

朱若思, 宋国栋, 刘素美. 黄、渤海沉积物耗氧速率的时空分布特征和环境影响因素[J]. 海洋学报, 2024, 46(5): 16–26, doi:10.12284/hyxb2024074

Zhu Ruosi, Song Guodong, Liu Sumei. Characteristics of spatial and temporal distribution of sediment oxygen consumption rate and environmental influence factors in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(5): 16–26, doi:10.12284/hyxb2024074

黄、渤海沉积物耗氧速率的时空分布特征 和环境影响因素

朱若思^{1,2,3}, 宋国栋^{1,2*}, 刘素美^{1,2}

(1. 中国海洋大学 深海圈层与地球系统前沿科学中心 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科技中心海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 沉积物耗氧 (SOC) 是海洋沉积物重要参数, 是海底沉积物有机质矿化速率的重要表征参数, 开展沉积物耗氧的研究有助于了解整个海洋的碳循环过程。陆架边缘海作为有机质矿化和埋藏最重要和最活跃的場所之一, 在全世界已经受到广泛关注与研究, 但是对于具有海洋环境典型季节变化的中国边缘海区域, 尤其是黄、渤海仍然缺乏相应的关注。本文使用整柱培养法, 分别于 2022 年 4 月、7 月和 10 月对黄、渤海沉积物耗氧进行研究, 结果表明黄、渤海沉积物耗氧速率为 7.11~17.33 mmol/(m²·d)。黄海春季沉积物耗氧速率与渤海无显著差异 (ANOVA, $p > 0.05$), 夏季 (ANOVA, $p < 0.01$) 和秋季 (ANOVA, $p < 0.01$) 黄海沉积物耗氧速率低于渤海; 黄海春季沉积物耗氧速率最高, 秋季次之, 夏季最小, 渤海夏季和秋季接近, 显著高于春季 (ANOVA, $p < 0.05$), 温度和沉积物 Chl *a* 浓度是主要影响因素。同时, 用沉积物耗氧速率来评估海底有机质矿化速率, 并与初级生产力相比较, 结果表明渤海海底有机质矿化与初级生产力的占比范围为 42.8%~74.5%, 是渤海碳循环的关键环节之一, 黄海海底沉积物有机质矿化在黄海碳循环中作用不如渤海显著。本文系统研究了黄、渤海沉积物耗氧速率及其时空分布特征, 探究了黄、渤海地区有机质矿化对初级生产力的贡献, 为理解黄、渤海区域有机质矿化和埋藏提供理论支持。

关键词: 沉积物耗氧; 有机质矿化; 温度; 沉积物 Chl *a*; 黄、渤海

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)05-0016-11

1 引言

自工业革命以来, 以煤、石油和天然气为代表的化石燃料大量被开采和利用, 使得大气中二氧化碳浓度由工业革命前的 280×10^{-6} 升高至 2023 年的 420×10^{-6} , 造成全球温室效应, 进而引起诸如海洋酸化^[1-3]和缺氧^[4]等一系列环境问题。占地球表面积 70% 以上的海洋, 其所承载的浮游植物将二氧化碳经光合作

用转化成有机质, 支撑了海洋生物的生命活动^[5-6]。尽管大部分有机质在沉降过程中未到达海底就被矿化, 但是海底沉积物仍然被认为是地球上最大的有机碳库^[7], 有机质埋藏有助于缓解温室效应。在全球海洋中, 陆架边缘海是大陆向海洋的延伸区域, 水深一般不超过 200 m, 面积约占整个海洋面积的 7%^[8], 但该区域沉积物耗氧可占整个海洋沉积物总耗氧 60% 左右^[9], 承载全球 40%~50% 的有机质矿化^[10-11]。研究

收稿日期: 2024-01-23; 修订日期: 2024-03-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42076035, 42376044, U1806211); 泰山学者项目。

作者简介: 朱若思 (1999—), 男, 江西省上饶市人, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: rosezhu@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 宋国栋, 男, 副教授, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: gsong@ouc.edu.cn

指出,海洋中约 88% 的有机质积累发生在距离海岸 500 km 的范围内^[12],因此陆架边缘海是有机质矿化和埋藏最重要和最活跃的場所之一。沉积物耗氧(Sediment Oxygen Consumption, SOC)是沉积物单位时间单位面积内的耗氧量,该过程以沉降至海底的活性有机质和氧气作为底物,通过一系列生物地球化学过程将一部分活性有机质转变为无机成分,重新参与到海洋碳循环中,剩余有机质则被埋藏并存储在海底沉积物中。目前国际上采用扩散耗氧通量、总扩散通量和涡度协方差技术测定氧通量等方法,对陆架边缘海地区 SOC 进行了广泛的研究^[13-18],但是研究区域主要集中在大西洋、欧洲近海以及北极圈等海域,有关西北太平洋边缘海尤其是黄、渤海区域鲜有学者关注。

黄海和渤海是西北太平洋陆架边缘海,黄海位于中国和朝鲜半岛之间,平均水深在 44 m 左右,受季节和黄海冷水团影响,中央海域底层水温常年保持在 8~12℃;渤海是中国唯一内海,平均水深只有 18 m,其通过渤海海峡与黄海连通。受人为活动影响,近几十年黄、渤海区域营养盐浓度在不断升高^[19-20],伴随着高的初级生产力(图 1a, 图 1b, 图 1c),产生的大量有机质经过沉降、矿化、再悬浮等过程,最终沉积在海底。然而,目前有关中国近海沉积物耗氧速率的研究仅有少数的研究关注黄、东海以及有限的海湾^[13,21],而对于渤海沉积物耗氧速率的研究鲜有涉及,同时,对于黄、渤海这种具有典型季节变化特征的沉积物耗氧的研究更是匮乏,这在一定程度上阻碍了我们对于沉积物耗氧以及有机碳收支的理解。我们假定黄、渤海沉积物耗氧与全球其他陆架边缘海类似,沉积物耗氧速率的时空分布规律受多种环境因素调控,在水深差异和温度跃层的影响下,黄海沉积物有机质矿化产物对初级生产力的贡献小,而渤海则有显著的贡献,因此渤海沉积物矿化对自身碳循环的影响要显著大于黄海。为检验上述假设,本研究以黄、渤海作为目标区域,采用现场沉积物采样和船基整柱培养的方式对该区域沉积物耗氧进行相关测量,旨在得到黄、渤海地区沉积物耗氧速率和时空变化,从而估算该区域沉积物的有机质矿化速率,并同时探讨了沉积物耗氧速率与环境理化因子的关系,为理解黄、渤海区域有机质矿化和埋藏提供理论支持。

