

◆海洋科学◆

钦州湾近岸网箱养殖期磷的分布特征研究*

黄丽艳^{1,2}, 黄 鹄^{2,3**}, 廖日权^{2,3}

(1. 北部湾大学北部湾海洋发展研究中心, 广西钦州 535011; 2. 北部湾大学海洋学院, 广西钦州 535011; 3. 北部湾大学, 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室, 广西钦州 535011)

摘要: 为了解钦州湾近岸养殖卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)网箱在不同的养殖期内水体和沉积物中磷(Phosphorus)的分布特征, 于2022年5月(养殖投苗期)、7月(养殖高峰期)和10月(养殖收成期)调查该区域并分析水体和表层沉积物中磷的分布规律。结果表明: 水体中磷含量在养殖期间呈逐渐升高、表层高于底层的变化趋势, 溶解无机磷(Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP)是总溶解态磷(Total Dissolved Phosphorus, TDP)的主要赋存形态; 在养殖高峰期网箱区出现磷限制情况。表层沉积物中磷含量在养殖高峰期出现较大值, 呈养殖高峰期高于养殖收成期和养殖投苗期、网箱区高于非养殖区的分布特征, 无机磷(Inorganic Phosphorus, IP)是总磷(Total Phosphorus, TP)的主要赋存形态。网箱养殖期的磷富集指数(P Enrichment Index, PEI)为0.31-1.42, 网箱区高于非养殖区, 表明钦州湾近岸网箱养殖活动会给沉积环境带来磷污染。高度集约化的养殖活动对水环境和沉积环境质量均有负面影响, 针对钦州湾近岸网箱养殖期磷污染情况, 需采取科学的调控对策, 打造钦州湾生态健康养殖模式, 在提升经济价值的同时降低对海洋环境的污染。

关键词: 钦州湾; 网箱养殖; 磷; 分布

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)05-0910-12

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20231121.010

磷(Phosphorus)是海洋生态系统的主要生源要素, 也是水体、底泥等环境的潜在污染因子^[1,2]。近年来随着沿海地区经济的飞速发展, 近岸海洋生态结构和功能受到一定的损害, 并直接威胁着近岸海水养殖业的可持续发展^[3]。在养殖过程中部分饲料因不

能及时被摄食而散失, 富含有机物的残饵和养殖生物排放的粪便沉积在网箱养殖区域及其毗连水域^[4]。据报道, 近岸养殖过程中通常有超过30%的饵料未被充分摄食利用, 其中大量的磷等有机质积聚于沉积物中, 然后通过沉积物-水界面释放、运输到水体中,

收稿日期: 2022-12-05

修回日期: 2023-01-09

* 广西研究生教育创新项目(YCSW2022472), 广西高校人文社会科学重点研究基地北部湾海洋发展研究中心创新课题(BHZXSKY2211)和广西重点研发计划(桂科 AB21076016)资助。

【第一作者简介】

黄丽艳(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事养殖污染与控制研究, E-mail: h15277481911@163.com。

【**通信作者简介】

黄 鹄(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海岸环境演变与调控、海洋资源开发与保护等研究, E-mail: mrhuanghu@126.com。

【引用本文】

黄丽艳, 黄鹄, 廖日权, 等. 钦州湾近岸网箱养殖期磷的分布特征研究[J]. 广西科学, 2023, 30(5): 910-921.

HUANG L Y, HUANG H, LIAO R Q, et al. Study on Distribution Characteristics of Phosphorus in Cage Culture Stage Near Qinzhou Bay, South China [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(5): 910-921.

从而间接引发赤潮、富营养化等海洋环境灾害^[5,6]。因此,研究近岸海湾网箱养殖区域磷营养盐的变化特征对掌握海域环境污染程度具有现实意义。

钦州湾位于北部湾北端,是一个典型的河口型半封闭亚热带海湾,鱼类资源丰富,水产养殖业发达,是我国重要的天然渔场和鱼类人工养殖基地^[7]。广西近岸浅海网箱养殖虽然起步较晚但发展迅速^[8],2020年钦州市深水抗风浪网箱发展到了376箱,养殖产量达到13 000 t,产值约2.7亿元。随着钦州湾沿海工业的发展及鱼类养殖规模的不断扩大,钦州湾海域面临着前所未有的压力并成为北部湾海域赤潮相对高发区之一^[9]。研究表明,陆源输入和养殖活动是钦州湾近岸海域主要的污染源^[10],其中活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)是富营养化逐渐加重的重要影响因素^[11,12]。鉴于钦州湾近岸网箱养殖规模扩大和养殖方式不当可能会增加水体富营养化和沉积环境污染等生态风险发生概率,且为了解钦州湾近岸网箱养殖期磷的分布规律与污染特征,本研究于2022年5月(养殖投苗期)、7月(养殖高峰期)和10月(养殖收成期)对其水体和表层沉积物等展开调查,分析该区域的水体和表层沉积物磷的含量、污染现状及趋势。本研究通过分析磷污染物的分布特征掌握钦州湾网箱养殖活动对养殖环境质量的影响程度,为保护水产养殖业的稳定可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 站位设置

钦州湾气候为亚热带季风型气候,当地的气温和降水具有明显的干、湿季节变化,5-9月集中了全年70%以上的降水量,月平均气温高且月变化小,当年10月至翌年4月降水量小且气温低。钦州湾的港口航运和渔业作业等活动对海洋生态环境质量影响较大,本研究选择近岸高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)圆形双浮式抗风浪网箱养殖卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)的海域为调查区域,卵形鲳鲹地方名为金鲳,鲈形目(Perciformes)鲹科(Garangidae)鲳鲹属(*Trachinotus*),属暖温带中上层鱼类,据统计,2021年广西卵形鲳鲹养殖产量为11.1万吨,占全国的45.3%^[13],是广西网箱养殖的重要品种之一。本次调查的网箱养殖区域有网箱12口,5月初开始投苗,养殖所用饵料为金鲳鱼专用膨化配合饲料,每天投喂2-3次,根据潮汐确定投喂时间,11月达到商品鱼大小,可以开始捕获收成。将采

样点分为网箱区和非养殖区,分别在2022年5月、7月和10月3个时段内的某一天进行采样调查。网箱区为养殖卵形鲳鲹的集中区域,网箱投放鱼苗约30万尾/箱,共设置4个采样点(J1-J4),水深为8.8-10.6 m;非养殖区为距网箱养殖区约1 km的非养殖区域,设1个采样点(F),调查站位如图1所示。

