DOI: 10.20103/j.stxb.202410302650

唐文海,张秀梅,王晓丽,王一航,李为浩,邢姝珺,杨扬,盘钰峰,李宏亮,杨晓龙.贻贝筏式养殖对沉积物碳库时空分布特征及有机碳来源的影响. 生态学报,2025,45(15): - .

Tang W H, Zhang X M, Wang X L, Wang Y H, Li W H, Xing S J, Yang Y, Pan Y F, Li H L, Yang X L. The impact of mussel suspended mariculture on the temporal and spatial distributions of carbon reservoirs and the sources of organic carbon in sediment. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

贻贝筏式养殖对沉积物碳库时空分布特征及有机碳来 源的影响

唐文海¹,张秀梅¹,王晓丽¹,王一航¹,李为浩¹,邢姝珺¹,杨 扬¹,盘钰峰¹,李宏亮²,杨晓龙¹,*

- 1 浙江海洋大学水产学院, 舟山 316022
- 2 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要:海洋沉积物是地球上最大的碳库和碳汇,对全球气候变化具有重要的调节作用。随着近年来海水养殖规模不断扩张对海洋碳循环过程的影响加剧,有必要开展海水养殖活动对沉积物碳含量的影响研究。于 2023 年 5 月至 2024 年 1 月在浙江枸杞岛贻贝筏式养殖区开展周年调查,聚焦大规模贻贝养殖活动对沉积物碳组分时空变化特征的影响,分析了影响沉积物碳含量的主要环境要素,并基于碳氮稳定同位素估算了贻贝养殖对沉积物有机碳来源的贡献。结果表明;养殖区和对照区的沉积物碳含量分布具有显著空间异质性,养殖区沉积物的总碳和无机碳含量显著高于对照区,但有机碳含量差异不显著;Boruta模型分析结果显示,养殖区的沉积物总碳受沉积物 pH 和硅酸盐显著影响,重要值分别为 5.88 和 5.17,沉积物有机碳含量分布特征主要受沉积物总氮和 pH 的影响,而沉积物 C/N 和叶绿素显著影响沉积物无机碳含量,重要值分别为 10.72 和 7.97;MixSIAR 稳定同位素混合模型结果表明,养殖区的沉积物有机碳以陆源为主,养殖贻贝的生物沉积作用对沉积物有机碳来源的贡献值为(22.21±3.08)%,显著高于对照区;养殖区沉积物碳组分以不易被分解利用的无机碳组分为主,有利于沉积物碳库的稳定性,而对照区沉积物中以腐殖化程度较高的有机质为主。强调了贝类生物沉积作用和无机碳组分在评价海水养殖区沉积物碳库中的重要贡献,研究结果为深入解析贝类筏式养殖固碳机制及其对沉积物碳循环过程的影响提供重要科学依据。

关键词:贻贝筏式养殖;无机碳;稳定同位素;生物沉积;重要值

The impact of mussel suspended mariculture on the temporal and spatial distributions of carbon reservoirs and the sources of organic carbon in sediment

TANG Wenhai¹, ZHANG Xiumei¹, WANG Xiaoli¹, WANG Yihang¹, LI Weihao¹, XING Shujun¹, YANG Yang¹, PAN Yufeng¹, LI Hongliang², YANG Xiaolong^{1,*}

- 1 School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China
- 2 Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: Marine sediments constitute the most extensive carbon reservoir and sink on Earth, playing a pivotal role in regulating global climate dynamics. In recent years, with the growing influence of mariculture on the marine carbon cycle, it has become imperative to examine the effects of mariculture activities on sedimentary carbon content. This study was conducted from May 2023 to January 2024 in the mussel suspended mariculture area of Gouqi Island in Zhejiang Province, focusing on the impact of large-scale mussel farming activities on the temporal and spatial variation characteristics of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401903);省属高校基本科研业务费(2024J001-3);浙江省自然科学基金(LDT23D06023D06)

收稿日期:2024-10-30; 网络出版日期:2025-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xlyang198805@163.com

sediment carbon fractions. It further examined the primary environmental determinants influencing sediment carbon content and assessed the contribution of mussel aquaculture to sediment organic carbon sources through the analysis of stable carbon and nitrogen isotopes. The results revealed substantial spatial heterogeneity in the distribution of sediment carbon content between the cultivation zone and control area. Notably, the total carbon and inorganic carbon content were significantly higher in the cultivation zone compared to the control area. However, no significant difference was detected in organic carbon content. Boruta models indicated that the total sediment carbon within the cultivation area was primarily influenced by pH levels and silicate content, with importance values of 5.88 and 5.17, respectively. The distribution characteristics of sediment organic carbon content were chiefly determined by total nitrogen and pH. In contrast, the C/N ratio and chlorophyll concentrations significantly affected the inorganic carbon content in sediments, with importance values of 10.72 and 7.97, respectively. Furthermore, the results from the MixSIAR stable isotope mixing model demonstrated that terrestrial sources were the principal contributors to the organic carbon in cultured mussel sediments. The biological deposition by mussels constituted (22.21±3.08)% of the organic carbon sources in the sediments, a proportion significantly greater than that observed in the control area. Regarding sediment carbon storage, the culture area was primarily composed of nondecomposable and underutilized inorganic carbon components, thereby enhancing the stability of the sediment carbon pool. In contrast, the sediment composition in the control area was dominated by humified organic matter, which impeded the efficient storage of carbon within the pool. This study highlights the significance of both shellfish biodeposition and inorganic carbon components as essential factors in the assessment of sediment carbon pools within mariculture environments. The research findings offer a critical scientific basis for further investigation into the impact of shellfish raft culture on sediment carbon cycle processes and its contribution to carbon sequestration mechanisms.

Key Words: mussel suspended mariculture; inorganic carbon; stable isotope; biodeposit; importance value

近现代工业化水平的迅速发展导致碳排放量不断增长。自工业革命以来,大气中诸如 CO₂、CH₄等含碳温室气体浓度持续增加,由此引发的全球气候变化成为当今世界面临的严峻环境问题之一。节能减排、碳"源"、碳"汇"等概念逐渐成为全球的关注热点。海洋生态系统是地球最大的碳库和碳汇,提供了包括调节区域气候和碳封存在内的多种重要生态功能。其中,埋藏在沉积物中的有机碳周转时间从数天跨越至百万年的时间尺度,是碳汇的最终储存库^[1]。海水养殖作为海岸带重要的人类生产活动之一,对近海生态系统的碳循环具有重要影响。我国作为海水养殖大国,随着养殖面积和年产量持续增加,养殖活动对沿海生态系统的碳循环产生了重要影响。其中,滤食性贝类是我国重要的养殖类群,大规模的贝类养殖活动通过改变水文特征以及一系列生物介导的生态过程对海水养殖区及邻近海域碳循环产生重要影响。