2 材料与方 法

2.1 样品采集

2022 年 4 月、7 月和 10 月,搭载国家自然科学基金委在黄、渤海春、夏、秋 3 个季节的共享航次,每个

季节在 7 个站位(夏季航次缺少 H36 站)进行了现场取样并进行船基沉积物整柱培养测定耗氧速率(图 1d)。培养实验所用底层水取自船载 Niskin 采水器,温度、盐度、水深和水体 Chl *a* 浓度等信息来自于船载温盐深系统(Sea-bird CTD),底层水体溶解氧的测定采用 Winkler 滴定法,方法的精密度为 0.5%^[13],所用表层沉积物来自船载箱式采泥器。采集表层 0~3 cm 的沉积物 20 mL 放置于 8 cm × 12 cm 的封口袋中,立刻放置在-20℃ 冷库中保存,带回实验室冻干,用于孔隙度(ϕ)、含水率(w)、总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)、总氮(Total Nitrogen, TN)、沉积物 Chl *a* 和脱镁叶绿酸的测定。

2.2 沉积物耗氧培养实验

前人的研究已对柱培养测定沉积物耗氧速率实验进行了细致的描述^[13,22],本研究中依据采样的实际情况略有调整。选取无扰动且带有清澈上覆水的沉积物,缓慢均匀插入 6 根内径为 3.3 cm 的有机玻璃管(高度为 30 cm),塞上胶塞,将有机玻璃管缓慢拔出。将每一个小柱内沉积物的高度调整至有机玻璃管高度的一半,塞上气密性良好的塞子,通过温控精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的恒温控制箱控制循环水,在循环水中预培养 12 h。预培养结束后(记为 $t = 0$ 时刻)对其中 3 根柱取上覆水样品测定溶解氧含量 C_1 ,另外 3 根柱密封且置于暗处培养,培养 6 h 后取上覆水样品测定溶解氧含量 C_2 ,溶解氧的测定采用微量 Winkler 滴定法^[13]。

SOC 的计算公式如下:

$$\text{SOC} = \frac{C_1 - C_2}{t} \times 24 \times H, \quad (1)$$

式中, H 是上覆水的高度(0.12 m); t 是培养时间(6 h)。

2.3 样品测定

取少量冻干后的沉积物,研磨至粉末,通过元素分析仪测定 TN 和 TOC 的含量,其中 TN 直接测定,TOC 需经过盐酸处理后方可测定^[23],TN 和 TOC 的精密度分别为 2% 和 5%。沉积物中 Chl *a* 和脱镁叶绿酸用荧光法测定^[24],精密度为 10.9%,通过冻干前后的质量差以及沉积物体积计算沉积物孔隙度 ϕ 和含水率 w 。将水柱分层,根据深度进行 Chl *a* 浓度积分,从而得到 Chl *a* 水柱积分^[25]。

孔隙度 ϕ 、含水率 w 和 Chl *a* 水柱积分的计算公式如下:

$$\phi = (M_1 - M_2) \times \frac{1}{\rho \times V}, \quad (2)$$

$$w = (M_1 - M_2) \times \frac{100\%}{M_1}, \quad (3)$$

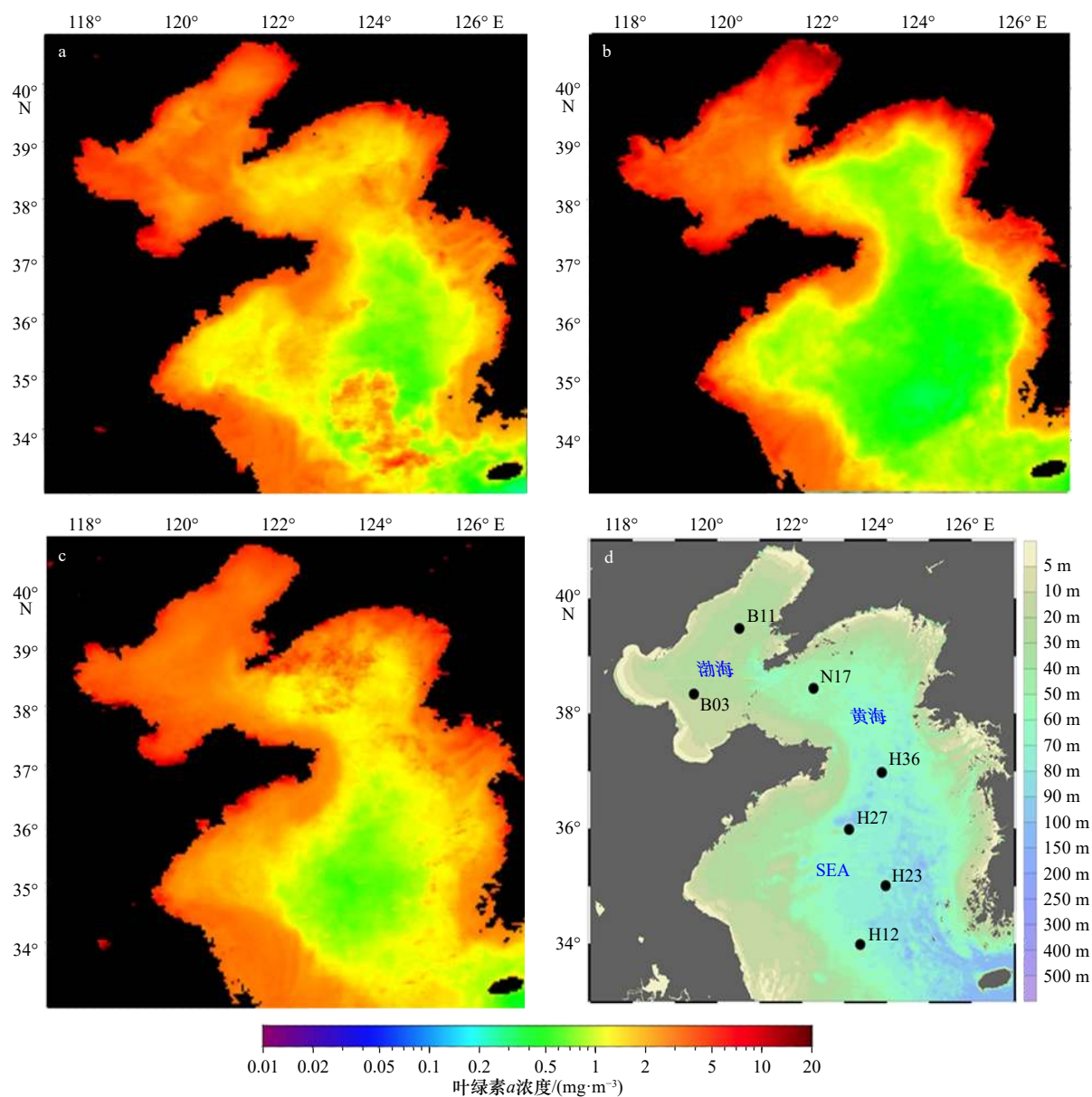


图 1 春季(a)、夏季(b)和秋季(c)背景叶绿素 a 浓度及黄、渤海取站点(d)