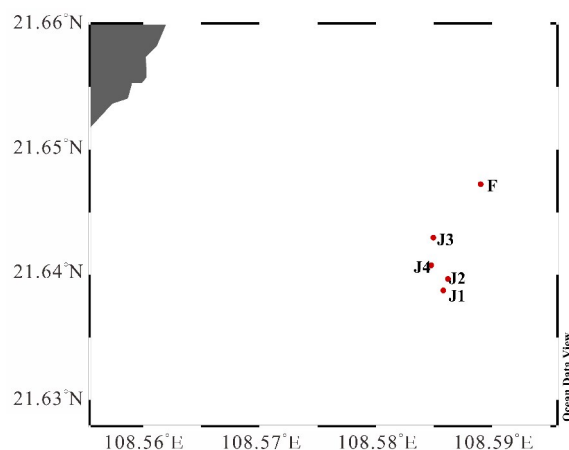


图1 钦州湾近岸网箱养殖调查站位

Fig. 1 Survey stations of cage culture in nearshore in Qinzhou Bay

1.2 样品采集与分析

采用测深仪(型号: SPEEDTECH SM-5A)测定采样站点的水深;使用有机玻璃采水器现场采集表层(0.5 m)和底层(距底部约0.5 m)海水水样,置于保温箱中冷藏保存,待转移至实验室后立即用孔径为0.45 μm 微孔滤膜过滤,用稀盐酸和 Milli-Q 超纯水洗净的聚乙烯瓶储存滤液,并在-20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保存待测。用抓斗式采泥器采集表层沉积物,排除空气后密封在聚乙烯密封塑料袋中,并在保温箱中暂存,带回实验室在-20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存,用于相关参数的测定。

采用 YSI6920 多功能水质分析仪现场测定海水温度(Temperature, T)、盐度(Salinity, S)、pH 值和溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)等参数。参照《海洋调查规范:第4部分 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4-2007)^[14]的方法分析水体中营养盐含量: NO_3^- -N 用锌镉还原法, NO_2^- -N 用重氮-偶氮比色法, NH_4^+ -N 用次溴酸钠氧化法。溶解无机氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)为 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 三者之和。活性磷酸盐用磷钼蓝分光光度法测定,总溶解态磷(Total Dissolved Phosphorus, TDP)通过过硫酸钾消解后用磷钼蓝分光光度法测定,溶解无机磷(Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP)为活性磷酸盐含量,溶解有机磷(Dissolved Or-

ganic Phosphorus, DOP)用差值法计算,即 $DOP = TDP - DIP$ 。表层沉积物的含水率用重量法测定,使用激光粒度分析仪(型号: Mastersizer 3000; 马尔文仪器有限公司, 英国 Marlvern)测定粒度,根据粒径大小^[15]可将沉积物分为黏土(Clay, $< 4 \mu m$)、粉砂(Silt, $4 - 64 \mu m$)和砂(Sand, $> 64 \mu m$)。采用 Aspila 法^[16]测定沉积物中总磷(Total Phosphorus, TP)和无机磷(Inorganic Phosphorus, IP)含量;将冻干的表层沉积物研磨过 100 目筛,使样品完全均质,精确提取 0.15 g 沉积物样品进行磷分析。研磨后的沉积物样品先用 1 mol/L 盐酸在 25 °C 下提取 24 h 后再用磷钼酸蓝分光光度法测定 IP 的浓度,以 mg/g (干重)为单位;TP 样品需先在 550 °C 下灼烧 2 h,然后按 IP 方法提取,差值法求有机磷(Organic Phosphorus, OP)含量。采用空白对照品和标准对照品对分析数据进行质量控制,结果表明中国近海海洋沉积物成分分析标准物质(GBW07314)中的 TP 浓度为 $(589.61 \pm 9.61) \text{ mg/g}$, 与该标准的认证值^[17] $(646.35 \pm 61.07) \text{ mg/g}$ 相当。

1.3 表层沉积物总磷污染评价

目前,中国尚未有海洋沉积物营养盐的环境评价标准,本研究采用加拿大环境和能源部制定的沉积物质量保护和管理指南^[18]对研究区表层沉积物磷的生态危害性进行评价。采用单因子标准指数评价钦州湾近岸网箱养殖区表层沉积物总磷富集水平,磷富集指数(P Enrichment Index, PEI)的计算公式:

$$PEI = c_i / c_s,$$

表 1 钦州湾网箱养殖期水质因子的分布(平均值 ± 标准差)

Table 1 Distribution of water quality factors in cage culture in Qinzhou Bay (Mean ± SD)

月份 Month	区域 Region	T/°C	DO/(mg/L)	pH value	S
May	J-S	26.30 - 26.60	5.60 - 6.69	7.87 - 7.96	26.46 - 27.30
		26.40 ± 0.14 ^b	6.01 ± 0.47 ^{bc}	7.93 ± 0.04 ^a	26.85 ± 0.38 ^b
	J-B	26.50 - 26.60	5.03 - 5.81	7.90 - 7.97	27.37 - 28.43
	F-S	26.53 ± 0.05 ^b	5.45 ± 0.33 ^c	7.95 ± 0.03 ^a	28.00 ± 0.52 ^a
July	J-S	26.70	5.88	8.00	27.51
		30.29 - 30.36	5.30 - 5.60	7.49 - 7.69	20.66 - 21.20
	30.32 ± 0.03 ^a	5.48 ± 0.13 ^c	7.58 ± 0.10 ^b	20.92 ± 0.24 ^d	
	J-B	30.27 - 30.34	5.60 - 5.80	7.55 - 7.69	24.13 - 25.14
	F-S	30.31 ± 0.03 ^a	5.68 ± 0.10 ^{bc}	7.61 ± 0.06 ^b	24.47 ± 0.47 ^c
October	J-S	30.54	5.70	8.19	20.59
		25.10 - 25.43	6.20 - 6.30	7.68 - 8.19	24.30 - 25.31
	25.30 ± 0.21 ^c	6.23 ± 0.05 ^{ab}	7.94 ± 0.23 ^a	24.84 ± 0.42 ^c	
	J-B	25.10 - 25.53	6.40 - 6.70	7.27 - 7.62	24.31 - 25.18
	F-S	25.35 ± 0.21 ^c	6.63 ± 0.15 ^a	7.45 ± 0.18 ^b	24.74 ± 0.36 ^c
	F-S	25.78	6.20	8.09	25.17

Note: the data in the same column with the same upper corner mark indicate no significant difference ($P > 0.05$). J-S and J-B represent the surface and bottom stations in the cage area respectively, and F-S represents the surface stations in the non-culture area.

其中, c_i 和 c_s 分别代表样品 i 的 TP 浓度(mg/g)和标准 TP 浓度(600 mg/g),当 $PEI > 1$ 时,表示表层沉积物虽然已受污染,但是沉积物中的多数底栖生物仍可承受。

1.4 数据统计分析

使用 Ocean Data View (ODV) 软件绘制采样站位图;应用 SPSS 26.0 软件进行 Pearson 相关性分析, $P < 0.05$ 为显著差异;利用 Origin 2021 软件进行绘图,描述性统计值采用算术平均值 ± 标准差 (Mean ± SD) 表示。

2 结果与分析

2.1 钦州湾近岸网箱养殖期水质因子的分布

钦州湾近岸网箱养殖期间水质因子的分布如表 1 所示, T 为 25.10 - 30.54 °C, 平均值为 $(27.40 \pm 2.17) \text{ °C}$, 在养殖高峰期显著高于养殖投苗期和收成期 ($P < 0.05$), 表、底层变化不明显, 非养殖区略高于网箱区; DO 为 5.03 - 6.70 mg/L, 平均值为 $(5.91 \pm 0.46) \text{ mg/L}$, 时间上变化显著, 在养殖收成期出现高值, 表层含量略低于底层, 养殖期间的 DO 含量均符合水产养殖区执行的第二类海水水质标准 ($> 5 \text{ mg/L}$); pH 值为 7.27 - 8.19, 平均值为 7.78 ± 0.25 , 时间上变化显著, 在养殖投苗期出现高值, 表、底层无显著变化 ($P > 0.05$); S 为 20.59 - 28.43, 平均值为 24.91 ± 2.37 , 分布特征与 pH 相似, 在养殖高峰期的表、底层海水中有显著差异 ($P < 0.05$), 出现分层现象。

