沉积碳库的重要组成部分。下一步在计量渔业碳汇时,应充分考虑海水养殖区贝藻生物沉积对近海碳埋藏的贡献。

参 考 文 献

- BAUER J E, CAI W J, RAYMOND P A, *et al.* The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 2013, 504(7478): 61-70
- BIGGS R B, HOWELL B A. The estuary as a sediment trap: alternate approaches to estimating its filtering efficiency-science direct. *The Estuary as a Filter*, 1984, 6(3): 107-129
- BORDOVSKIY O K. Transformation of organic matter in bottom sediments and its early diagenesis. *Marine Geology*, 1965, 3(1/2): 83-114
- BOUTTON T W. Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. *Carbon Isotope Techniques*, 1991, 173-185
- Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of

- Agriculture and Rural Affairs. 2020 yearbook of fishery statistics of China. Beijing: China Agriculture Press, 2020, 6 [农业农村部渔业渔政管理局. 2020 年中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2020, 6]
- FRANZO A, CIBIC T, NEGRO P D, *et al.* Microphytobenthic response to mussel farm biodeposition in coastal sediments of the northern Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1/2): 379–388
- GU Y G, NING J J, KE C L, *et al.* Bioaccessibility and human health implications of heavy metals in different trophic level marine organisms: A case study of the South China Sea. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 163: 551–557
- HEDGES J I, MANN D C. The lignin geochemistry of marine sediments from the southern Washington coast. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(11): 1809–1818
- HU J, PENG P, JIA G, *et al.* Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China. *Marine Chemistry*, 2006, 98(2/3/4): 274–285
- KENDALL C, SILVA S R, KELLY V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1301–1346
- LAMB A L, WILSON G P, LENG M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 2005, 75(1): 29–57
- LI J Q, ZHANG W W, DING J K, *et al.* Effect of large-scale kelp and bivalve farming on seawater carbonate system variations in the semi-enclosed Sanggou Bay. *Science of the Total Environment*, 2020, 753: 142065
- LU F Y, LIU Z Q, JI H B. Carbon and nitrogen isotopes analysis and sources of organic matter in the upper reaches of the Chaobai River near Beijing, China. *Science China Earth Science*, 2013, 56(2): 217–227
- LU F Y, LIU Z Q, JI H B. Carbon and nitrogen stable isotope analysis of organic matter in the upper reaches of Chaobai River and its sources. *Chinese Science: Earth Science*, 2012, 42(12): 1912–1922 [卢风云, 刘竹青, 季宏兵. 潮白河上游有机质的碳、氮稳定同位素分析及来源探讨. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(12): 1912–1922]
- MAO Y Z, LI J Q, XUE S Y, *et al.* Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3230–3237 [毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能. *生态学报*, 2018, 38(9): 3230–3237]
- OGRINC N, FONTOLAN G, FAGANELI J, *et al.* Carbon and nitrogen isotope compositions of organic matter in coastal marine sediments (The Gulf of Trieste, N Adriatic Sea): indicators of sources and preservation. *Marine Chemistry*, 2004, 95(3): 163–181
- PANCOST R D, BOOT C S. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1): 239–261
- PRAHL F G, BENNETT J T, CARPENTER R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(12): 1967–1976
- SHI J, WEI H. Numerical simulation of hydrodynamic field in semi closed high density raft culture sea area. *Journal of Ocean University of China (Nature Science)*, 2009, 39(6): 1181–1187 [史洁, 魏皓. 半封闭高密度筏式养殖海域水动力场的数值模拟. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(6): 1181–1187]
- SHIMODA K, ARAMAKI Y, NASUDA J, *et al.* Food sources for three species of *Nihonotrypaea* (Decapoda: Thalassinidea: Callianassidae) from western Kyushu, Japan, as determined by carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 342(2): 292–312
- SUI J J, ZHANG J H, REN S J, *et al.* Organic carbon in the surface sediments from the intensive mariculture zone of Sanggou Bay: Distribution, seasonal variations and sources. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(4): 985–996
- TANG Q S, LIU H. Marine fishery carbon sink and its expansion strategy. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 68–73 [唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 68–73]
- WALSH J J, ROWE G T, IVERSON R L, *et al.* Biological export of shelf carbon is a sink of the global CO_2 cycle. *Nature*, 1981, 291(5812): 196–201
- WASER N A D, HARRISON P J, NIELSEN B, *et al.* Nitrogen isotope fractionation during the uptake and assimilation of nitrate, nitrite, ammonium, and urea by a marine diatom. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(2): 215–224
- XIA B, CUI Y, CHEN B J, *et al.* Carbon and nitrogen isotopes analysis and sources of organic matter in surface sediments from the Sanggou Bay and its adjacent areas, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12): 48–57
- XIA B, HAN Q, CHEN B J, *et al.* Influence of shellfish biodeposition on coastal sedimentary organic matter: A case study from Sanggou Bay, China. *Continental Shelf Research*, 2018, 172: 12–21
- YU F, ZONG Y, LLOYD J M, *et al.* Bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2010, 87(4): 618–630
- ZHANG L, YIN K, WANG L, *et al.* The sources and accumulation rate of sedimentary organic matter in the Pearl River estuary and adjacent coastal area, Southern China. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(2): 190–196
- ZHANG M L, ZOU J, MAO Y Z, *et al.* Contribution of cultured