Fig. 1 Background chlorophyll a concentration in the Yellow Sea and Bohai Sea in spring (a), summer (b), autumn (c) and sampling stations (d)

数据源于 NASA Ocean Color (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>)

The data are based on the online data of NASA Ocean Color (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/>)

$$\text{Chl } a_{(\text{int})} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\text{Chl } a_{(i)} + \text{Chl } a_{(i+1)}}{2} \times (D_{i+1} - D_i), \quad (4)$$

式中, M_1 和 M_2 为沉积物冻干前后的质量; ρ 为海水的密度 (1.02 g/mL); V 为沉积物体积 (20 mL); $\text{Chl } a_{(\text{int})}$ 是 $\text{Chl } a$ 水柱积分 (单位: mg/m^2); $\text{Chl } a_{(i)}$ 是在第 i 层中的 $\text{Chl } a$ 浓度 (单位: mg/m^3); D_i 是在第 i 层中的采样深度 (单位: m); n 是采样层。

2.4 数据处理及统计分析

用 Pearson 相关性分析判断沉积物耗氧速率与环境因子的相关性, 用 ONE WAY ANOVA 判断沉积物

耗氧速率之间的显著性差异, 显著性水平设为 0.05; 用多元线性回归判断环境因子对沉积物耗氧速率的影响程度。本文中站位图用 ODV 5.0 绘制, 相关性热图用 Origin 2021 绘制, 其他图形用 Sigmaplot 14.0 和 Surfer 20 绘制。

3 结果与讨论

3.1 黄、渤海水体和沉积物理化性质

研究区域包含整个黄、渤海, 研究季节涉及春、夏和秋 3 个季节, 进行 SOC 培养实验站点沉积物和

上覆水的理化性质如表1。研究区域培养站位底层水温度范围是6.69~17.78℃,黄海区域底层水受纬度和黄海冷水团影响,3个季节底层水温度均在6.7~12.2℃,无显著季节差异(ANOVA, $p > 0.05$),渤海区域水深较浅,底层水受季节影响,春季底层水温度显著低于夏季(ANOVA, $p < 0.01$)和秋季(ANOVA, $p < 0.01$)。底层水DO浓度的范围是100.7~278.6 $\mu\text{mol/L}$,黄海区域底层水DO浓度呈现春季最高、夏季次之、秋季最低的特点,而渤海区域底层水DO浓度呈现春、秋季高,夏季低的特点。底层水盐度范围是29.49~33.11,黄海略高于渤海。沉积物的孔隙度在50%~93%之间,含水率最高的是黄海南部的H27站位,最低的是黄海中部的H36站位,整体范围是29%~69%。含水率高的站位集中在黄海南部和黄海北部,孔隙度较小的站位集中在渤海和黄海中部,表层沉积物中TOC和TN的范围分别是0.34%~1.67%和0.03%~0.23%,无季节差异(ANOVA, $p >$

0.05)。沉积物Chl *a*的浓度范围是0.6~18.1 $\mu\text{g/g}$,黄、渤海区域呈现春、秋季高,夏季低的特点,水体Chl *a*积分的范围是0.5~302.3 mg/m^2 。

3.2 黄、渤海SOC的时空分布

培养结束后所有站位上覆水体中溶解氧浓度均有明显下降,这表明培养体系中氧气被显著消耗。黄、渤海区域沉积物耗氧速率为7.11~17.33 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,平均耗氧速率为 $(12.35 \pm 3.62) \text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,与其他学者关于大陆架边缘海沉积物耗氧速率的研究一致^[13-18]。春、夏和秋季3个季节黄海和渤海区域沉积物耗氧速率的季节差异如图2d所示,黄海区域春季沉积物耗氧速率显著大于夏季(ANOVA, $p < 0.01$)和秋季(ANOVA, $p < 0.01$),夏季沉积物耗氧速率大于秋季沉积物耗氧速率;渤海区域春季沉积物耗氧速率小于夏季(ANOVA, $p < 0.05$)和秋季(ANOVA, $p < 0.05$),夏季和秋季沉积物耗氧速率无显著差异(ANOVA, $p > 0.05$)。

表1 培养站位沉积物和底层水基本性质
Table 1 Basic properties of sediment and bottom water at incubation stations

站位	时间	水深/m	水温/℃	盐度	底层水DO浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	孔隙 度/%	含水 率/%	TOC/%	TN/%	C/N (mol/mol)	沉积物Chl <i>a</i> 浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	沉积物Chl <i>a</i> / 脱镁叶绿酸	Chl <i>a</i> 水柱积分/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)
H12	2022年春	69	10.58	33.00	226.9	81	55	0.77	0.13	5.1	3.9	0.61	164.1
	2022年夏		10.88	33.11	185.4	73	49	0.78	0.09	7.4	0.9	0.26	57.4
	2022年秋		12.08	32.23	138.2	81	54	0.81	0.09	7.7	1.7	0.77	120.9
H23	2022年春	77	9.86	32.96	222.8	66	47	0.71	0.12	5.1	6.4	1.17	101.2
	2022年夏		10.10	32.97	189.7	70	50	0.72	0.09	6.9	0.6	0.24	126.6
	2022年秋		10.32	32.90	156.7	66	46	0.65	0.09	6.2	0.8	0.51	108.3
H27	2022年春	68	9.52	32.87	214.9	81	61	1.21	0.20	5.2	12.7	1.56	168.3
	2022年夏		9.22	32.68	165.8	93	69	1.36	0.16	7.3	1.3	0.23	181.1
	2022年秋		9.46	32.46	135.1	81	60	1.45	0.22	5.6	4.1	0.93	241.3
H36	2022年春	72	8.63	32.52	238.8	50	30	0.34	0.04	7.3	5.2	1.33	277.9
	2022年秋		9.55	32.47	161.1	50	29	0.34	0.03	9.7	1.1	0.79	172.2
N17	2022年春	54	6.69	31.70	262.6	84	59	1.43	0.23	5.3	4.6	0.40	124.3
	2022年夏		8.24	31.80	226.3	82	59	1.67	0.19	7.5	4.1	0.64	302.3
	2022年秋		12.2	31.56	134.4	84	58	1.52	0.19	6.9	5.4	0.67	135.1
B03	2022年春	21	7.79	30.13	278.6	69	43	0.74	0.12	5.3	18.1	3.50	115.4
	2022年夏		17.25	29.92	105.6	78	54	0.66	0.09	6.3	2.5	0.47	155.4
	2022年秋		17.78	29.49	206.0	69	42	0.54	0.06	7.7	3.1	2.41	85.4
B11	2022年春	23	7.37	31.28	272.1	70	44	0.59	0.10	5.1	3.0	1.13	38.2
	2022年夏		16.36	30.62	100.7	73	46	0.65	0.06	9.3	1.2	0.35	93.1
	2022年秋		17.39	30.14	193.7	70	43	0.56	0.06	8.0	3.1	1.40	0.5