2.2 钦州湾近岸网箱养殖期水体磷的分布

钦州湾近岸网箱养殖期水体磷的分布见图2。TDP 含量为 14.61 - 42.79 mg/L, 平均值为 (33.28 ± 10.65) mg/L; DIP 含量为 7.28 - 43.01 mg/L, 平均值为 (19.90 ± 9.50) mg/L; DOP 含量为 4.42 - 29.06 mg/L, 平均值为 (13.38 ± 6.70) mg/L。水体中 DIP 含量较高, 说明 DIP 是水体 TDP 的主要赋存形态。在养殖投苗期 TDP 和 DIP 最高值出现在 J4 站点, 最低值出现在 J2 和 J1 站点的底层海水中; DOP 最高值出现在 J1 站点的底层海水中。在养殖高峰期 TDP 含量分层明显, 表层海水含量基本都高于底层, 其中 J4 站点的 TDP 和 DOP 含量较

高。在养殖收成期各站点磷含量变化较小, 其中 TDP 和 DIP 最高值出现在 J4 站点, DOP 最高值出现在 J2 站点的表层海水中。养殖投苗期和养殖高峰期 DIP 含量符合第二类海水水质标准 (≤ 0.030 mg/L), 但在养殖收成期 DIP 含量仅符合第三类海水水质标准 (0.030 - 0.045 mg/L)。从时间上看, 钦州湾近岸网箱养殖期水体 TDP 含量呈逐渐上升趋势, 随着养殖浓度逐渐升高; 从区域上看, 网箱区与非养殖区磷的分布较为一致, 表层海水的 TDP 和 DIP 含量均大于底层, DOP 含量在表、底层海水中变化不明显。

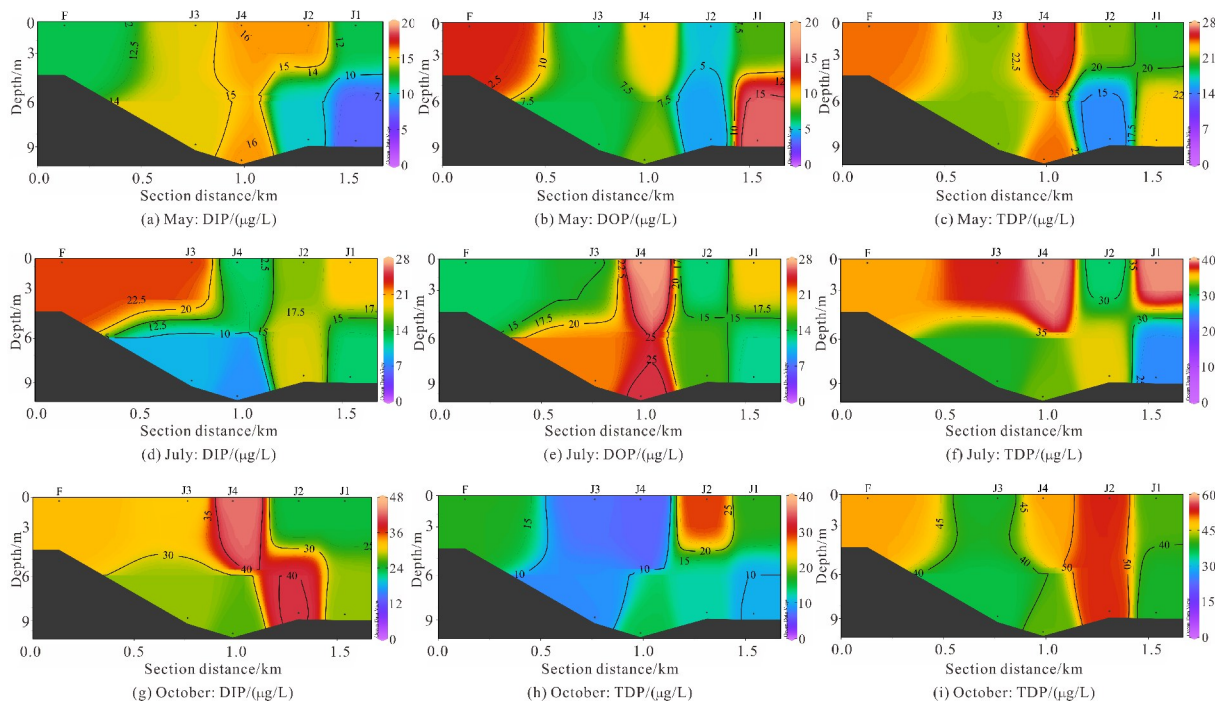


图2 网箱养殖期近岸水体磷的分布

Fig.2 Distribution of P in nearshore water during cage culture period

氮磷比(N/P)是水环境的重要指标, 按照 Redfield 定义的浮游植物生长利用 DIN 与 DIP 的比值关系(16 : 1), N/P 低于 16 表明藻类的生长受氮限制, N/P 高于 16 表明是受磷限制^[19]。钦州湾网箱养殖期水体中 N/P 分布如图3所示, 可以发现 N/P 变化趋势有一定的差异性, 在养殖投苗期和收成期水体的 N/P 低于 Redfield 比值, 表明该区域的氮磷污染较轻, 发生富营养化的概率较低; 在养殖高峰期有超过一半站点的 N/P 大于 Redfield 比值, 为磷限制状态。

2.3 钦州湾近岸网箱养殖期表层沉积物磷的分布

表层沉积物中粒度的粗细能影响磷等有机质含

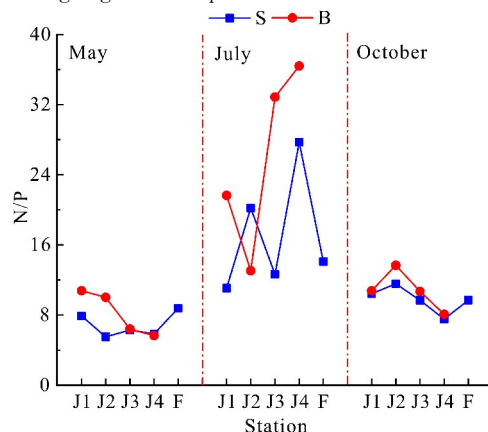


图3 网箱养殖期近岸水体中 N/P 分布(S:表层;B:底层)
Fig.3 Distribution of N/P in nearshore water during the cage culture period (S:surface;B:bottom)

量的富集能力,有机质含量随着沉积类型的不同呈现出明显的区域性差异^[20]。钦州湾网箱养殖期表层沉积物的盐度(S)、含水率及粒度组成分布如图4(a)所示。沉积物盐度为1.57–6.51,平均值为 4.54 ± 1.97 ,呈网箱区>非养殖区、养殖高峰期>养殖投苗期>养殖收成期的分布特征,沉积物中的盐度显著低于海水盐度($P < 0.05$)。沉积物含水率为22.2%–57.3%,平均值为 $(43.9 \pm 13.4)\%$,分布特征与盐度一致。沉积物粒度的组成中黏土所占百分比含量平均值为 $(48.1 \pm 24.9)\%$,粉砂平均值为 $(37.2 \pm 16.1)\%$,砂平均值为 $(14.7 \pm 30.0)\%$,其中网箱区的