研究发现,大规模贻贝筏式养殖区显著降低了水体流速,并减弱该区域与周边海域间的水交换能力^[2-3]。此外,滤食性贝类通过生物沉积作用,将水体中大量小粒径的颗粒有机碳同化吸收并转变为粪便、假粪等大粒径有机物质^[4],加速了水体中有机碳的沉降速率^[5]。Sabine Schmidt等^[6]使用⁷Be 和²³⁴Th 对地中海贻贝和太平洋牡蛎养殖区的调查发现,贝类养殖显著增加了表层沉积物的平均粒径和沉积速率。也有研究表明,贻贝的摄食活动显著提升了水层中有机碳的沉积效率,但在高水动力条件下贻贝的粪便降解率较高,到达海底的有机碳含量显著减少^[7]。此外,贝类养殖区的有机碳来源影响了沉积碳循环过程及其碳储量。Pan 等^[8]发现贝藻混合养殖区中贝类排泄物和藻类碎屑对沉积物有机碳的贡献显著高于非养殖区。Liu 等^[9]在海南岛新村湾的研究表明,微生物碳源随沉积物有机碳的来源变化而改变。尽管当前已有较多关于贝类养殖区中沉积环境碳循环过程的研究,但贝类筏式养殖生态系统中环境要素对沉积物不同组分碳含量的影响及其调控机理研究尚不充分,亟待开展相关研究。

枸杞岛(30.68°—30.79° N, 122.70°—122.79° E)位于浙江省舟山市东北部,地处长江口、杭州湾和东海的交汇处,是浙江嵊泗列岛第二大岛。研究区域位于枸杞岛后头湾贻贝养殖区,主要养殖品种为厚壳贻贝

(Mytilus coruscus)和紫贻贝(Mytilus galloprovincialis)。该养殖区是枸杞岛最大的贻贝养殖聚集区,养殖面积 1024.8 hm²,占枸杞乡贻贝总养殖面积的 77.4%。本研究通过对比贻贝养殖区和对照区中沉积物碳含量的时空变化特征,基于 Boruta 模型明确了影响沉积物碳库变量的主要环境要素及其重要性,并利用碳氮稳定同位素模型估算了贻贝养殖对沉积物有机碳来源的贡献。研究结果旨在揭示贝类筏式养殖活动对沉积物储碳模式的潜在影响机制,为开展海洋贝类养殖区碳源汇评价提供理论基础和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

于 2023 年 5 月、8 月、11 月和 2024 年 1 月,分别在枸杞岛贻贝养殖区及其周边海域开展现场调查和样品采集。本研究在养殖区均匀布设了 13 个采样站位(N1—N13),各站位间隔 1 km,全面覆盖整个养殖区域,以确保所采集样品具有代表性。选取距离养殖区 3.5—5.6 km 的站位作为对照区,以降低养殖活动对对照区的影响。同时考虑到养殖区周围水深和水文环境的差异,分别在不同水深、养殖区不同方位均匀布设 18 个站位(W1—W18),力求准确反映研究区域的沉积物碳组分分布特征(图 1)。采用不锈钢抓斗采泥器采集 0—10 cm 的表层沉积物,每个站位采集 3 次作为重复。将沉积物均匀混合后,剔除贝壳和大块石屑,将沉积物样品迅速装入铝箔自封袋冷冻保存。采用 Niskin 采水器采集 500 mL 的上覆水样品(距离沉积物表面约 5 cm),同时使用 SBE-25p 温盐深 CTD 仪原位测定上覆水理化指标,包括溶解氧(DO)、pH、温度(T)、盐度(Sal)、浊度(Turbidty)。沉积物样品和水样低温保存运输至实验室进行后续分析。样品的采集和保存过程均按照《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)执行。

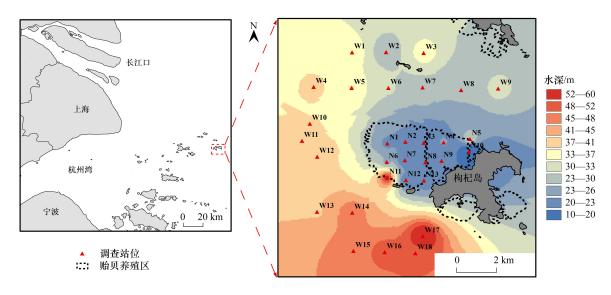


图 1 枸杞岛采样站位示意图

Fig.1 Sampling station illustration in Gouqi Island N: 贻贝养殖区采样站位; W: 对照区采样站位

1.2 样品处理与测定

实验室内,上覆水经 whatman GFF 玻璃纤维滤膜过滤,滤膜利用 90%的丙酮萃取后,使用分光光度计测定叶绿素(chl-a)含量。使用间断式流动分析仪(Smartchem 600, AMS Alliance, 意大利)测定营养盐,包括硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、氨氮(NH_4^+)、磷酸盐(PO_4^{3-})和硅酸盐(SiO_3^{2-})。

冻干的沉积物样品研磨后过 100 目筛网后,用于测定沉积物总碳(TC)含量。称取 1 g 冻干沉积物样品加入过量 1 mol/L 盐酸反应 24 h(无气泡产生),用纯水润洗 3—4 次直至沉积物呈中性,冻干后用于测定有机碳(SOC)和总氮(TN)[10]。沉积物 TC、SOC 和 TN 均采用 EA-HT 元素分析仪(Flamarst Thermo Scientific, USA)

分析测定。测定样品前,使用 Soil Standard Chalky OAS 标准品($C=(3.98\pm0.07)\%$, $N=(0.26\pm0.007)\%$)对元素分析仪进行校准,使用低有机碳含量标准品(Synthetic (Loamy) OAS, $C=(2.67\pm0.07)\%$, $N=(0.26\pm0.017)\%$)计算分析偏差。碳标准偏差为 0.05%, 氮标准偏差为 0.008%。沉积物无机碳(SIC)为总碳与有机碳含量差值。采用冻干法测定沉积物含水率(SW);将冻干沉积物与水按照 1:2.5 的比例混合提取,使用 pH 计(FE28,梅特勒)测定并换算沉积物 pH。沉积物容重(BD)使用环刀切割法测定[11];利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, USA)测定沉积物的粒度组成,根据粒径大小将沉积物划分为三种类型:粘土(<4 μ m),粉砂(4—63 μ m)和砂(>63 μ m)。

1.3 稳定同位素分析

称取约 20 mg 经酸洗的沉积物样品,用锡囊包埋,使用稳定同位素质谱仪(Thermo Scientific DELTA Q)测定稳定同位素比值。 $\delta^{13}C(‰)$ 和 $\delta^{15}N(‰)$ 的计算公式如下:

$$\delta^{13}C(\%e) = [(R_{sample} - R_{standard})/R_{standard}] \times 1000, R = {}^{13}C/{}^{12}C$$
 (1)

$$\delta^{15} N(\%_0) = \left[(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \right] \times 1000, R = {}^{15} N/{}^{14} N$$
 (2)

$$f_{\text{mar}} + f_{\text{B}} + f_{\text{ter}} = 1 \tag{3}$$

$$\delta^{13} \text{Csample} = f_{\text{B}} \times \delta^{13} \text{C} + f_{\text{mar}} \times \delta^{13} \text{C} + f_{\text{ter}} \times \delta^{13} \text{C}$$
(4)

$$\delta^{15} \text{Nsample} = f_B \times \delta^{15} N + f_{\text{mar}} \times \delta^{15} N + f_{\text{ter}} \times \delta^{15} N$$
(5)