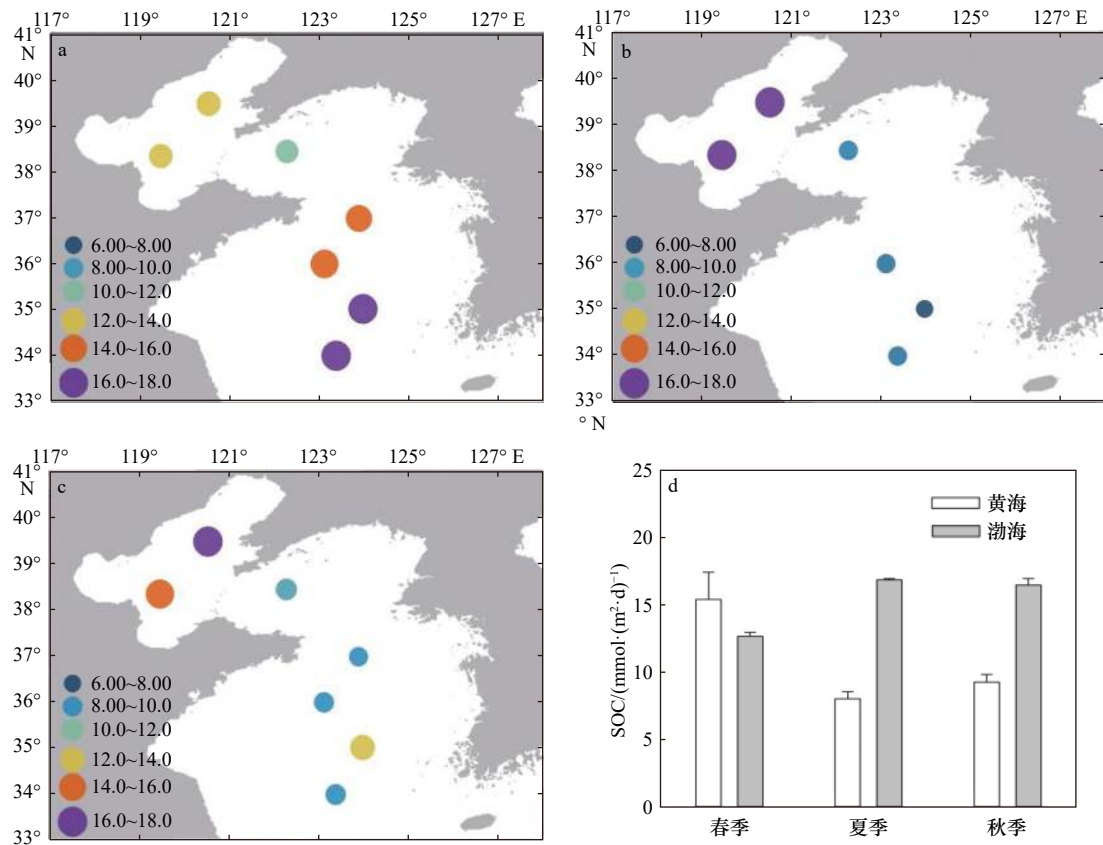


图2 黄、渤海沉积物耗氧速率空间分布(春季(a)、夏季(b)和秋季(c))和季节变化(d)(单位: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)
Fig. 2 Spatial distribution (spring (a), summer (b) and autumn (c)) and seasonal variation (d) of SOC in the Yellow Sea and Bohai Sea (unit: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)

黄、渤海区域春季沉积物耗氧速率空间分布如图2a所示, H12 站位耗氧速率最大, 为 $17.33 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; N17 站位速率最小, 为 $11.82 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。黄海表层沉积物耗氧速率范围是 $11.82 \sim 17.33 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(15.36 \pm 2.01) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 渤海表层沉积物耗氧速率范围是 $12.35 \sim 12.93 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(12.64 \pm 0.29) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 黄海沉积物耗氧速率与渤海沉积物耗氧速率无显著差异 (ANOVA, $p > 0.05$)。夏季沉积物耗氧速率空间分布如图2b所示, B11 站位速率最大, 为 $16.91 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; H23 站位速率最小, 为 $7.11 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。其中黄海沉积物耗氧速率为 $7.11 \sim 8.43 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(8.03 \pm 0.53) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 渤海沉积物耗氧速率为 $16.69 \sim 16.91 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(16.8 \pm 0.11) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 黄海沉积物耗氧速率显著小于渤海沉积物耗氧速率 (ANOVA, $p < 0.01$)。秋季沉积物耗氧速率空间分布如图2c所示, B11 站位速率最大, 为 $16.91 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; H36 站位速率最小, 为 $8.46 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。黄海表层沉积物耗氧速率范围是 $8.46 \sim 10.15 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(9.25 \pm 0.58) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;

渤海表层沉积物耗氧速率范围是 $15.97 \sim 16.91 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均耗氧速率为 $(16.44 \pm 0.47) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 黄海沉积物耗氧速率显著小于渤海 (ANOVA, $p < 0.01$)。

3.3 环境因子对黄、渤海沉积物耗氧速率的影响

沉积物耗氧速率及其时空分布特征受多种环境因素调控, 比如温度^[13]、底层水 DO 浓度^[26-28]、沉积物 Chl *a* 浓度、水体流速^[29-30]、沉积物类型^[31-32] 等, 本研究分析了黄、渤海沉积物耗氧速率与温度、DO 浓度、TOC 浓度、TN 浓度、C/N、含水率、孔隙度、沉积物 Chl *a* 浓度、沉积物中 Chl *a*/脱镁叶绿素和 Chl *a* 水柱积分的相关性(图3)。

由黄、渤海沉积物耗氧速率与环境因子的相关性热图知, 黄、渤海沉积物耗氧速率与 DO 浓度、TOC 浓度、TN 浓度、C/N、含水率、孔隙度、沉积物 Chl *a* 浓度、沉积物中 Chl *a*/脱镁叶绿素和 Chl *a* 水柱积分均无相关性, 只与温度呈正相关 ($r = 0.49, p < 0.05$), 随着温度的升高, 沉积物耗氧速率变大。黄、渤海区域培养站位底层水温度区间是 $6.69 \sim 17.78^\circ\text{C}$, 在此区间微生物体内酶的活性随着温度的升高而增

