张斯瀚,申瑞婷,张晶晶,等.调水调沙对黄河口浮游植物粒级分布的影响 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):910-922.
Zhang S H, Shen R T, Zhang J J, et al. The impact of Water-Sediment Regulation Scheme on the phytoplankton size-fractionated distribution in the the Yellow River Estuary [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):910-922.

调水调沙对黄河口浮游植物粒级分布的影响

张斯瀚[1,2,3],申瑞婷[4],张晶晶[2*],孙绍庆[2],张孝民[3],王秀霞[3],李 凡[3],吕振波[2] (1.上海海洋大学,上海 201306；2.鲁东大学,滨海生态高等研究院,山东 烟台 264025；3.山东省海洋资源与环境研究院,山东省海洋生态修复重点实验室,山东 烟台 264006；4.中国中交水运规划设计院,北京 100007)

摘要：为研究调水调沙对黄河口邻近海域浮游植物粒级分布的影响,于 2019 年 6 月 24 日、7 月 6 日、7 月 25 日,对黄河口近海海域表、底层环境因子、叶绿素 a(Chl a)和浮游植物粒级的空间分布特征进行了 3 次综合调查.结果显示,调查区域营养盐结构整体呈现高氮、高硅、低磷特征,整个调查期间表、底层均未出现氮限制,但磷限制始终显著,且随着调水调沙推进逐渐加剧.随着调水调沙进行,表层 Chl a 浓度呈先降后升趋势,调水调沙前,高值区出现在河口,以小型藻为主;调水期,Chl a 高值区逐渐扩展至口门两侧,小型藻仍占主导地位,但微型藻占比明显下降;调沙期,Chl a 高值区出现在东北离岸区域,小型藻和微微型藻共同占主导地位.与表层不同,底层 Chl a 浓度整体呈持续下降趋势,调水调沙前和调水期,调查海域 Chl a 略低于表层,但空间分布趋势和粒级组成变化规律与表层类似;调沙期,Chl a 高值区主要出现在东北离岸区域,小型藻占比明显高于表层.冗余分析(RDA)表明不同阶段表、底层主要影响因子存在明显差异,调水调沙前表层受 DIN/DIP、DSi/DIP 和 DIP 影响,底层由 DIN 和盐度主导;调水期表层受 DIN 主导,底层以 DSi/DIN 为主;调沙期表层主要受温度、DIN 和 DSi 控制,底层则由温度、DIN 和 DIN/DIP 共同主导.

关键词：黄河口；调水调沙；粒级分布；浮游植物；环境因素
中图分类号：X171 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-0910-13

The impact of Water-Sediment Regulation Scheme on the phytoplankton size-fractionated distribution in the the Yellow River Estuary. ZHANG Si-han[1,2,3], SHEN Rui-ting[4], ZHANG Jing-jing[2*], SUN Shao-qing[2], ZHANG Xiao-min[3], WANG Xiu-xia[3], LI Fan[3], LYU Zhen-bo[2] (1.Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China；2.The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China；3.Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China；4.China Communications Construction Water Transportation Consuliants Co., Ltd., Beijing 100007, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：

Abstract：To investigate the impact of the Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS) on the size-fractionated distribution of phytoplankton in the coastal waters of the Yellow River Estuary, three surveys were conducted on June 24, July 6, and July 25, 2019. These surveys examined the spatial distribution of environmental factors, chlorophyll a (Chl a) concentrations, and phytoplankton size in both surface and bottom layers. The results indicated that the region consistently exhibited a nutrient structure characterized by high nitrogen and silica but low phosphorus. Throughout the survey period, nitrogen limitation was not observed in either the surface or bottom layers, while phosphorus limitation was persistent and intensified as the regulation progressed. During WSRS period, surface Chl a concentrations showed a decreasing trend followed by a gradual increase. In the pre-stage, high Chl a values were found near the river mouth, dominated by small-sized algae. During the water regulation stage (WR-stage), the high Chl a region expanded toward both sides of the estuarine mouth, with small-sized algae still dominant, though the proportion of microalgae notably decreased. In the sediment regulation stage (SR-stage), the high Chl a region shifted to the northeastern offshore area, with small-sized and picoplankton jointly dominating. In contrast, the Chl a concentration in bottom-layershowed an overall declining trend. During Pre and WR-stage, bottom Chl a levels were slightly lower than those in the surface layer, yet the spatial distribution and changes in size composition followed similar patterns. During SR-stage, high bottom Chl a concentrations were mainly found in the northeastern offshore area, where small-sized algae were significantly more dominant than in the surface layer. Redundancy analysis (RDA) revealed stage-specific shifts in the dominant environmental drivers. Before the WSRS, surface phytoplankton structure was influenced primarily by DIN/DIP, DSi/DIP, and DIP, while the bottom layer was controlled by DIN and salinity. During

收稿日期：2025-06-23
基金项目：山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD079);青岛市现代分析与近海生态环境安全保障重点实验室开放基金(QDAE2501);国家自然科学基金青年项目(42306163,42201061)
* 责任作者, 副教授, hpjj2006@ldu.edu.cn

the WR-stage, DIN was the main driver in the surface layer, and DSi/DIN dominated the bottom. In the SR-stage, temperature, DIN, and DSi were key surface drivers, while temperature, DIN, and DIN/DIP governed bottom-layer variation.