式中, R_{sample} 是酸洗沉积物样品¹³C/¹²C 或者¹⁵N/¹⁴N 同位素比值, R_{standard} 是标准样品¹³C/¹²C 或者¹⁵N/¹⁴N 同位素比值; f_{mar} 、 f_{B} 和 f_{ter} 分别是沉积物有机碳的海洋成分、生物沉积成分和陆地成分比例。本研究考虑的三个来源基于两个标准进行筛选:(1) 覆盖了研究区域内大多数表层沉积物;(2) 通过 δ^{13} C 和 δ^{15} N 特征进行区分。

基于前期研究和相关文献收集研究区沉积物有机碳来源的特定端元值: 贻贝生物沉积作用($\delta^{13}C \approx -18$. 7‰, $\delta^{15}N \approx 5.8‰$)、海源成分($\delta^{13}C \approx -20‰$, $\delta^{15}N \approx 6‰$)、陆源成分($\delta^{13}C \approx -27‰$, $\delta^{15}N \approx 3‰$)。其中海源和陆源值参考已有文献^[12—13]。

1.4 统计分析

使用 ArcGIS 10.8 中的反距离权重法分析研究区域中沉积物有机碳、无机碳和总碳的空间分布特征。基于 IBM SPSS Statistic 25 对环境要素和沉积物碳组分时空分布进行单因素方差分析,采用双因素方差分析季节与养殖活动对沉积物碳库的影响,在进行方差分析前对数据进行正态性(Shapiro-Wilk)和方差齐性检验,均设置显著水平为 P<0.05。利用 Boruta 模型评估上覆水和沉积物理化指标对沉积物总碳、有机碳和无机碳含量的影响重要性。基于 MixSIRA 稳定同位素混合模型分析沉积物有机碳来源和潜在来源贡献,Markov Chain Monte Carlo(MCMC)运行步长为"very long"。Boruta 和 MixSIRA 模型均在 R 4.2.1 运行,分别使用"Boruta"和"MixSIRA"包。

2 结果与分析

2.1 上覆水和沉积物理化性质

研究区域上覆水和沉积物的理化指标表现出显著的时空差异(图 2,图 3)。水温范围在 12-22 之间,盐度范围在 30%—32%。之间,溶氧范围在 2.41—8.81 mg/L 之间,pH 范围在 7.7—8.1 之间,浊度范围在 8.61—41.62 NTU 之间,叶绿素范围在 0.56—3.16 µg/L 之间。养殖区水深范围为(24.46 ± 9.76) m,显著小于对照区(38.94 ± 9.12) m。水体 pH、盐度、叶绿素浓度和浊度主要表现出显著的季节性波动,空间变化差异不显著(P>0.05)。沉积物理化指标在季节间的波动范围较小,主要表现出显著的空间差异性。其中,沉积物 C/N和粒径组成在养殖区和对照区存在差异显著(P<0.05)。

2.2 沉积物碳含量时空分布特征

时间尺度上,研究区域沉积物不同碳组分含量如图 4 和图 5 所示。其中,沉积物总碳含量分布范围介于12.08—17.27 g/kg,在春季达到最高值,冬季最低。贻贝养殖区内沉积物总碳含量在不同季节差异不显著,但

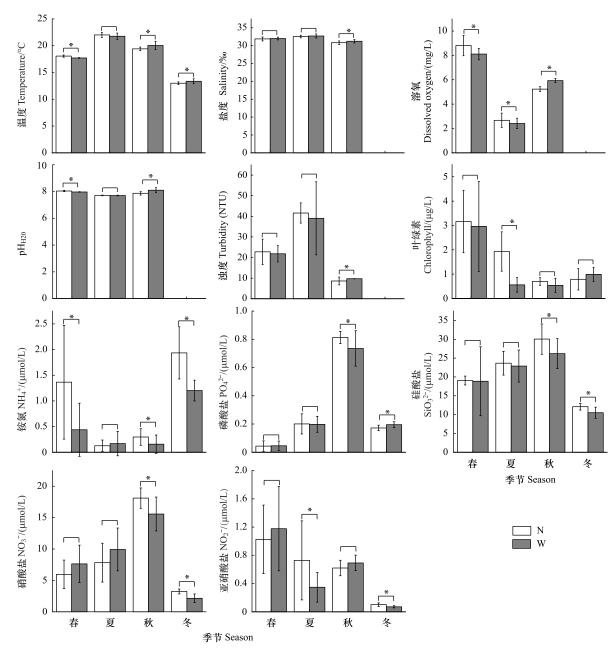


图 2 不同季节上覆水理化指标

Fig.2 Physical and chemical indexes of overlying water

冬季现场监测过程中因温盐深仪发生故障,缺乏盐度、溶氧、pH 和浊度等相关指标,*代表具有显著差异(P<0.05)

对照区的季节间差异显著(P<0.05)。沉积物有机碳含量分布范围介于 4.22—9.04 g/kg,贻贝养殖区内春秋季的沉积物有机碳含量显著高于夏季(P<0.05),对照区内春季有机碳含量显著高于其他季节(P<0.01)。沉积物无机碳含量分布范围介于 6.08—11.3 g/kg,春秋两季的无机碳水平显著低于夏季(P<0.01)。空间尺度上,贻贝养殖区的沉积物总碳含量和无机碳含量显著高于对照区(P<0.05),贻贝养殖区的有机碳含量略高于对照区,但无显著差异(P>0.05)。

双因素方差分析结果表明,不同季节和区域沉积物总碳含量的差异均达到极显著水平(P<0.01),但交互作用不显著(P=0.148);不同季节沉积物有机碳含量的差异达到极显著水平(P<0.01)。不同区域间的差异不显著(P=0.065),但交互作用影响极显著(P<0.01);不同季节沉积物无机碳含量的差异达到极显著水平