大,从而促进生物生命活动和有机质的降解,进而使得沉积物耗氧速率变大^[33]。然而,沉积物耗氧速率往往同时受多个环境因素影响,仅仅根据相关性分析来判断某个环境因素是否为沉积物耗氧速率的影响因子是不够的,我们还需要知道该影响因子对沉积物耗氧速率的影响程度。为此我们借助多元线性回归模型,将沉积物耗氧速率作为因变量,温度、DO浓度、TOC浓度、TN浓度、C/N、含水率、孔隙度、沉积物Chl *a*浓度、沉积物中Chl *a*/脱镁叶绿酸和Chl *a*水柱积分作为自变量进行多元线性回归,根据多元线性回归模型中决定系数的大小来判断环境因子对沉积物耗氧速率的影响程度,结果显示决定系数为0.608。进一步将沉积物耗氧速率与环境因子进行步进式多元线性回归,结果显示决定系数较大的环境因素为温度和沉积物Chl *a*浓度,分别为0.436和0.148(图4)。DO浓度对决定系数的影响很小,它的引入对决定系数的影响也很小,其他环境因子的结果与DO浓度类似,几乎不改变决定系数。因此温度和沉积物Chl *a*浓度是黄、渤海沉积物耗氧速率的影响因子,两者能够共同解释黄、渤海区域60.8%沉积物耗氧速率的变化,且温度对黄、渤海沉积物耗氧速率的影响比沉积物Chl *a*浓度大。

黄海区域沉积物耗氧速率呈现春季最大、秋季次

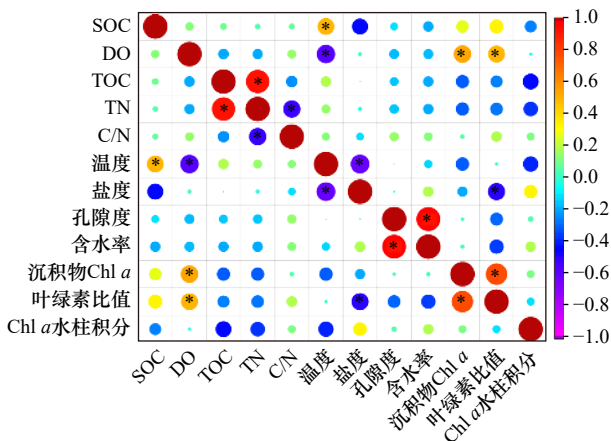


图3 黄、渤海沉积物耗氧速率与环境因子相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between sediment oxygen consumption rates and environmental factors in the Yellow Sea and Bohai Sea

叶绿素比值:沉积物中Chl *a*/脱镁叶绿酸;圆圈的颜色和大小代表着两个变量之间的相关程度,其值介于-1与1之间,与色标对应;

“*”代表着两个变量之间存在显著的相关性($p < 0.05$)

Chlorophyll ratio: Chl *a*/pheophytin in sediment; the color and size of the circles represent the degree of correlation between the two variables, which ranges from -1 to 1, corresponding to the color scale; the “*” represents a significant correlation between the two variables ($p < 0.05$)

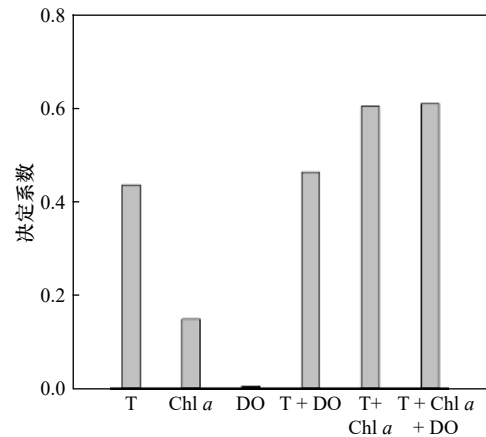


图4 多元线性回归中不同环境因子的决定系数 (Chl *a*为沉积物Chl *a*含量)

Fig. 4 Coefficients of determination of different environmental factors in multiple linear regression (Chl *a* content is the sediment Chl *a*)

之、夏季最小的特征,与黄海沉积物Chl *a*浓度季节变化趋势一致,春季沉积物Chl *a*浓度显著大于夏季(ANOVA, $p < 0.05$),夏季沉积物Chl *a*浓度平均值小于秋季沉积物Chl *a*浓度平均值,这与初级生产力的季节变化息息相关。黄、渤海区域初级生产力具有双峰分布特征,高值集中在4月和11月,因此春季和秋季沉积物Chl *a*浓度会高于夏季,这与我们的研究结果一致。北黄海秋季沉积物耗氧速率最大,春季次之,夏季最小,可能是温度和沉积物Chl *a*浓度共同作用的结果,该站位(N17)秋季温度可达12℃。渤海区域春季沉积物耗氧速率显著小于夏季(ANOVA, $p < 0.01$)和秋季(ANOVA, $p < 0.01$),夏季沉积物耗氧速率和秋季沉积物耗氧速率无显著差异(ANOVA, $p > 0.05$),这很可能是温度差异导致的,因为培养站位B03和B11夏季和秋季底层水的温度均在16℃以上,而春季只有6~10℃,春季底层水温显著低于夏季(ANOVA, $p < 0.01$)和秋季(ANOVA, $p < 0.01$)。春季黄海沉积物耗氧速率大于渤海沉积物耗氧速率,夏季和秋季黄海沉积物耗氧速率大于渤海沉积物耗氧速率,这主要与温度密切相关。春季黄、渤海区域底层水温受季节影响,与纬度变化呈强负相关($r = -0.952$, $p < 0.01$),黄海大于渤海;夏秋季受温度跃层和水深影响,黄海小于渤海(ANOVA, $p < 0.01$),因此黄海沉积物耗氧的季节变化受温度和沉积物Chl *a*浓度共同影响。

3.4 黄海冷水团对沉积物SOC的限制

沉积物耗氧量是海底沉积物有机质矿化的重要表征参数^[34-35],可基于有机质降解过程中碳和氧之间

的化学计量关系^[11, 35], 间接估计海底有机质矿化速率(TC_{oxid})。沉积物耗氧速率与有机质矿化速率的比值范围是 0.8~1.2^[11], 若忽略部分氧气未参与的氧化还原过程, 通常可以使用 1:1 的比例来计算有机质矿化速率。这些过程通常与有机质的厌氧矿化密切相关, 如以硝酸盐为电子受体的反硝化作用以及硫化物的埋藏, 据估计这些过程通常占总耗氧的 15% 左右^[36]; 另外, 海洋沉积物中部分有机质矿化产物被氧化耗氧量最多可占总耗氧的 20%^[37], 因此, 在确定沉积物耗氧速率与有机质矿化速率转化比例时, 以上两部分的影响刚好近乎抵消, 这种估算方法已广泛应用于海底沉积物碳循环研究中^[31, 38]。

黄、渤海海底有机质矿化速率(以碳计)为 7.11~17.33 $mmol/(m^2 \cdot d)$, 均值为 $(12.38 \pm 3.62) mmol/(m^2 \cdot d)$ 。本研究比较了不同季节黄海和渤海海底有机质矿化