黏土平均值为 $(58.2 \pm 15.2)\%$,粉砂平均值为 $(41.4 \pm 14.6)\%$;非养殖区的砂平均值为 $(71.9 \pm 13.1)\%$,粉砂平均值为 $(20.4 \pm 9.8)\%$ 。根据Shepard归类法^[21]得到的粒度组成三元相图如图4(b)所示,网箱养殖投苗期所有站点均表现为黏土质粉砂,高峰期和收成期大部分站点表现为粉砂质黏土,F站点表现为粉砂质砂,说明粒度结构组成在养殖期间发生变化,网箱区砂质含量所占比例低,非养殖区砂质含量高,可能与箱体的阻挡及养殖生物产生的有机体及残饵等细颗粒组分的堆积有关。

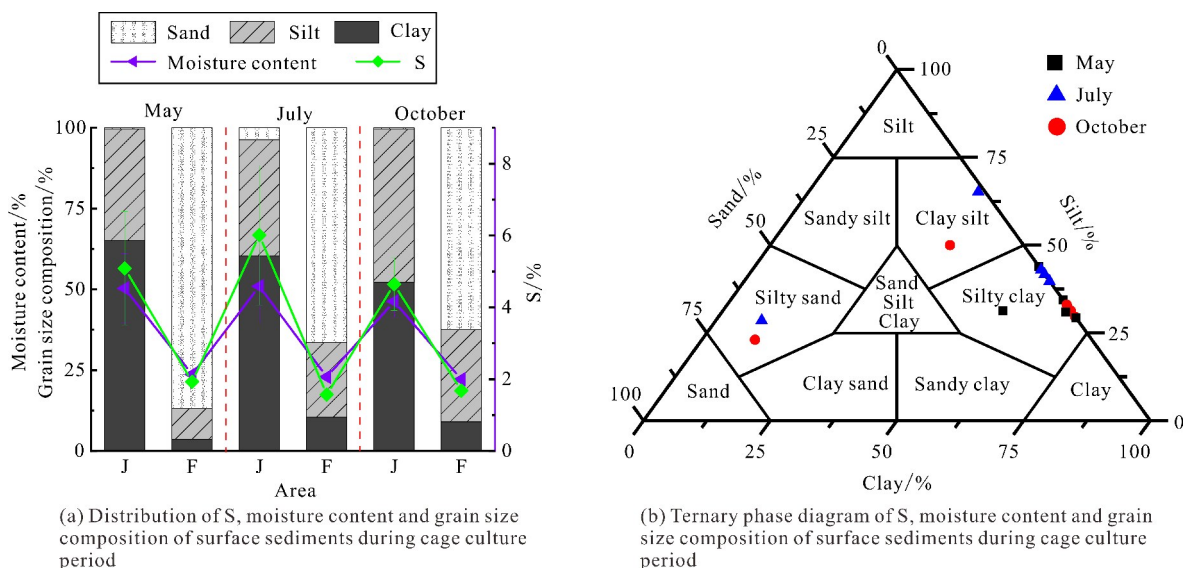


图4 网箱养殖期表层沉积物盐度、含水率和粒度组成分布及三元相图

Fig. 4 Distribution and ternary phase diagram of S, moisture content and grain size composition of surface sediments during cage culture period

钦州湾近岸网箱养殖期表层沉积物磷的分布见图5。TP含量为183.87–850.62 mg/g,平均值为 (512.25 ± 181.21) mg/g;IP含量为92.99–560.29 mg/g,平均值为 (326.25 ± 136.42) mg/g;OP含量为66.45–290.45 mg/g,平均值为 (186.00 ± 51.63) mg/g。IP含量在时间上表现为养殖高峰期略高于养殖收成期和投苗期,无显著变化($P > 0.05$),均在F站点出现最小值,J3站点出现最大值,各站点含量的分布基本一致。OP含量在时间上分布特征与IP一致,各站点含量的分布无明显规律。TP含量的分布特征与IP一致,均在F站点出现最小值,J3站点出现最大值。整体上看网箱区的IP占比较高,说明

IP是网箱区表层沉积物磷的主要赋存形态。

钦州湾近岸网箱养殖表层沉积物PEI值如图6所示。PEI值为0.31–1.42,平均值为 0.85 ± 0.30 ,网箱区与非养殖区PEI平均值分别为 0.97 ± 0.20 和 0.39 ± 0.14 ,在时间上呈养殖高峰期(0.99 ± 0.33)>养殖收成期(0.81 ± 0.30)>养殖投苗期(0.76 ± 0.29)的分布特征。养殖高峰期的网箱区有一半站点 $PEI > 1$,J3站点在养殖期间PEI指数均大于1,说明沉积环境已经出现轻度磷污染,但底栖生物仍可承受,表明高密度的网箱养殖活动使得总磷在表层沉积物中过度积累并形成污染,从而对海洋生态环境造成危害。