- Chlamys farreri* to carbon cycle in Sanggou Bay. *Fishery Modernization*, 2011, 38(4): 13–16 [张明亮, 邹健, 毛玉泽, 等. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献. *渔业现代化*, 2011, 38(4): 13–16]
- ZHANG Y Y, ZHANG J H, LIANG Y T, *et al.* Formation process and mechanism of carbon sink of aquaculture environment in China's coastal waters. *Chinese Science: Earth Science*, 2017, 47(12): 1414–1424 [张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(12): 1414–1424]
- ZHAO J, ZHOU S L, SUN Y, *et al.* Research on Sanggou Bay aquaculture hydro-environment. *Marine Fisheries Research*, 1996, 27(2): 68–79 [赵俊, 周诗贲, 孙耀, 等. 桑沟湾增殖水文环境研究. *海洋水产研究*, 1996, 27(2): 68–79]
- ZHE P, GAO Q F, DONG S L, *et al.* Effects of abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) and kelp (*Saccharina japonica*) mariculture on sources, distribution, and preservation of sedimentary organic carbon in Ailian Bay, China: Identified by coupling stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) with C/N ratio analyses. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 141: 387–397
- ZHOU Y, YANG H S, ZHANG F S. Biological deposition and ecological effects of bivalves in seawater. *Marine Science*, 2003(2): 23–26 [周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应. *海洋科学*, 2003(2): 23–26]

(编辑 陈 严)

Carbon and Nitrogen Stable Isotope Analysis and Source Identification of Organic Matter in Sediments of Sanggou Bay

NIE Mengchen^{1,2,3}, HUANG Cuiling⁴, SUI Qi^{1,2}, ZOU Li¹, ZHU Lin^{2,3},
SUN Xuemei^{2,3}, ZHAO Xinguo^{2,3}, XIA Bin^{2,3①}, CHEN Bijuan^{2,3}, QU Keming²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China; 4. SGS-CSTC Standards Technical Services Co., Ltd. Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266101, China)

Abstract In this study, the following spatial and temporal distribution characteristics of surface sediments in Sanggou Bay were analyzed: grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and carbon-nitrogen stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$). Additionally, the contribution of shellfish-seaweed biodeposition to the organic matter in coastal sediments was estimated. The results showed that the sediment composition of Sanggou Bay is primarily silt, and that particle size distribution is closely related to mariculture and hydrodynamic conditions. The seasonal variation and horizontal distribution of TOC and TN showed similar patterns: highest in spring and lowest in autumn, with little seasonal difference, and higher values in shellfish seaweed, fish shellfish, and shellfish culture areas. However, there were larger differences in the seasonal variation and horizontal distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$. According to the correlation analysis, there was a significant positive correlation between TOC and TN ($r=0.955$, $P<0.001$), indicating that TOC and TN in the surface sediments of Sanggou Bay were homologous. In addition, according to the comprehensive analysis of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N, the main sources of sedimentary organic matter are shellfish biodeposition, kelp, and soil organic matter. Using a three-end-member mixed model, it is estimated that the contribution rates of shellfish biodeposition, soil organic matter, and kelp are 67.52%, 26.47%, and 5.97%, respectively. Therefore, marine shellfish-seaweed biodeposition has a significant impact on coastal carbon burial.

Key words Mariculture; Sanggou Bay; Organic matter; Stable isotope; Source

① Corresponding author: XIA Bin, E-mail: xiabin@ysfri.ac.cn