速率与初级生产力, 结果如图 5 所示。渤海和黄海有机质矿化速率平均值分别占初级生产力平均值的 53.9% 和 18.4%, 其中渤海春季有机质矿化速率为初级生产力的 42.8%, 夏季为 49.9%, 秋季高达 74.5%。渤海春、夏、秋 3 个季节水体 Chl *a* 浓度和温度随水深变化如图 6, 春季部分站位水体 Chl *a* 浓度随深度的增加而增大, 夏季水体 Chl *a* 浓度随深度的增加先增大后减小, 秋季上下水体温度均匀, 水体 Chl *a* 浓度随深度的增加先减小后增加, 这说明大部分活性有机质能够快速沉降至底层。一般而言, 海底有机质矿化与初级生产力的比值越大, 表明海底有机质矿化对于初级生产力的贡献就越大, 渤海有机质矿化速率平均值超过初级生产力平均值的一半, 说明渤海海底有机质矿化是渤海碳循环中关键过程之一, 夏秋季节较高的底层水温有利于有机质矿化再生, 不利于有机碳的埋藏。

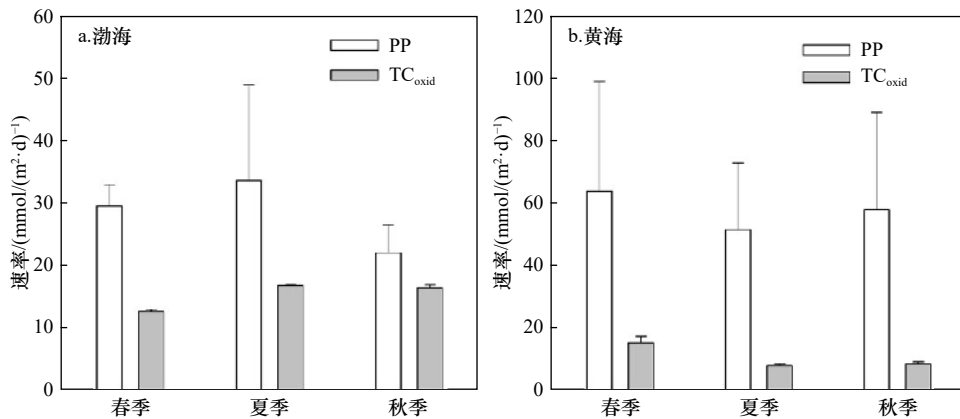


图 5 黄、渤海海底有机质矿化速率(以碳计)(TC_{oxid})与初级生产力(PP)的关系

Fig. 5 Relationship between benthic organic carbon mineralization (TC_{oxid}) and primary productivity (PP) in the Yellow Sea and Bohai Sea

渤海 PP 平均值(图 a)来源于费尊乐等^[42]、王俊等^[43]和吕培顶等^[44], 黄海 PP 平均值(图 b)来源于 Zhang 等^[45]

The mean values of PP (Fig. a) in the Bohai Sea are obtained from Fei et al.^[42], Wang et al.^[43], and Lv et al.^[44], and the mean values of PP (Fig. b) in the Yellow Sea are obtained from Zhang et al.^[45]

相较于渤海, 黄海春季有机质矿化速率为初级生产力的 24.0%, 夏季为 15.5%, 秋季为 14.6%, 黄海较低的比值可能是水深和水团分层共同作用的结果。黄海春、夏、秋 3 个季节水体 Chl *a* 浓度和温度随水深变化如图 6, 春季和夏季水体 Chl *a* 浓度随深度的增加先增大后减小, 秋季水体 Chl *a* 浓度随深度的增加而减小, 底层水体 Chl *a* 浓度与水柱中水体 Chl *a* 浓度峰值之比不足 3%, 因此我们推测大部分活性有机质在到达海底之前就已经被降解了^[13], 这表明了在黄海的水柱中有机质处于一个快速循环状态。黄海春季绝大部分研究站位温度跃层不明显, 矿化产物可以被运输到真光层参与光合作用。黄海夏季叶绿素最大值层在温度跃层

之下, 矿化所产生的无机营养盐虽无法跨过温度跃层, 但可以被叶绿素最大值层的浮游植物利用, 从而为初级生产力做出贡献。秋季黄海叶绿素最大值层在温度跃层之上, 矿化所产生的无机营养盐既无法跨过温度跃层, 又难以被叶绿素最大值层的浮游植物利用, 只能被储存在底层水体中, 等待秋末冬初温度跃层消失, 由强烈的垂直混合作用将其输送到上层水体, 为黄海春季藻华提供营养盐基础。同时考虑到黄海有机质矿化速率平均值与初级生产力平均值的占比仅为 18.4%, 因此黄海海底有机质矿化在黄海碳循环中作用很小。事实上, 再生生产力在黄海中占主导地位^[39], 此外, 大气沉降的贡献也可能达 30%~50%^[23, 40-41]。因