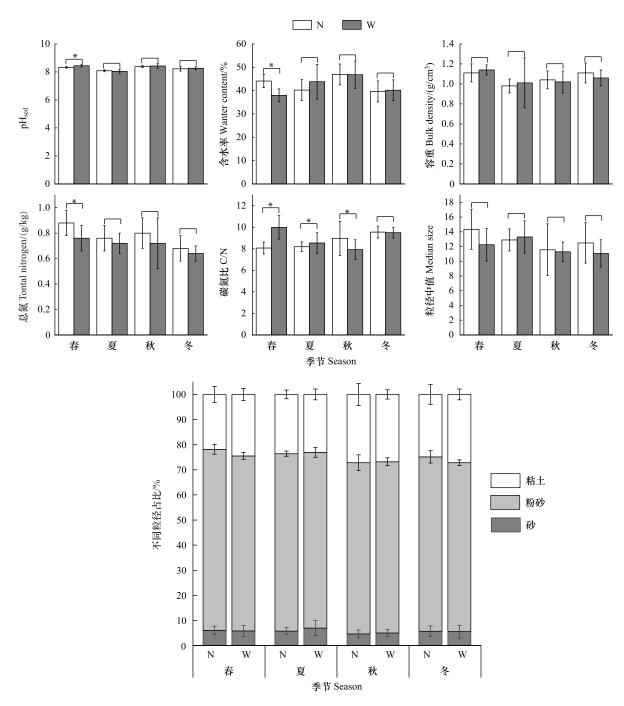


图 3 不同季节沉积物理化指标

Fig.3 Physical and chemical indicators of sediments indifferent seasons

(P<0.01),不同区域间沉积物无机碳含量差异显著(P=0.012),其交互作用影响极显著(P<0.01)。

2.3 影响沉积物碳组分分布特征的环境因子重要性

影响贻贝养殖区与对照区不同碳组分分布特征的环境因子类型和重要性如图 6 所示。其中,养殖区的沉积物总碳受沉积物 pH(5.88,环境因子重要值)和硅酸盐(5.18)影响较大,而对照区的沉积物总碳主要受总氮、硝酸盐和水深的影响。对照区沉积物有机碳分布特征受 C/N(12.21)、水温(10.77)、总氮(9.17)等多个环境因子综合影响。养殖区和对照区 C/N 对沉积物无机碳的影响均最大,重要值分别为(10.72)和(18.45),显著高于其他环境因子。

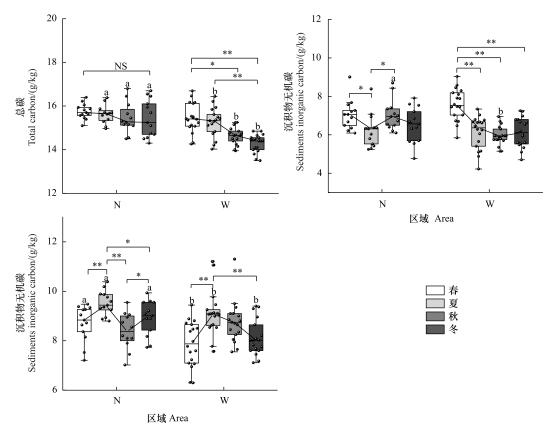


图 4 沉积物中碳组分含量变化

Fig.4 Changes in the carbon component content in the sediment

NS表示无显著差异,*表示中度显著差异(P<0.05),**表示高度显著差异(P<0.01),小写字母用于表示同一季节内不同区域间的差异性

碳组分 Carbon fraction	季节 Season			区域 Area			季节×区域 Season×Area		
	df	F	P	df	F	\overline{P}	df	F	P
总碳 TC Total carbon	3	6.7	< 0.01	1	23.510	< 0.01	3	1.81	0.148
沉积物有机碳 SOC Sedimental organic carbon	3	12.35	< 0.01	1	3.46	0.065	3	5.36	< 0.01
沉积物无机碳 SIC Sedimental inorganic carbon	3	9.53	< 0.01	1	6.55	0.012	3	4.65	< 0.01

表 1 沉积物总碳、有机碳和无机碳的双因素方差分析 Table 1 Two-way ANOVA of TC. SOC. and SIC in sediment

2.4 有机碳来源及其主要贡献分析

基于贝叶斯 MCMC 质量平衡模型的表层沉积物有机碳来源贡献如图 7 所示。结果表明,贻贝养殖区与对照区在陆源、海源和贻贝生物沉积作用的贡献存在显著的时空差异。在春季和夏季,养殖区主要以陆源为主,贡献率分别为(43.95±4.85)%和(38.14±2.82)%,而秋冬季节则以海源为主,贡献率分别为(39.61±1.81)%和(52.63±3.17)%。对照区在全年主要以海源为主,贡献率为(50.16±4.02)%,其次为陆源贡献(31.18±4.76)%。贻贝生物沉积作用的贡献率为(18.66±2.28)%。除冬季外,养殖区贻贝生物沉积作用贡献率均显著高于对照区(P<0.05)。

3 讨论

3.1 贻贝养殖区和对照区中环境因子的差异

大规模海水养殖活动通过生物扰动、改变水文环境条件等作用对近岸海域的水体和沉积环境产生直接或

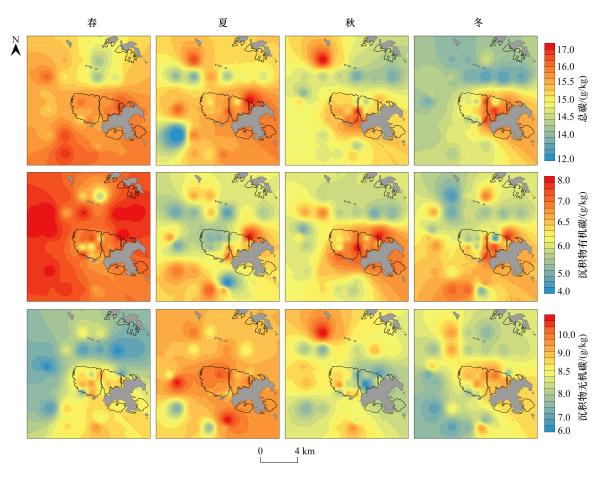


图 5 枸杞岛贻贝养殖区及对照区的表层沉积物分布情况

Fig.5 Distribution of surface sediment in mussel mariculture area and the control area of Gouqi Island

间接影响。例如,黄洪辉等[14—15]的研究发现,大亚湾网箱养殖区的沉积物有机碳和硫化物含量显著高于对照区,底层海水溶解氧显著低于对照区。在本研究中,贻贝养殖区与对照区的上覆水温度、pH、盐度和溶氧等环境因子均表现出显著的时空差异,表明养殖活动可能是造成这种差异的重要原因之一。春季养殖区上覆水的溶氧和 pH 显著高于对照区,但在秋季则呈现出相反的空间分布特征。经过春夏季生物沉积作用的影响,沉积物中有机质含量显著增加(图 5)。大量有机质降解消耗较多氧气[16],导致上覆水溶氧下降,产生过量二氧化碳,造成 pH 显著下降。此外,贻贝养殖区的上覆水中叶绿素含量显著高于对照区。尽管贻贝通过滤食等行为能大量摄食水体的浮游植物,导致表层叶绿素含量较低,但底层浮游植物受贻贝摄食影响较小,加之贻贝通过生物沉积过程中释放大量氨氮营养盐[17],显著提升了养殖区底层水体的初级生产力[18]。