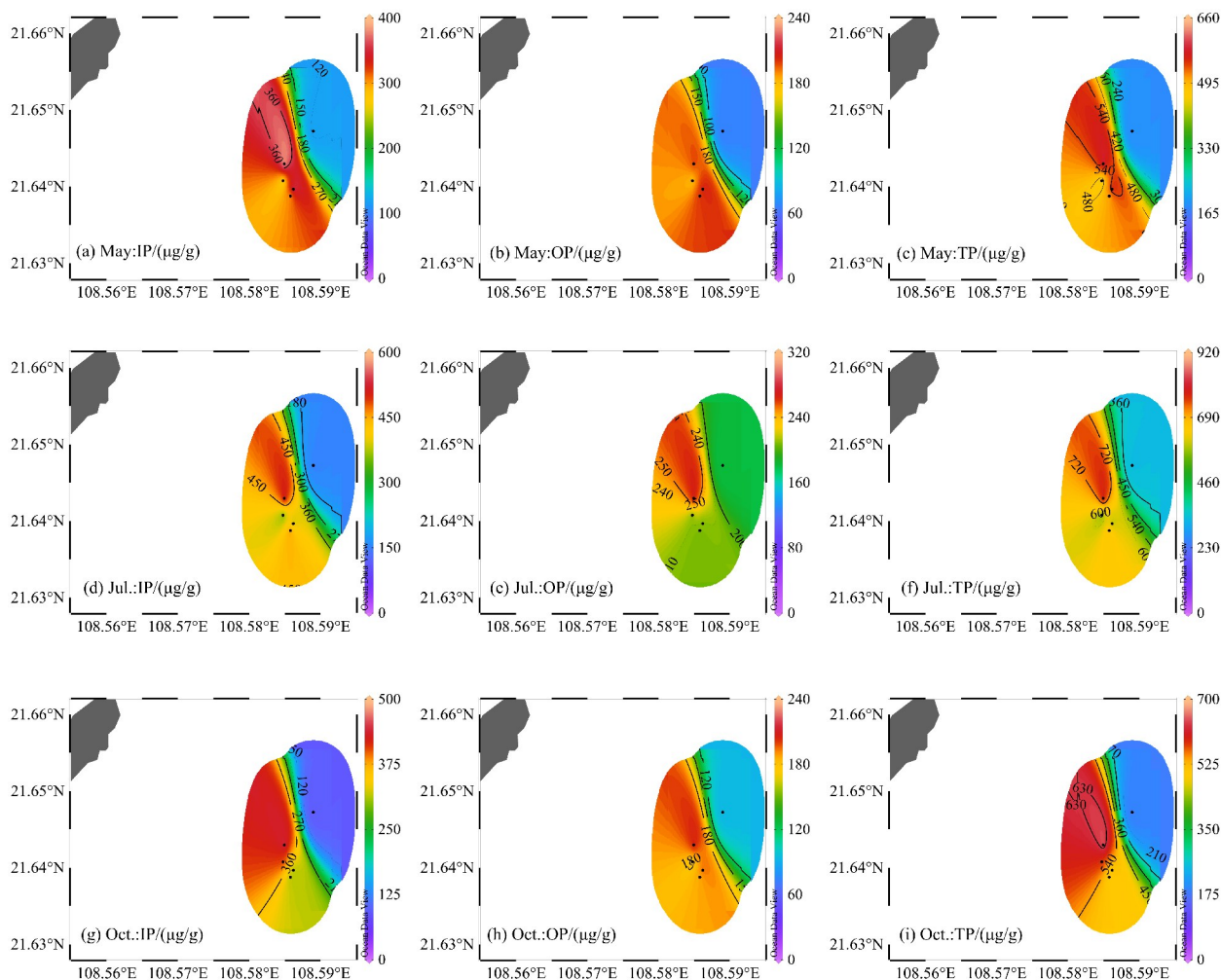


图5 网箱养殖期表层沉积物磷的分布

Fig. 5 Distribution of phosphorus in surface sediments during cage culture period

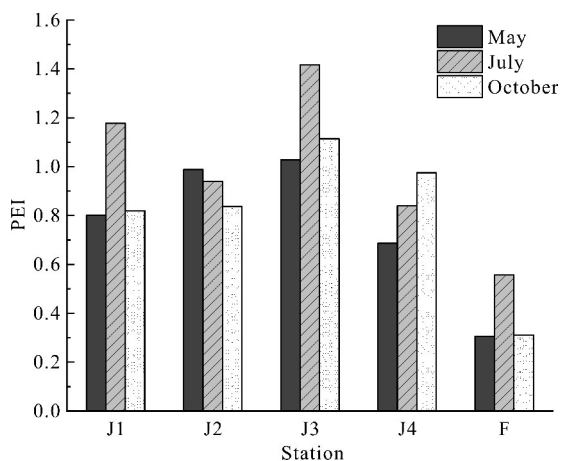


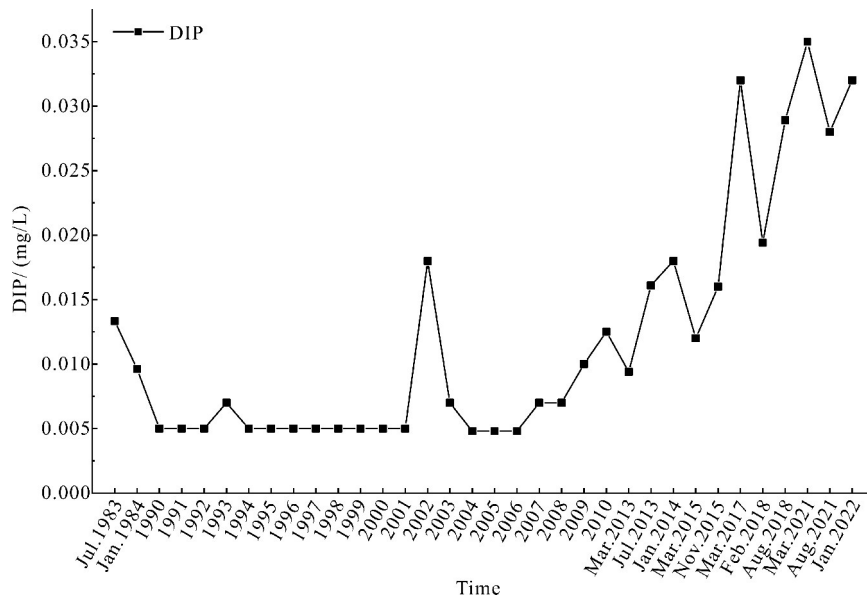
图6 网箱养殖期表层沉积物 PEI 的分布

Fig. 6 PEI distribution of surface sediments during cage culture period

3 讨论

3.1 影响钦州湾近岸网箱养殖期水体磷分布的因素

海水中磷的主要来源包括大陆径流带来的岩石风化物质、有机质腐解产物、排入河流的废弃物、大气沉降及人类活动,磷在海洋中进行着大范围的迁移和循环^[22]。钦州湾近岸网箱养殖区水体 TDP 和 DIP 的浓度呈随时间逐渐上升、表层海水高于底层海水的特征,这与劳齐斌等^[12]、温玉娟等^[23]对钦州湾营养盐分布特征分析结果一致。与近 40 年钦州湾水体 DIP 浓度历史(图 7)相比,可以看出钦州湾水体 DIP 浓度呈增长趋势,近五年以来已超过第一类海水水质标准($<0.015 \text{ mg/L}$),介于二、三类水质标准之间。通常近海高浓度的 DIN 与 DIP 主要同人类活动有关的陆源排放有关,其中 DIP 主要来源于水产养殖活动^[30]。有研究表明钦州湾外湾 DIN 和 DIP 的季节

图7 近40年钦州湾水体DIP浓度的变化^[12,23,24-29]Fig. 7 Changes of DIP concentration in Qinzhou Bay in recent 40 years^[12,23,24-29]

变化主要受内湾输入影响,河-海混合是影响其空间分布的主要因素,外海沉积物再悬浮过程是影响DIP季节上空间变化的重要因素^[31]。本研究的采样站点位于钦州湾外海区域,水深在10 m左右,较靠近防城港工业区,网箱密集,养殖生物量大,且钦州湾外湾水质受沿岸排污及毗邻外海水体交换的共同影响^[11]。钦州湾近岸网箱养殖期水体磷与水环境因子的Pearson相关性分析(图8)结果显示,在养殖期间DIP均与盐度呈显著负相关,表明陆源输入对钦州湾的磷含量产生重大影响。内湾输入和养殖活动的影响使得水体污染物浓度升高,海水的层化现象可能会导致表层和底层海水的交换减缓,从而导致较高浓度的TDP和DIP滞留在较浅的深度中,使得其在表层海水浓度较高。研究发现DIP可通过海洋浮游植物或细菌吸收同化后转为DOP^[32],钦州湾近岸网箱养殖海域DOP的浓度分布特征为7月显著高于5月和10月($P \leq 0.05$),7月DOP与DIP含量呈显著的负相关($r = -0.67, P \leq 0.05$,图8),进一步说明两者之间存在一定的转化关系。钦州湾海域的叶绿素a(Chl-a)浓度季节变化特征为夏季>春季>冬季>秋季^[33],与DOP含量分布特征一致,这可能导致7月海水处于磷限制状态,虽然7月和10月养殖生物产生的有机质相对较多,但潮流的运动使得有机质不断扩散并在沉积环境和水环境中发生迁移转化而被生物利用。网箱区与非养殖区的水体磷浓度分布特征一致,且浓度差别不大,这可能与网箱区与非养殖区水体磷的来源一致有关;但随着养殖活动的深入,网