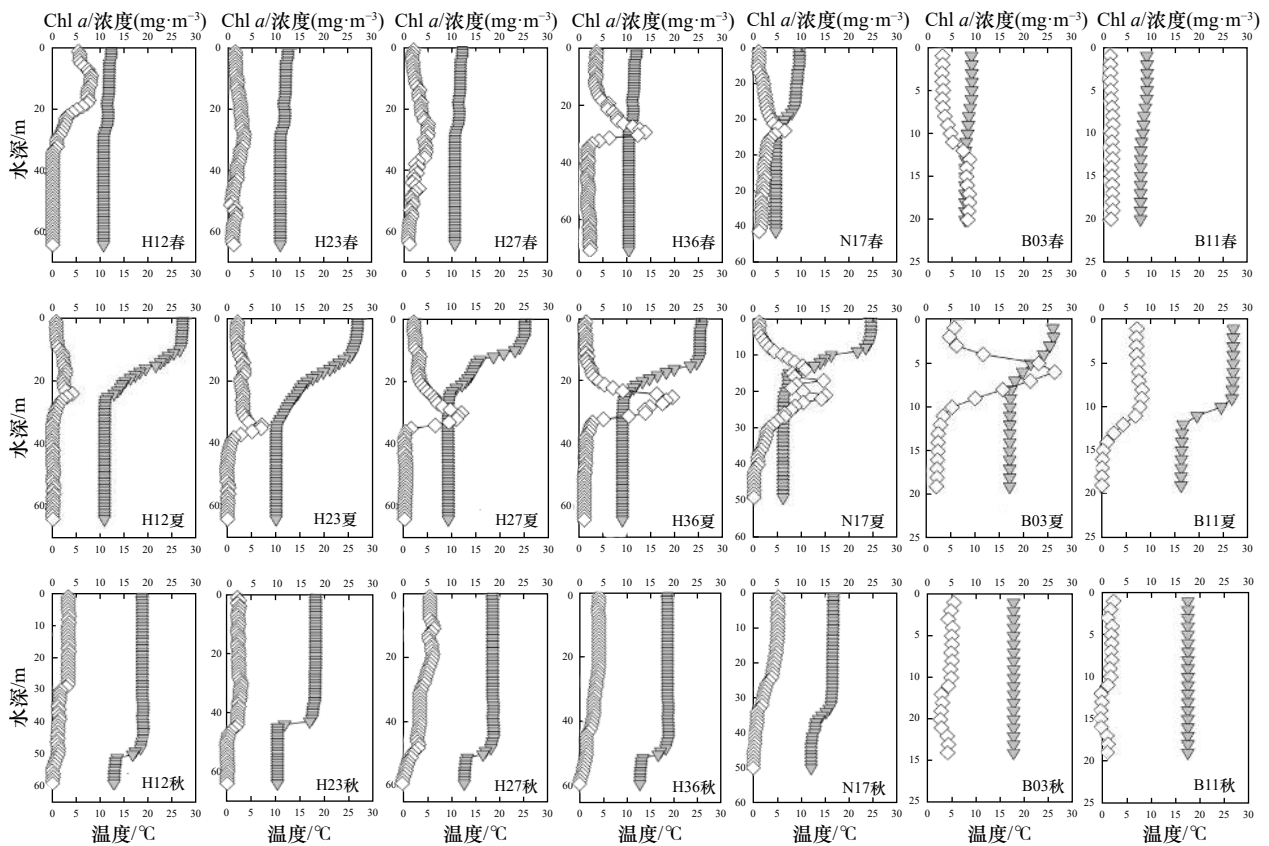


图6 春季、夏季和秋季黄、渤海水体 Chl *a* 浓度(白色)和温度(灰色)随水深变化

Fig. 6 Variation of water column Chl *a* concentration (white) and temperature (gray) with water depth in spring, summer and autumn in the Yellow Sea and Bohai Sea

此,温跃层的存在使得夏秋季黄海底层水处于低温状态,不利于有机质的矿化,有利于有机质的埋藏。

4 结论

我们通过对黄、渤海区域进行船基整柱培养实验,得到黄、渤海沉积物耗氧速率为 $7.11\sim 17.33\text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。其中春季沉积物耗氧速率范围是 $11.71\sim 17.33\text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,黄海和渤海沉积物耗氧速率无显著差异;夏、秋季沉积物耗氧速率范围分别是 $7.11\sim 16.91\text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $7.59\sim 16.91\text{ mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,黄海沉积物耗氧速率均显著小于渤海沉积物耗氧速率,黄、渤海区域沉积物耗氧速率的时空变化特征受温度和沉积物 Chl *a* 共同影响,两者能够共同解释黄渤海区

域 60.8% 沉积物耗氧速率的变化。同时,我们将黄、渤海有机质矿化速率与初级生产力相比较,渤海和黄海有机质矿化速率平均值分别占初级生产力平均值的 53.9% 和 18.4% ,说明渤海海底有机质矿化是渤海碳循环中关键过程之一,黄海海底沉积物有机质矿化在黄海碳循环中作用不如渤海显著。该研究为理解黄渤海区域有机质矿化和埋藏提供理论支持,有助于加强对全球碳循环的认识与理解。

致谢: 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(项目批准号:42149901)的资助。该航次(航次编号:NORC2022-01)由“蓝海101”号科考船实施,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Caldeira K, Wickett M E. Anthropogenic carbon and ocean pH[J]. *Nature*, 2003, 425(6956): 365–365.
- [2] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms[J]. *Nature*, 2005, 437(7059): 681–686.
- [3] Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. Ocean acidification: the other CO₂ problem[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 169–192.
- [4] Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 80(3/4): 113–128.
- [5] Colijn F, de Jonge V N. Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1984,

- 14(2/3): 185–196.
- [6] Glud R N, Kühl M, Wenzhöfer F, et al. Benthic diatoms of a high Arctic fjord (Young Sound, NE Greenland): importance for ecosystem primary production[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 238: 15–29.
- [7] Dunne J P, Sarmiento J L, Gnanadesikan A. A synthesis of global particle export from the surface ocean and cycling through the ocean interior and on the seafloor[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): GB4006.
- [8] Menard H W, Smith S M. Hypsometry of ocean basin provinces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(18): 4305–4325.
- [9] Jørgensen B B, Wenzhöfer F, Egger M, et al. Sediment oxygen consumption: role in the global marine carbon cycle[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 228: 103987.
- [10] Middelburg J J, Soetaert K, Herman P M J. Empirical relationships for use in global diagenetic models[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1997, 44(2): 327–344.
- [11] Glud R N. Oxygen dynamics of marine sediments[J]. *Marine Biology Research*, 2008, 4(4): 243–289.
- [12] Wallmann K, Pinero E, Burwicz E, et al. The global inventory of methane hydrate in marine sediments: a theoretical approach[J]. *Energies*, 2012, 5(7): 2449–2498.
- [13] Song Guodong, Liu Sumei, Zhu Zhuoyi, et al. Sediment oxygen consumption and benthic organic carbon mineralization on the continental shelves of the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 124: 53–63.
- [14] Reimers C E, Özkan-Haller H T, Berg P, et al. Benthic oxygen consumption rates during hypoxic conditions on the Oregon continental shelf: evaluation of the eddy correlation method[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C2): C02021.
- [15] Laursen A E, Seitzinger S P. The role of denitrification in nitrogen removal and carbon mineralization in Mid-Atlantic Bight sediments[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(9): 1397–1416.
- [16] Boon A R, Duineveld G C A, Kok A. Benthic organic matter supply and metabolism at depositional and non-depositional areas in the North Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(5): 747–761.
- [17] Lohse L, Epping E H G, Helder W, et al. Oxygen pore water profiles in continental shelf sediments of the North Sea: turbulent versus molecular diffusion[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 145: 63–75.
- [18] Devol A H, Codispoti L A, Christensen J P. Summer and winter denitrification rates in western Arctic shelf sediments[J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(9): 1029–1050.
- [19] Wei Qinsheng, Yao Qingzhen, Wang Baodong, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 184–196.
- [20] Wang Junjie, Yu Zhigang, Wei Qinsheng, et al. Long-term nutrient variations in the Bohai Sea over the past 40 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 703–722.
- [21] 张学雷, 朱明远, 陈尚, 等. 桑沟湾和胶州湾沉积物耗氧率研究 [J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(1): 91–96.
Zhang Xuelei, Zhu Mingyuan, Chen Shang, et al. Study on sediment oxygen consumption rate in the Sanggou Bay and Jiaozhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(1): 91–96.
- [22] Rysgaard S, Glud R N, Risgaard-Petersen N, et al. Denitrification and anammox activity in Arctic marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1493–1502.
- [23] Zhang Guosen, Zhang Jing, Liu Sumei. Characterization of nutrients in the atmospheric wet and dry deposition observed at the two monitoring sites over Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2007, 57(1): 41–57.
- [24] 李肖娜, 刘素美, 吕瑞华, 等. 东、黄海沉积物中叶绿素的分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(4): 603–610.
Li Xiaona, Liu Sumei, Lv Ruihua, et al. An analysis of chlorophyll in the sediments of East China Sea and Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 603–610.
- [25] 陈莹. 海洋环境变化对南海叶绿素 a 浓度的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
Cheng Ying. Effects of marine environmental changes on chlorophyll a in the South China Sea[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022.
- [26] Lehrter J C, Beddick D L, Devoreux R, et al. Sediment-water fluxes of dissolved inorganic carbon, O₂, nutrients, and N₂ from the hypoxic region of the Louisiana continental shelf[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 109(1/3): 233–252.
- [27] Murrell M C, Lehrter J C. Sediment and lower water column oxygen consumption in the seasonally hypoxic region of the Louisiana continental shelf[J]. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34(5): 912–924.
- [28] Rowe G T, Kaegi M E C, Morse J W, et al. Sediment community metabolism associated with continental shelf hypoxia, northern Gulf of Mexico[J]. *Estuaries*, 2002, 25(6): 1097–1106.
- [29] Josiam R M, Stefan H G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: comparison of theory and experiments[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 433–439.
- [30] O'Connor B L, Hondzo M. Dissolved oxygen transfer to sediments by sweep and eject motions in aquatic environments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 566–578.
- [31] Giles H, Pilditch C A, Nodder S D, et al. Benthic oxygen fluxes and sediment properties on the northeastern New Zealand continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(18): 2373–2388.
- [32] Utley B C, Vellidis G, Lowrance R, et al. Factors affecting sediment oxygen demand dynamics in blackwater streams of Georgia's coastal