沉积物粒径分布特征受来源和水动力条件的影响较大,通常被用于研究沉积环境、沉积过程和沉积物运输模式的重要环境指标^[19-20]。已有研究发现了海水养殖活动导致沉积物粒径粗化的现象^[21]。本研究中,贻贝养殖区的粉砂含量显著高于对照区,这与前期^[22-23]的研究结果一致,可能是贻贝养殖和收获过程中大量的贝壳落到沉积物中,经过水流冲刷、压实与胶结,最终以较多大粒径的沉积物形态赋存在养殖区沉积物中。

3.2 贻贝养殖活动对沉积物碳含量时空分布的影响

高密度的滤食性双壳类海水养殖对浮游植物的加速捕碳具有显著的增益作用,有利于有机碳在沉积物中的加速埋藏,并具有长期封存效益^[24]。前期研究结果表明,双壳类养殖活动能促进沉积物对有机碳的不断积累,显著提升养殖生态系统的沉积物有机碳储量^[25]。在本研究中,枸杞岛贻贝养殖区沉积物的总碳和有机碳含量均显著高于吴紫琦等^[26]于 2021 年在该区域的调查结果(总碳含量为 12.5 g/kg;有机碳含量为 3.33 g/kg),

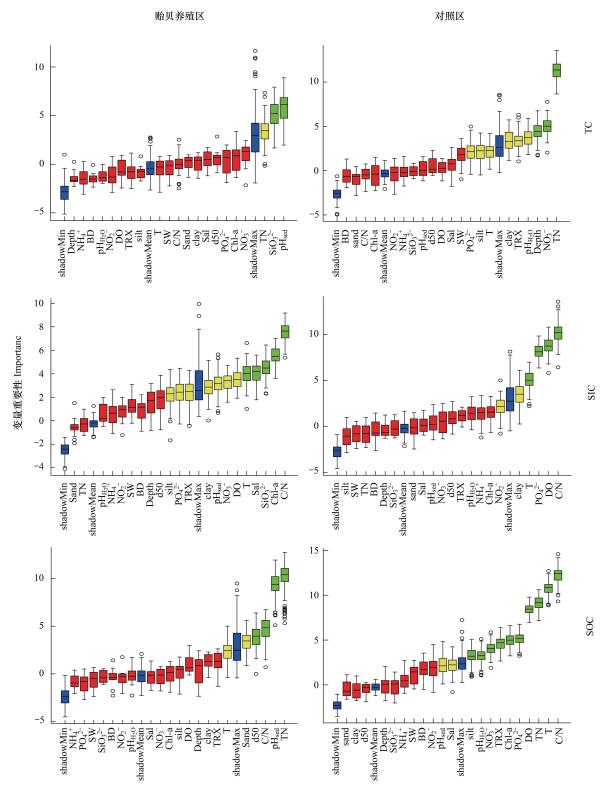


图 6 贻贝养殖区和对照区沉积物碳库中环境变量对不同碳组分分布特征的贡献值

Fig.6 The contribution of environmental variables to the distribution characteristics of different carbon components in the sediment carbon pool of mussel culture area and control area

绿色、黄色和红色箱线图分别表示,已确定、暂定、被拒绝特征的 z 分数; z 分数表示数据点与总体平均值的标准差数;选择了"已确定变量",作为输出特征; TN:总氮; SiO $_3^2$: 硅酸盐; NO $_3$: 硝酸盐; Depth: 深度; pH_{H2O}: 上覆水 pH; TRX: 浊度; clay: 粘土; T: 温度; silt: 粉砂; sand: 砂; SW: 含水率; Sal: 盐度; DO: 溶解氧; d50: 粒径中值; pH_{sed}: 沉积物 pH; NH $_4^4$: 铵氮; NO $_2^2$: 亚硝酸盐; Chl-a: 叶绿素; C/N: 碳氮比; BD: 容重; PO $_4^2$: 磷酸盐

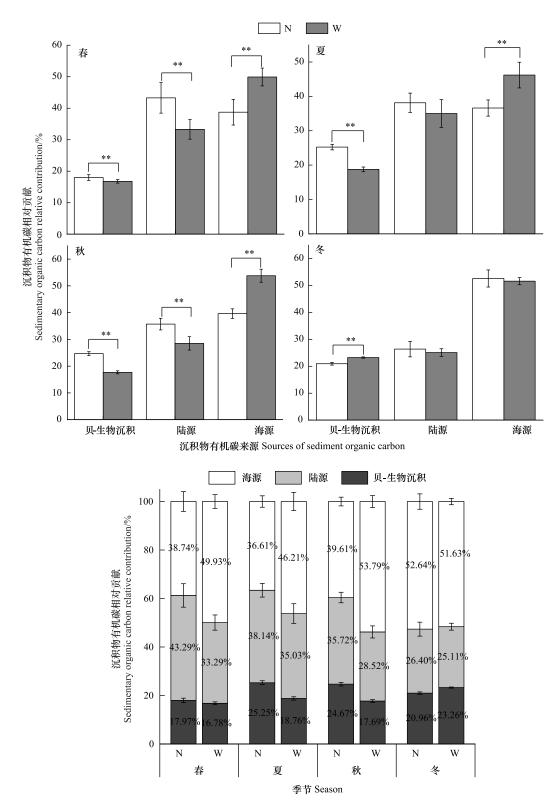


图 7 枸杞岛表层沉积物中有机碳不同来源贡献率分析

Fig.7 Analysis of the contribution rates of different sources of organic carbon in the surface sediments of Gouqi Island

略高于张向东^[27]在 2022 年的调查结果,表明随着养殖活动的增加,养殖区沉积物碳含量具有增加的趋势。此外,养殖区沉积物碳含量在不同年份均高于对照区,表明贻贝养殖活动具有促进沉积物碳储量的生态效应。在本研究中,厚壳贻贝养殖区和对照区的沉积物总碳时空分布特征表现出不同趋势。养殖区总碳含量相对稳