箱区的磷浓度高于非养殖区,表明大规模的饵料输入会导致水体营养盐浓度升高。水体发生富营养时TDP的临界浓度为20 mg/L^[1],各站位的TDP含量均已超过临界浓度范围,这说明本研究区域已经达到富营养水平,其水质受到一定程度的污染,存在一定的生态风险。虽然网箱养殖布置在较深的区域,但钦州湾海底地形较平坦,坡度小,水流较弱,随着养殖活动的高度集约化,水体中磷等营养盐含量会随之升高。

3.2 钦州湾近岸网箱养殖期表层沉积物磷的分布特征

表层沉积物的磷含量与含水率、粒度等属性有一定的关系^[34],钦州湾近岸网箱养殖期表层沉积物中磷的分布与Dan等^[35]的研究结果一致,低于哑铃湾网箱养殖区的调查结果^[36],说明钦州湾近岸网箱养殖区表层沉积物中的磷污染较轻。将沉积物中磷的组成与含水率、粒度进行Pearson相关性分析(图9),发现在养殖投苗期TP与含水率呈极显著的正相关性,与黏土呈显著正相关,与砂呈显著负相关;OP与黏土呈极显著正相关,与砂呈极显著负相关。养殖高峰期的TP、IP与含水率呈显著正相关。养殖收成期OP与含水率和黏土呈显著正相关,与砂呈显著负相关。上述结果说明磷主要集中在高黏土、低砂质、高含水率的沉积物中,可能是因为粒径小的颗粒比表面积大,更容易吸附磷和附着生物碎屑等有机物质。养殖投苗期和高峰期的表层沉积物中OP、IP与TP存在显著的正相关关系,且IP与TP存在极显著的

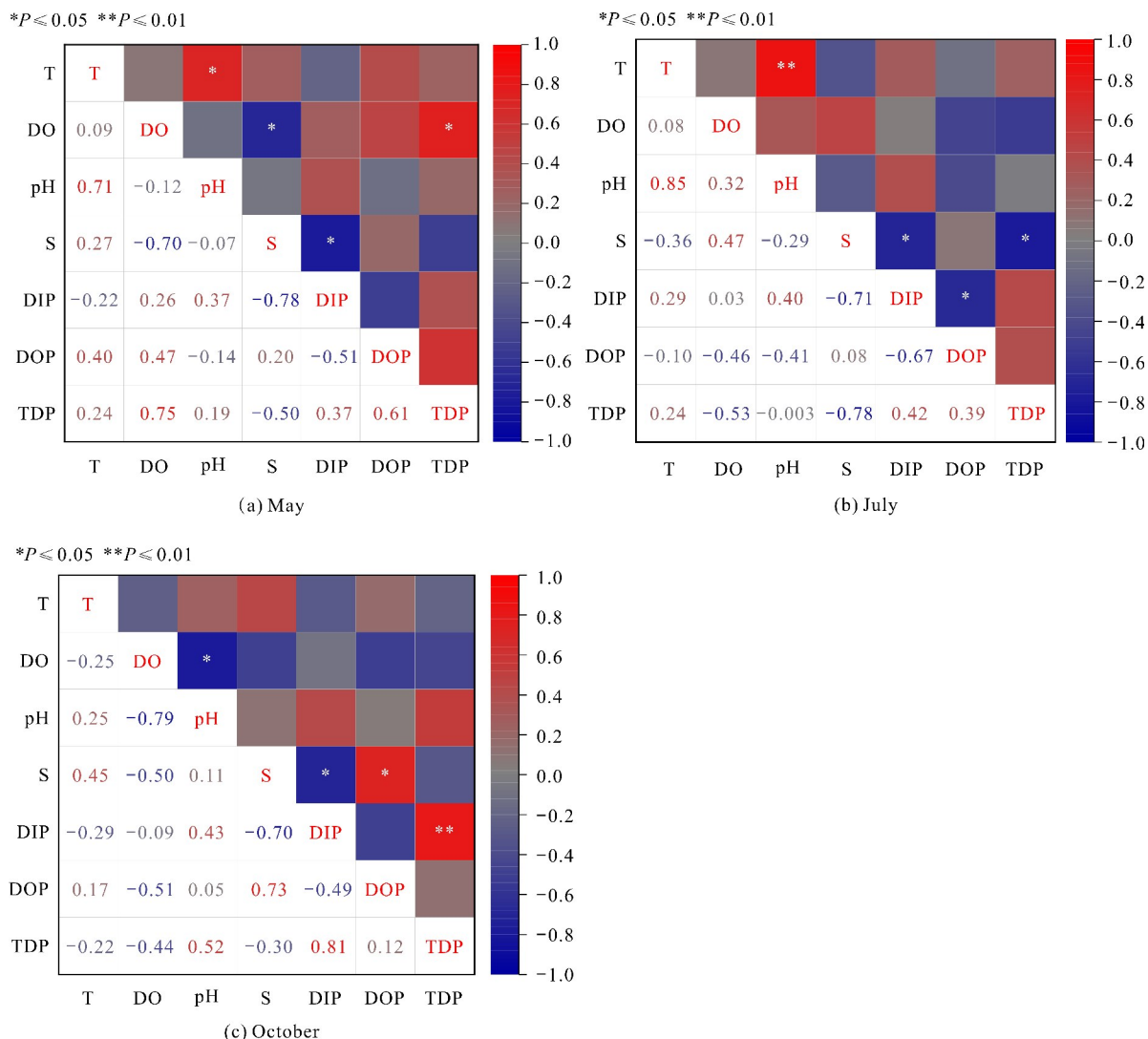


图8 网箱养殖期近岸水体中的磷与环境因子相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of phosphorus and water environmental factors in nearshore water during the cage culture period

正相关关系,表明沉积物中磷在来源上具有较好的一致性。

沉积物与水体进行磷交换的过程包括磷酸盐的沉淀和溶解、磷颗粒的沉降与再悬浮、溶解态磷的吸附、解吸以及磷的生物循环等^[37]。水体溶解氧含量是影响底泥-水界面营养物质迁移转化的重要因素^[38,39]。钦州湾网箱养殖的投饵集中在5-11月,7月鱼类代谢活动较强,处于养殖高峰期,大量残饵和排泄废物等有机质产生沉降作用,并且有机质降解消耗溶解氧;10月水温下降,鱼类生长放缓,投饵料逐渐减少,有机污染物沉积量减少,海水中溶解氧含量变大,风浪对沉积物的迁移也有一定的影响,强风浪容易扰动表层沉积物。海洋表层沉积物的再悬浮作用会引起生源要素在海水和沉积物中的再分配,在河

流入海、浅海区等人类关系密切的地区再悬浮现象更为明显^[40]。网箱区表层沉积物TP含量是非养殖区的两倍以上,与黄显兵等^[41]研究结果相似。网箱区人类活动频繁,养殖生物量大,箱体会减弱水体的交换能力,因此污染物会在箱体周围大量堆积;非养殖区水深较浅,光照和溶氧充足,磷的迁移转化速率相对较高^[42]。