- plain[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(3): 742–753.
- [33] Zhang Yan, Li Jintao, Xu Xiao, et al. Temperature fluctuation promotes the thermal adaptation of soil microbial respiration[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(2): 205–213.
- [34] Seiter K, Hensen C, Zabel M. Benthic carbon mineralization on a global scale[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1010.
- [35] Canfield D E, Jørgensen B B, Fossing H, et al. Pathways of organic carbon oxidation in three continental margin sediments[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1/2): 27–40.
- [36] Canfield D E, Kristensen E, Thamdrup B. Aquatic geomicrobiology[J]. *Advances in Marine Biology*, 2005, 48: 1–599.
- [37] Anderson L A, Sarmiento J L. Redfield ratios of remineralization determined by nutrient data analysis[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(1): 65–80.
- [38] Middelburg J J, Duarte C M, Gattuso J P. Respiration in coastal benthic communities[M]//del Giorgio P, Williams P. Respiration in Aquatic Ecosystems. Oxford: Oxford University Press, 2005: 206–224.
- [39] Park M G, Yang S R, Shim J H, et al. Apparent dominance of regenerated primary production in the Yellow Sea[J]. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2004, 39(1): 20–25.
- [40] Liu Sumei, Zhang Jing, Chen Shuzhu, et al. Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(11/13): 1161–1174.
- [41] Shi Jinhui, Gao Huiwang, Zhang Jing, et al. Examination of causative link between a spring bloom and dry/wet deposition of Asian dust in the Yellow Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D17): D17304.
- [42] 费尊乐, 毛兴华, 朱明运, 等. 渤海生产力研究—II. 初级生产力及潜在渔获量的估算 [J]. *海洋学报*, 1988, 10(4): 481–489.
Fei Zunle, Mao Xinghua, Zhu Mingyun, et al. Productivity studies in the Bohai Sea- II Estimation of primary productivity and potential catch[J]. *Haiyang Xuebao*, 1988, 10(4): 481–489.
- [43] 王俊, 李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究 [J]. *海洋水产研究*, 2002, 23(1): 23–28.
Wang Jun, Li Hongzhi. Study on chlorophyll and primary production in inshore waters of the Bohai Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 2002, 23(1): 23–28.
- [44] 吕培顶, 费尊乐, 毛兴华, 等. 渤海水域叶绿素 *a* 的分布及初级生产力的估算 [J]. *海洋学报*, 1984, 6(1): 90–98.
Lv Peiding, Fei Zunle, Mao Xinghua, et al. Distribution of chlorophyll *a* and estimation of primary productivity in Bohai Sea waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 1984, 6(1): 90–98.
- [45] Zhang Jing, Zhang Guosen, Liu Sumei. Dissolved silicate in coastal marine rainwaters: comparison between the Yellow Sea and the East China Sea on the impact and potential link with primary production[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D16): D16304.

Characteristics of spatial and temporal distribution of sediment oxygen consumption rate and environmental influence factors in the Yellow Sea and Bohai Sea

Zhu Ruosi^{1,2,3}, Song Guodong^{1,2}, Liu Sumei^{1,2}

(1. *Frontiers Science Center of Deep Ocean Multispheres and Earth System, and Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China*; 3. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: Sediment oxygen consumption (SOC) is an important parameter of marine sediments and an important characterization parameter of the rate of organic carbon mineralization in seafloor sediments, and the study of SOC can help us to understand the carbon cycling process in the whole ocean. As one of the most important and active sites for organic carbon mineralization and burial, marginal seas have received widespread attention and research around the world, but there is still a lack of relevant attention to the Chinese marginal sea region with typical seasonal variations of the marine environment, especially the Yellow Sea and Bohai Sea. In this paper, the intact core incubation was used to study the SOC in the Yellow Sea and Bohai Sea in April, July and October 2022, and the results showed that the rates of SOC ranged from 7.11 mmol/(m²·d) to 17.33 mmol/(m²·d). There was no significant

difference between the SOC of the Yellow Sea and the Bohai Sea in spring (ANOVA, $p > 0.05$), and the SOC of the Yellow Sea was lower than Bohai Sea in summer (ANOVA, $p < 0.01$) and autumn (ANOVA, $p < 0.01$); the SOC of the Yellow Sea was the largest in spring and the smallest in summer, and there was no significant difference between the SOC of the Bohai Sea in summer and autumn, which were significantly higher than that of spring (ANOVA, $p < 0.05$). Temperature and sediment Chl *a* concentration were the influencing factors. Meanwhile, the SOC was used to assess the rate of benthic organic carbon mineralization. When compared with the primary productivity, the results indicated that the contribution of benthic organic carbon mineralization to primary productivity in the Bohai Sea ranged from 42.8% to 74.5%, which was one of the key links in the carbon cycle of the Bohai Sea, while the benthic organic carbon mineralization in Yellow Sea plays a less significant role in the carbon cycle of the Yellow Sea carbon cycle than Bohai Sea. This paper systematically studied the SOC in the Yellow Sea and Bohai Sea and its spatial and temporal distribution characteristics, exploring the contribution of organic carbon mineralization to primary productivity in the Yellow Sea and Bohai Sea, which provided theoretical support for the understanding of organic carbon mineralization and burial in the Yellow Sea and Bohai Sea.

Key words: sediment oxygen consumption; organic carbon mineralization; temperature; sediment Chl *a*; Yellow Sea and Bohai Sea