定,四季间无显著差异,而对照区则表现出西面总碳含量高于北面和南面的趋势。根据温英研究[3]对枸杞岛 水文动力的研究,枸杞岛的潮流在经过嵊山岛时被分为两股,一股由嵊山岛北部向西流动,另一股由嵊山南部 流向西部,最终在西部区域汇集。这可能是导致对照区沉积物总碳含量较高的原因之一(图 4、图 5)。目前, 滤食性贝类的碳-源汇问题在国际上具有较大争议,从化学角度来看,贝类的呼吸作用和生物钙化过程会释 放 CO₂,因此属于碳源^[28]。但近年来越来越多的研究表明,从生态系统的视觉分析贝类养殖对碳循环的影响 更加科学客观[29-30]。滤食性贝类通过摄食活动大量捕获海水中的颗粒有机碳,以粪便和假粪的形式长久埋 藏在海底沉积,并通过生物矿化作用形成贝壳(主要成分碳酸钙),实现对海水中无机碳的吸收和固定,起到 了生物泵和环境耦联的作用,加速了不同形态的碳从活跃地表碳循环向缓慢地质碳循环的转化效率[31]。已 有研究指出,贝类养殖区周围的沉降速率和生物沉积作用明显,随着贝类年龄和养殖密度的增加,贝类的生物 沉积作用对沉积物有机碳含量的贡献也相应增加[32-33]。养殖区的无机碳含量显著高于对照区,这可能是由 于含有大量碳酸盐的贻贝贝壳在养殖和收获过程中掉落至海底。无机碳颗粒重量较大,沉降过程受水动力影 响较小。其分布格局同有机碳差异较大,同时也表明贻贝养殖活动对无机碳碳库的贡献较大。之前的研究多 聚焦海水养殖活动对沉积物有机碳的影响,忽略了无机碳碳库对碳埋藏的作用及意义。本研究发现养殖区的 沉积物无机碳含量和碳储量显著高于对照区,沉积物无机碳碳库主要以碳酸盐形式存在,不易受温度、微生物 分解等环境变化的影响,稳定性较高,是沉积物碳封存的重要成分。建议在后续评估贝类养殖活动对沉积物 碳库影响的探究中,应将无机碳纳入重要评价指标。

3.3 贻贝养殖区与对照区沉积物碳含量的影响因素

本文采用 Boruta 模型分析环境因素对沉积物碳组分的影响重要性。Boruta 模型通过重复比较原始特征 的重要性与阴影特征的重要性(后者通过打乱原始特征创建)选择评价指标。与传统的特征选择方法相比, Boruta 模型旨在捕捉与目标变量在某种程度上相关的所有特征,能更准确区分相关变量与非相关变量,适用 于生成稳健的知识体系[34-37]。根据 Boruta 模型分析结果, 贻贝养殖区中影响沉积物总碳分布特征的确定因 子为沉积物 pH 和硅酸盐,总氮为保留因子;在对照区,沉积物总碳的确定因子为总氮、硝酸盐和深度。pH 是 表征沉积物环境稳定性的重要指标,并影响沉积物中的离子交换能力[38]和微生物群落结构[39]。贝类主要摄 食海水中的硅藻,但无法利用其外壳中的硅,最终以粪便/假粪形式将硅排出体外[40]。此外,腐解贝类粪便具 有较高的硅酸盐再生速率[41],在贻贝养殖区中沉降的有机物和无机物在降解过程中释放的硅酸盐成为溶解 态硅的主要来源之一,为硅藻生长提供必需的营养元素。总氮是影响对照区沉积物总碳和养殖区有机碳的重 要环境因子。龙凤玲等[42]研究结果表明,氮含量增加有利于有机碳的积累和提高沉积物稳定性。但在氮源 匮乏区域,氮含量的增加却会加速有机碳的矿化速率,从而减少有机碳的储存[43],由此可见不同区域的总氮 对碳储存的作用机理存在差异。沉积物碳氮比是影响沉积物有机碳和无机碳的重要环境因子之一。沉积物 中营养元素碳氮化学计量比显著影响外源物质在沉积物中的周转速率和有机质矿化作用[44-45]。Vesterdal 等 $^{[46]}$ 的研究表明,低 C/N(高质量)环境更利于微生物生长 $^{[47]}$ 。在高 C/N 环境中,微生物需提供额外能量分 解代谢底物。本研究结果表明,C/N 在空间上存在显著差异,是影响沉积物有机碳空间分布差异的主要环境 因子之一。此外,贝类通过生物活动产生的颗粒有机碳在沉降过程及其迁移转化受水动力条件[2]、沉降速 率[48] 及底栖环境氧化还原条件[49] 等多种环境因素的综合影响。Lin 等[2] 的研究表明, 大规模的贝类筏式养 殖对表层水流的减缓显著超过底层,底层流速约为表层流速的2倍,较强的底层水动力环境携带大量粒径较 小的颗粒有机碳向周边海域迁移,导致贻贝养殖区邻近海域的沉积物有机碳含量显著增加[50]。因此,养殖贻 贝产生的假粪和粪便等颗粒有机碳同时受底层流速和沉降速度的综合作用,向养殖区周边海域扩散沉降,这 可能是导致养殖区内沉积物有机碳含量与对照区差异不显著的重要原因之一。此外,研究发现养殖区沉积物 中碳代谢相关的微生物活性显著高于临近海域,加剧了养殖区内沉积物有机碳的分解速率,造成了养殖区内 表层沉积物的有机碳不易储存[51]。总体来说,养殖区沉积物的总碳和无机碳主要受养殖贻贝生物沉积和环 境因素的综合影响,大规模的贻贝养殖活动间接改变了底栖环境的环境因素,有利于沉积物无机碳和总碳的 积累和储存(图8)。

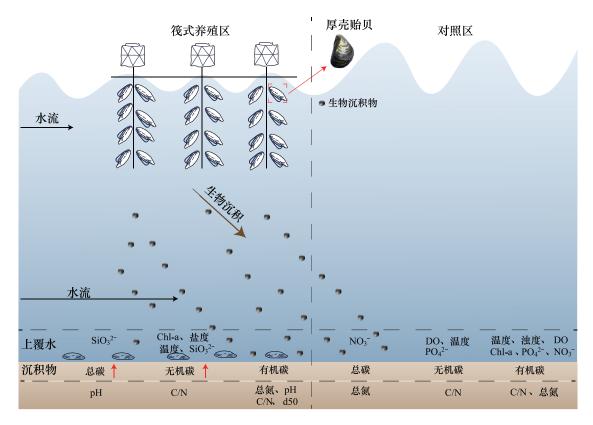


图 8 贻贝养殖对沉积物碳库分布特征及影响因素示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the distribution characteristics of sediment carbon pools and influencing factors in mussel farming

3.4 贻贝养殖对有机碳来源的影响及贡献

碳氮稳定同位素(δ^{13} C 和 δ^{15} N)是识别和追踪有机碳来源的重要工具。本研究采用 δ^{13} C 和 δ^{15} N 溯源沉积物有机碳。一般认为,陆源有机质来源的 δ^{13} C 范围是-28%—-26%。 δ^{15} N 的范围 3%—-5%。,海源 δ^{13} C 范围是-19%—-21%。 δ^{15} N 的范围为 5%—-7%。本研究养殖区以陆源为主,而对照区则以海源为主。可能是由于贻贝养殖区毗邻枸杞岛,枸杞岛丰富的植被和人类活动为养殖区提供了多元化的沉积物有机碳来源。贻贝养殖区的贝类生物沉积贡献显著高于对照区(P<0.05)。在夏季和秋季,处于繁殖期的贻贝会产生大量粪便/假粪 $^{[53]}$,成为养殖区沉积物有机碳的重要来源。然而,冬季成熟厚壳贻贝大量收获后,许多幼龄贻贝仍留在缆绳上。此时,养殖区的生物沉积作用贡献值显著低于对照区,这可能是因为较小的贻贝所产生的生物沉积物粒径较小,更易受海流影响,扩散至邻近海域,侧面证明了贻贝生物沉积作用对养殖区及其周边海域沉积物有机碳的贡献。