3.3 表层沉积物磷污染评价分析

钦州湾网箱养殖期表层沉积物的磷污染评价结果表明该区域已达到一定的污染级别,但还在安全级别的范围内,与Dan等^[35]在钦州湾的调查相差不大,与罗昭林等^[43]在流沙湾外湾养殖区的结果一致。非养殖区的PEI<1,说明该区TP污染程度不明显。

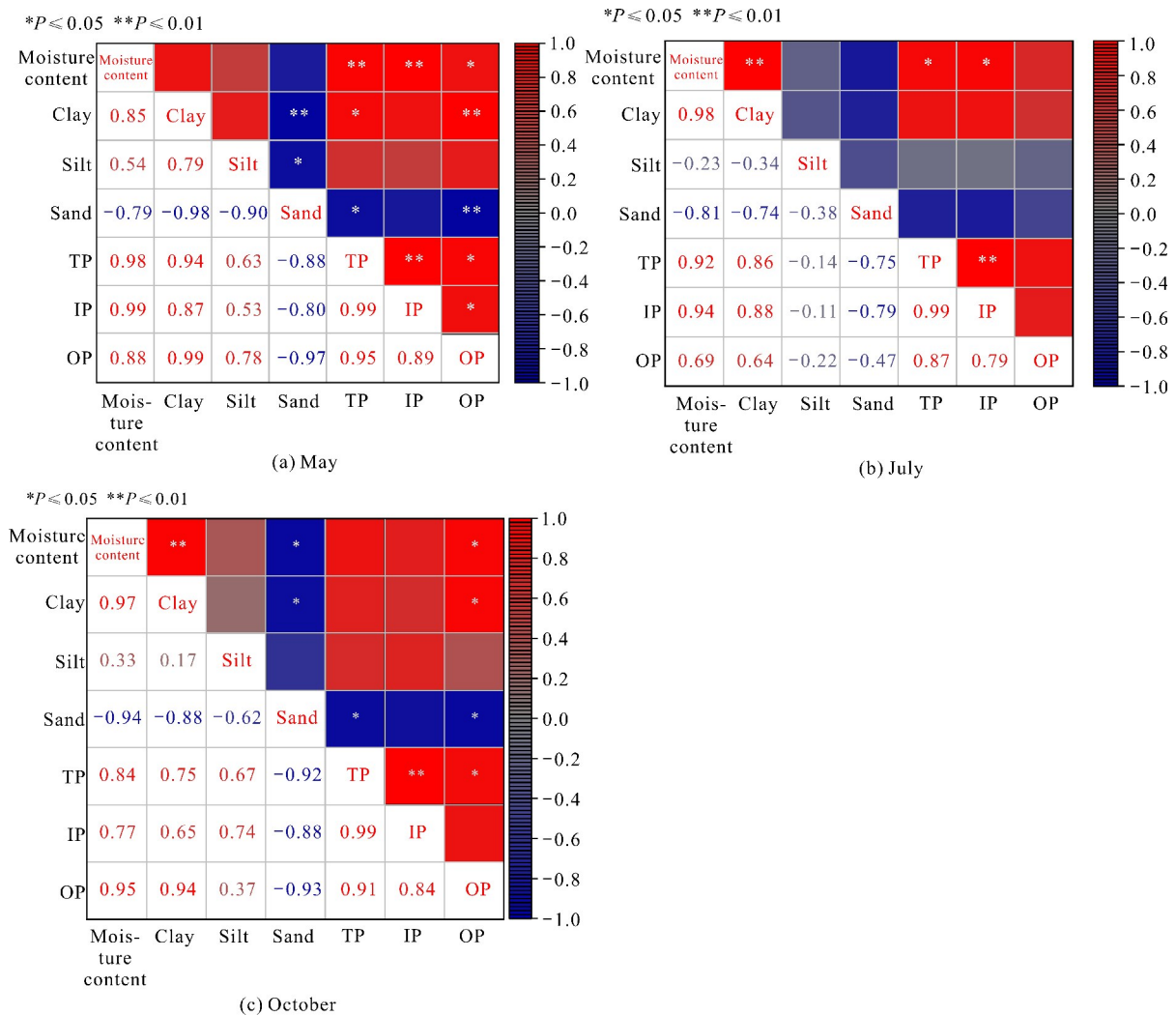


图9 网箱养殖期近岸表层沉积物中磷与含水率、粒度的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of phosphorus with water content and grain size in nearshore surface sediments during the cage culture period

本研究中的网箱养殖区主要分布在钦州湾外湾的西部,钦州湾余流是东进西出的气旋式环流,湾外较为清洁的水流可将东部养殖残余的磷等营养盐带入西侧,而且规模化网箱养殖在一定程度上会阻碍水流交换及养殖废物的自然净化,残饵沉积在网箱底部附近不易扩散,将直接导致养殖区底部沉积物中磷含量增加。养殖活动规模的扩大和沿岸工、农业的发展等经济活动都会在一定程度上增加沉积物 TP 的负荷,增大钦州湾海域的富营养化风险。为防止和减轻海水养殖自身污染,需采取一定的调控对策,比如对网箱养殖区域进行科学规划,合理确定养殖容量及密度,优化网箱养殖结构,调整养殖布局,改进投饵技术,提高饲料利用率等。

4 结论

钦州湾近岸网箱养殖期水体中的磷含量周期性和垂直变化明显,随着养殖的进行磷含量不断升高,在养殖投苗期各站点的 DIP 含量均满足二类海水水质标准,但在养殖收成期已超标,网箱区较非养殖区水质更差;内湾输入和养殖活动对水体磷含量影响显著,DIP 是 TDP 的主要赋存形态;大部分站点在养殖高峰期出现磷限制状态。钦州湾近岸网箱养殖水体的 TDP 浓度总体上已达到富营养化水平。表层沉积物的磷含量在养殖高峰期出现较大值,在养殖投苗期含量最低,网箱区的含量高于非养殖区,IP 是 TP 的主要赋存形态,各形态磷在来源上具有较好的一致性。表层沉积物中 PEI 值表明,尽管钦州湾网箱养殖活动尚未对沉积环境造成严重污染,但养殖活动规

模的扩大和沿岸工农业的发展会加重表层沉积物磷的负荷,从而增大水体富营养的风险。为避免磷营养盐含量过高引起的大规模养殖病害等危害的发生,需采取一定的调控对策探寻钦州湾网箱生态养殖新模式,从而有助于防止钦州湾水质进一步恶化,保护海洋环境生态健康,更好建设“蓝色海湾”。

参考文献

- [1] FÖLLMI K B. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40: 55-124.
- [2] LI R H, LIU S M, LI Y W, et al. Nutrient dynamics in tropical rivers, estuarine-lagoons, and coastal ecosystems along the eastern Hainan Island [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2013, 11(2): 481-506.
- [3] 谢宏英,王金辉,马祖友,等. 赤潮灾害的研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 482-488.
- [4] 李娟,葛长宇,毛玉泽,等. 沉积环境对鱼类网箱养殖的响应[J]. *海洋渔业*, 2010, 32(4): 461-465.
- [5] QI Z H, SHI R J, YU Z H, et al. Nutrient release from fish cage aquaculture and mitigation strategies in Daya Bay, southern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 399-407.
- [6] CHALLOUF R, HAMZA A, MAHFOUDHI M, et al. Environmental assessment of the impact of cage fish farming on water quality and phytoplankton status in Monastir Bay (eastern coast of Tunisia) [J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(6): 2275-2292.
- [7] 曾维斌,韩民伟,张瑞玲,等. 钦州湾海水养殖区水体有机磷酸酯的污染特征及生态风险[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 600-605.
- [8] 杨艳,黄玉玲,吕敏. 广西深水抗风浪网箱养殖现状分析及建议[J]. *农业研究与应用*, 2016, 164: 82-84.
- [9] 粟启仲,雷学铁,刘国强,等. 广西北部湾近岸海域近 20 年赤潮灾害特征分析[J]. *广西科学*, 2022, 29(3): 552-557.
- [10] 杨斌,方怀义,许丽莉,等. 钦州湾水质污染时空变化特征及驱动因素[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6): 877-883.
- [11] 洪鸣,李天深,赖春苗,等. 2008-2012 年钦州湾海域水环境要素的多元分析[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(6): 860-864.
- [12] 劳齐斌,刘国强,高劲松,等. 钦州湾养殖区营养盐分布特征及富营养化状况研究[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(3): 407-416.
- [13] 农业农村部渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 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, 2010.
- [15] 张伯虎,陈沈良,刘焱雄,等. 广西钦州湾海域表层沉积物分异特征与规律[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(4): 66-70.
- [16] ASPILA K I, AGEMIAN H, CHAU A S Y. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments [J]. *Analyst*, 1976, 101: 187-197.
- [17] YANG B, LIU S M, WU Y, et al. Phosphorus speciation and availability in sediments off the eastern coast of Hainan Island, South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2016: 118: 111-127.
- [18] PERSAUD D, JAAGUMAGI R, HAYTON A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario [M]. Ontario: Ontario Ministry of the Environment, 1993.
- [19] 王保栋,陈爱萍,刘峰. 海洋中 Redfield 比值的研究[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 232-235.
- [20] MAYER L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [21] SHEPARD F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(3): 151-158.
- [22] 潘建明,扈传昱,陈建芳,等. 南海海域海水中各形态磷的化学分布特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 40-47.
- [23] 温玉娟,徐轶肖,黎慧玲,等. 广西北部湾近岸海域营养盐与富营养化状态研究[J]. *广西科学*, 2022, 29(3): 541-551.
- [24] 韦蔓新,赖廷和,何本茂. 钦州湾丰、枯水期营养状况变化趋势及其影响因素[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(3): 16-21.
- [25] 蓝文陆. 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 5970-5976.
- [26] 骆鑫,蓝文陆,李天深,等. 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2603-2613.
- [27] 庞碧剑,李天深,蓝文陆,等. 钦州湾秋季和春季浮游动物分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6204-6216.
- [28] 赵则春,高金荣. 韦伯-费希纳定律在钦州湾近岸海域水质评价中的应用探讨[J]. *大众科技*, 2019, 21(9): 16-

- 18.
- [29] 史海艺, 赵辉, 孙东. 2021年春季北部湾北部近岸浮游植物叶绿素 a 分布特征及影响因子[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(5): 62-71.
- [30] 何玉新, 黄小平, 黄良民, 等. 大亚湾养殖海域营养盐的周年变化及其来源分析[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(4): 20-23.
- [31] 张栋. 钦州湾营养盐时空变化的影响因素与陆源 TDN 的量化减排研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [32] 王文亮, 陈建芳, 金海燕, 等. 长江口夏季水体磷的形态分布特征及影响因素[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 32-41.
- [33] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素 a 和初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1333-1340.
- [34] 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 [J]. Continental Shelf Research, 2019, 172: 12-21.
- [35] DAN S F, LAN W L, YANG B, et al. Bulk sedimentary phosphorus in relation to organic carbon, sediment textural properties and hydrodynamics in the northern Beibu Gulf, South China Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 155: 111176.
- [36] 韦献革, 温琰茂, 陈璟璇, 等. 哑铃湾网箱养殖海区表层沉积物磷的含量特征[J]. 水产科学, 2005, 24(8): 4-7.
- [37] CHENG X J, ZENG Y X, GUO Z R, et al. Diffusion of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface and in seawater at aquaculture areas of Daya Bay, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11: 1557-1572.
- [38] RØY H, HUETTEL M, JØRGENSEN B B. Transmission of oxygen concentration fluctuations through the diffusive boundary layer overlying aquatic sediments [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(3): 686-692.
- [39] 龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 430-436.
- [40] 王丕波, 宋金明, 郭占勇, 等. 海洋表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响[J]. 海洋科学, 2005, 29(10): 79-82.
- [41] 黄显兵, 杜虹, 黄洪辉, 等. 深澳湾表层底质沉积物中凯氏氮和总磷的时空分布[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 333-337.
- [42] 金相灿, 姜霞, 姚扬, 等. 溶解氧对水质变化和沉积物吸磷过程的影响[J]. 环境科学研究, 2004, 17(S1): 34-39.
- [43] 罗昭林, 朱长波, 郭永坚, 等. 流沙湾表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征和污染评价[J]. 南方水产科学, 2014, 10(3): 1-8.

Study on Distribution Characteristics of Phosphorus in Cage Culture Stage Near Qinzhou Bay, South China

HUANG Liyan^{1,2}, HUANG Hu^{2,3**}, LIAO Riquan^{2,3}

(1. Beibu Gulf Ocean Development Research Center, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi, 535011, China; 2. Institute of Marine, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi, 535011, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Change and Disaster in Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi, 535011, China)

Abstract: In order to understand the distribution characteristics of Phosphorus in water and sediments of *Trachinotus ovatus* cultured in Qinzhou Bay during different culture periods, the distribution of phosphorus in water and surface sediments was investigated in May (breeding and seeding period), July (breeding peak period) and October (breeding harvest period) in 2022. The results showed that the variation trend of phosphorus content increased gradually during the breeding period, and the content in the surface water was higher than that in the bottom water. Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP) was the main form of Total Dissolved Phosphorus (TDP). Phosphorus limitation occurred in the cage area during the peak period of breed-

ing. The phosphorus content in surface sediments showed a larger value during the peak period of culture, and the distribution characteristics of phosphorus content in surface sediments showed that the phosphorus content in culture peak period was higher than that in culture harvest period and culture seedling stage, and that in cage area was higher than that in non-culture area. Inorganic Phosphorus (IP) was the main occurrence form of Total Phosphorus (TP). The P Enrichment Index (PEI) during cage culture period was 0.31 – 1.42, and the cage area was higher than the non-culture area, indicating that the offshore cage culture activities in Qinzhou Bay would bring phosphorus pollution to the sedimentary environment. Highly intensive culture activities have a negative impact on the quality of both water environment and sedimentary environment. In view of the phosphorus pollution in the coastal cage culture period of Qinzhou Bay, it is necessary to take scientific control measures to create an ecological and healthy culture model in Qinzhou Bay, improve economic value and reduce pollution to the marine environment.

Key words: Qinzhou Bay; cage culture; phosphorus; distribution

责任编辑: 陆雁, 陈少凡



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>