4 结论

本研究聚焦浙江枸杞岛贻贝筏式养殖区沉积物碳组分的时空分布特征,旨在探讨大规模的贻贝养殖活动对沉积物碳库的影响。养殖区和对照区的沉积物碳含量分布具有显著的空间异质性,养殖区的沉积物总碳和无机碳含量显著高于对照区,但有机碳含量虽略高于对照区,但差异不显著。这一发现揭示了贻贝养殖活动对沉积物碳储量的积极影响,尤其是无机碳的显著积累,有利于沉积物碳库的稳定性。从时间尺度上看,沉积物碳组分含量在不同季节间存在显著差异,但养殖区内的总碳含量相对稳定,表明养殖活动对沉积物碳库的调节作用具有一定的持续性。此外,研究发现养殖活动显著改变了沉积物的理化性质,如 pH、硅酸盐和总氮等,进而对沉积物碳组分的分布特征具有重要影响。基于 Boruta 模型明确了影响沉积物碳库变量的主要环

境要素及其重要性,并利用碳氮稳定同位素模型估算了贻贝养殖对沉积物有机碳来源的贡献。养殖区的沉积物有机碳以陆源为主,但贻贝的生物沉积作用对有机碳来源的贡献显著,进一步证实了贻贝养殖在碳循环中的重要作用。综上所述,本研究不仅揭示了枸杞岛贻贝养殖区沉积物碳含量的时空分布特征,还深入探讨了养殖活动对沉积物碳库的影响及其科学和现实意义。研究结果为评估贝类养殖活动对海洋碳循环的贡献提供了重要依据,也为未来海洋碳汇资源的开发和利用提供了科学参考。同时,本研究强调了无机碳在沉积物碳封存中的重要性,建议在后续研究中将无机碳纳入重要评价指标。

参考文献 (References):

- [1] Dickens A F, Gélinas Y, Masiello C A, Wakeham S, Hedges J I. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. Nature, 2004, 427 (6972): 336-339.
- [2] Lin J, Li C Y, Zhang S Y. Hydrodynamic effect of a large offshore mussel suspended aquaculture farm. Aquaculture, 2016, 451; 147-155.
- [3] 温英,林军,杨冠林,杨伟,唐建江.贻贝浮筏养殖设施水动力效应及附生海藻碎屑输运的数值模拟.上海海洋大学学报,2022,31(6):1549-1561.
- [4] Haven D S, Morales-Alamo R. Biodeposition as a factor in sedimentation of fine suspended solids in estuaries//Environmental Framework of Coastal Plain Estuaries. Boulder: Geological Society of America, 1972, 133; 121-130.
- [5] Dubischar C D, Bathmann U V. The occurrence of faecal material in relation to different pelagic systems in the Southern Ocean and its importance for vertical flux. Deep Sea Research Part II; Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(16); 3229-3242.
- [6] Schmidt S, Gonzalez J L, Lecroart P, Tronczyński J, Billy I, Jouanneau J M. Bioturbation at the water-sediment interface of the thau lagoon: impact of the thau lagoon: impact of shellfish farming. Aquatic Living Resources, 20(2): 163-169.
- [7] Zúñiga D, Castro C G, Aguiar E, Labarta U, Figueiras F G, Fernández-Reiriz M J. Biodeposit contribution to natural sedimentation in a suspended *Mytilus galloprovincialis* Lmk mussel farm in a Galician Ría (NW Iberian Peninsula). Aquaculture, 2014, 432: 311-320.
- [8] Pan Z, Gao Q F, Dong S L, Wang F, Li H D, Zhao K, Jiang X Y. 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 (δ¹³C and δ¹⁵N) with C/N ratio analyses. Marine Pollution Bulletin, 2019, 141: 387-397.
- [9] Liu S L, Jiang Z J, Zhang J P, Wu Y C, Huang X P, Macreadie P I. Sediment microbes mediate the impact of nutrient loading on blue carbon sequestration by mixed seagrass meadows. Science of the Total Environment, 2017, 599: 1479-1484.
- [10] 孙萱宋, 金明, 于颖, 孙玲玲. 元素分析仪快速测定海洋沉积物 TOC 和 TN 的条件优化. 海洋科学, 2014, 38(7): 14-19.
- [11] 薛成凤,盛辉,魏东运,杨阳,汪亚平,贾建军. 沉积物干容重分析及其沉积学意义:以东海内陆架海区为例. 海洋与湖沼, 2020, 51 (5): 1093-1107.
- [12] Zhao B, Yao P, Bianchi T S, Yu Z G. Controls on organic carbon burial in the Eastern China marginal seas: a regional synthesis. Global Biogeochemical Cycles, 2021, 35(4): e2020GB006608.
- [13] Sun X S, Fan D J, Cheng P, Hu L M, Sun X, Guo Z G, Yang Z S. Source, transport and fate of terrestrial organic carbon from Yangtze River during a large flood event: Insights from multiple-isotopes (δ¹³C, δ¹⁵N, Δ¹⁴C) and geochemical tracers. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 308: 217-236.
- [14] 黄洪辉, 林钦, 林燕棠, 贾晓平, 李纯厚, 王文质. 亚湾网箱养殖海域大型底栖动物的时空变化. 中国环境科学, 2005, (4): 412-416.
- [15] 梁庆洋,齐占会, 巩秀玉, 韩婷婷, 史荣君, 张文博, 谷阳光, 黄洪辉. 大亚湾鱼类深水网箱养殖对环境的影响. 南方水产科学, 2017, 13 (5): 25-32.
- [16] 郑旻, 罗敏, 潘彬彬, 陈多福. 海洋沉积物溶解氧消耗研究进展. 地球科学进展, 2023, 38(3): 236-255.
- [17] 王旭, 赵旭, 章守宇, 周曦杰. 枸杞岛贻贝养殖水域碳氮磷分布格局. 水产学报, 2015, 39(11): 1650-1664.
- [18] Dai S L, Zhou Y Y, Li N, Mao X Z. Why do red tides occur frequently in some oligotrophic waters? Analysis of red tide evolution history in Mirs Bay, China and its implications. Science of the Total Environment, 2022, 844: 157112.
- [19] Ghoshal K, Mazumder B S, Purkait B. Grain-size distributions of bed load: Inferences from flume experiments using heterogeneous sediment beds. Sedimentary Geology, 2010, 223(1/2): 1-14.
- [20] Purkait B. Grain-size distribution patterns of a point bar system in the Usri River, India. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(6): 682-702.
- [21] Chen Q, Liu D Y, Chen Y J, Wei J C, Dai W. Effect of mariculture on sediment grain size and its potential environmental significance in Sishili Bay, Yellow Sea, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(20): 1385.
- [22] Xia B, Han Q, Chen B J, Sui Q, Jiang T, Sun X M, Zhu L, Chai C, Qu K M. Influence of shellfish biodeposition on coastal sedimentary organic matter; a case study from Sanggou Bay, China. Continental Shelf Research, 2019, 172; 12-21.
- [23] Xu C, Yang B, Dan S F, Zhang D, Liao R Q, Lu D L, Li R H, Ning Z M, Peng S Q. Spatiotemporal variations of biogenic elements and sources of sedimentary organic matter in the largest oyster mariculture bay (Maowei Sea), Southwest China. Science of the Total Environment, 2020, 730-139056.
- [24] Alonso A A, Álvarez-Salgado X A, Antelo L T. Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. Journal of Cleaner

- Production, 2021, 279: 123873.
- [25] Feng J C, Sun L W, Yan J Y. Carbon sequestration via shellfish farming: a potential negative emissions technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171: 113018.
- [26] 吴紫琪,何语堂,羊妍珂,陶玉林,吴骏男,蒋振楠,严小军,廖智,刘雪珠,何建瑜.厚壳贻贝(Mytilus coruscus)养殖区沉积物微生物多样性及固碳潜力研究.海洋与湖沼,2023,54(2):502-513.
- [27] 张向东. 枸杞岛贻贝养殖海域沉积物特征研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2024.
- [28] Munari C, Rossetti E, Mistri M. Shell formation in cultivated bivalves cannot be part of carbon trading systems: a study case with *Mytilus galloprovincialis*. Marine Environmental Research, 2013, 92: 264-267.
- [29] Jiang Z J, Li J Q, Qiao X D, Wang G H, Bian D P, Jiang X, Liu Y, Huang D J, Wang W, Fang J G. The budget of dissolved inorganic carbon in the shellfish and seaweed integrated mariculture area of Sanggou Bay, Shandong, China. Aquaculture, 2015, 446: 167-174.
- [30] Filgueira R, Byron C J, Comeau L A, Costa-pierce B, Cranford P J, Ferreira J G, Grant J, Guyondet T, Jansen H M, Landry T, Mckindsey C W, Petersen J K, Reid G K, Robinson S M C, Smaal A, Sonier R, Strand R, Strohmeier T. An integrated ecosystem approach for assessing the potential role of cultivated bivalve shells as part of the carbon trading system. Marine Ecology Progress Series, 2015, 518: 281-287.
- [31] Keil R. Anthropogenic forcing of carbonate and organic carbon preservation in marine sediments. Annual Review of Marine Science, 2017, 9(1): 151-172.
- [32] Xie L, Yang B, Xu J, Dan S F, Ning Z M, Zhou J D, Kang Z J, Lu D L, Huang H F. Effects of intensive oyster farming on nitrogen speciation in surface sediments from a typical subtropical mariculture bay. Science of the Total Environment, 2024, 916: 170092.
- [33] Callier M D, Weise A M, McKindsey C W, Desrosiers G. Sedimentation rates in a suspended mussel farm (Great-Entry Lagoon, Canada): biodeposit production and dispersion. Marine Ecology Progress Series, 2006, 322; 129-141.
- [34] Kohavi R, John G H. Wrappers for feature subset selection. Artificial Intelligence, 1997, 97(1/2): 273-324.
- [35] Kursa M B, Rudnicki W R. Feature selection with the Boruta Package. Journal of Statistical Software, 2010, 36(11): 1-13.
- [36] Rudnicki W R, Wrzesień M, Paja W. All relevant feature selection methods and applications//Feature Selection for Data and Pattern Recognition. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 2014; 11-28.
- [37] Manhar M A, Soesanti I, Setiawan N A. A improving feature selection on heart disease dataset with boruta approach. Journal Forte-Jeeri, 2020, 1 (1): 41-48.
- [38] 刘世全, 张世熔, 伍钧, 庞学勇, 袁大刚. 土壤 pH 与碳酸钙含量的关系. 土壤, 2002, (5) : 279-282, 288.
- [39] Fierer N, Morse J L, Berthrong S T, Bernhardt E S, Jackson R B. Environmental controls on the landscape-scale biogeography of stream bacterial communities. Ecology, 2007, 88(9): 2162-2173.
- [40] Kido K, Nishimura M. Silica in the sea—its forms and dissolution rate. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1975, 22(5): 323-338.
- [41] van Broekhoven W, Troost K, Jansen H, Smaal A. Nutrient regeneration by mussel Mytilus edulis spat assemblages in a macrotidal system. Journal of Sea Research, 2014, 88: 36-46.
- [42] 龙凤玲, 李义勇, 方熊, 黄文娟, 刘双娥, 刘菊秀. 大气 CO_2 浓度上升和氮添加对南亚热带模拟森林生态系统土壤碳稳定性的影响. 植物 生态学报, 2014, 38(10): 1053-1063.
- [43] 席颖青, 李晓, 刘小飞. 模拟氮添加对亚热带杉木人工林土壤有机碳矿化的影响. 土壤, 2023, 55(1): 196-204.
- [44] Su L, Du H, Zeng F P, Peng W X, Rizwan M, Núñez-Delgado A, Zhou Y Y, Song T Q, Wang H. Soil and fine roots ecological stoichiometry in different vegetation restoration stages in a Karst area, southwest China. Journal of Environmental Management, 2019, 252; 109694.
- [45] Xia S P, Song Z L, Li Q, Guo L D, Yu C X, Singh B P, Fu X L, Chen C M, Wang Y D, Wang H L. Distribution, sources, and decomposition of soil organic matter along a salinity gradient in estuarine wetlands characterized by C: N ratio, δ¹³C-δ¹⁵N, and lignin biomarker. Global Change Biology, 2021, 27(2): 417-434.
- [46] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, Nilsson L O, Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 35-48.
- [47] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 837-843.
- [48] 吕旭宁. 滤食性贝类规模化养殖的环境效应及可持续生产模式探索[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [49] Wilding T A. Changes in sedimentary redox associated with mussel (*Mytilus* edulis L.) farms on the west-coast of Scotland. PLoS One, 2012, 7 (9); e45159.
- [50] Sun X, Filgueira R, Wang N, Han M, Guyondet T, Zhang X M. Vacuum effect: a redistribution process of organic carbon mediated by bivalve farming. ACS ES&T Water, 2023, 3(10): 3215-3222.
- [51] Moncada C, Hassenrück C, Gärdes A, Conaco C. Microbial community composition of sediments influenced by intensive mariculture activity. FEMS Microbiology Ecology, 2019, 95(2): fiz006.
- [52] Middelburg J J, Nieuwenhuize J. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. Marine Chemistry, 1998, 60(3/4): 217-225.
- [53] 顾忠旗, 田传远, 黄继, 付英杰, 倪梦麟. 厚壳贻贝筏式养殖技术. 科学养鱼, 2020, (6): 61-62.