Key words：Yellow River Estuary；water and sediment regulation scheme；grain size distribution；phytoplankton；environmental factors

河口生态系统呈现出显著的水文、物理、化学梯度变化特征[1-3].浮游植物作为河口生态系统的重要组成部分,具有极其重要的生态作用[4-6].浮游植物的群落结构与功能性状直接相关,这些性状会随着环境因子的变化而改变,进而影响生态系统的稳定性和功能[7-8].粒级是浮游植物重要的功能性状之一[9],其结构差异会显著影响食物网结构和生物地球化学循环过程[10-12],因此,研究浮游植物粒级结构变化规律对于科学认识河口生态系统具有非常重要的意义.

浮游植物按照粒径的大小可以分为小型(20~200μm)、微型(2~20μm)和微微型(0.2~2μm)3 类[13-16].粒级结构不同,其资源获取方式存在较大差异,粒径小、表面积与体积比大的浮游植物,单位生物量的营养摄取速率高;粒径大、表面积与体积比小的浮游植物,单位生物量的营养摄取速率低[3].先前普遍认为,个体大的小型浮游植物营养盐吸收速率明显高于个体小的微型和微微型浮游植物,在河口、近岸高营养盐海域贡献率较高[17-20];而微型和微微型浮游植物则在寡营养海域贡献率较高[21-23].

近年来研究表明,在受周期性河流输入影响较大、环境不断变化的河口区域,粒级组成会随着温度、径流、营养水平的变化而不断变化,在温度高、径流高的夏季小粒径的微型和微微型浮游植物占有极重要的比例[24-26].在美国 Neuse 河口,春夏浮游植物高峰期微微型浮游植物初级生产力的贡献率可达 42%~55%[27].在高营养盐的长江口附近海域,微型浮游植物是初级生产的主要承担者,贡献率约为 50%[28-29];珠江口近岸的研究也显示,夏季微微型浮游植物占优势,其丰度较春季高两个数量级[30].

黄河是我国第二大河,其入海径流量占渤海淡水输入总量的 75%以上[31-32].近几十年来,黄河入海径流持续减少,导致下游河道淤积严重.为调节水沙平衡,黄河水利委员会自 2002 年起实施调水调沙工程,冲刷下游河槽淤积[33].调水调沙期间,大量水沙和营养物质输入黄河口,显著改变了近海海域的盐度和营养盐结构.此外,径流与潮流的相互作用形成的切变锋,导致表层与底层环境条件存在显著差异[34-36].这种环境条件的改变必然引起河口浮游植物粒级结构的显著变化,进而对上层食物网和生物地球化学循环产生重要影响.然而,以往关于黄河口邻近海域浮游植物的研究多集中于群落结构的变化,对浮游植物粒级结构及其影响因素研究较为匮乏,且多采用垂直拖网法,缺乏对不同水层浮游植物变化的系统性研究[37-39].

浮游植物粒级检测主要有两种,逐级过滤法和特征色素分析法[40].逐级过滤法已在我国多个海域得到广泛应用[16,41-43].然而,该方法需要现场进行多次过滤,且部分以链状或群体形式存在的微型和微微型浮游植物,在过滤过程中可能被截留在较大孔径的滤膜上,从而导致其生物量被低估[41].相比之下,特征色素法利用浮游植物的特异性色素进行粒级分类[44-45],现场操作仅需一次过滤,不仅能够实现粒级分类,还能提供浮游植物功能类群的相关信息[14].

鉴于此,本研究利用特征色素粒级分类法研究了 2019 年调水调沙期间黄河口邻近海域不同水层浮游植物粒级组成的时空分布特征,并结合现场环境因子数据,定量分析了各浮游植物粒级和环境因子之间的相关关系,阐述调水调沙不同时期驱动黄河口近海海域浮游植物粒级结构时空变化的关键环境因子,旨在揭示黄河调水调沙对黄河口近岸海域浮游植物粒级结构的影响,为深入分析复杂海陆交互作用地带生物地球化学循环和生态环境变迁提供重要的基础资料.

1　研究区域和方法

1.1　研究区域与采样方法

2019 年黄河调水调沙于 6 月 21 日~8 月 2 日进行,6 月 21 日洪水由小浪底水文站下泄;6 月 27 日,在利津水文站记录到流量的显著增加(2430m^3/s),其影响大约在 10h 后到达河口[46].根据利津站流量与输沙量的变化特征,将调水调沙期间划分为三个不同阶段:(1)调水调沙前(低流量、低输沙量);(2)调水期(高流量、低输沙量);(3)调沙期(高流量、高输沙量).调水调沙期间利津站的水沙通量如图 1 所示.以

黄河入海口为中心,从河口到离岸共设置 5 个断面 18 个站位(图 2).每个站位取表层、底层水样监测温度、盐度、营养盐和浮游植物色素,表层水样统一在水面以下 0.5m 深处采集,底层水样采样深度如表 1 所示.调沙期河口附近站位 A2、A3、B1、B2、C1、D1、E2 底层泥沙含量较高,难以过滤,因此这些站位仅取表层水样.

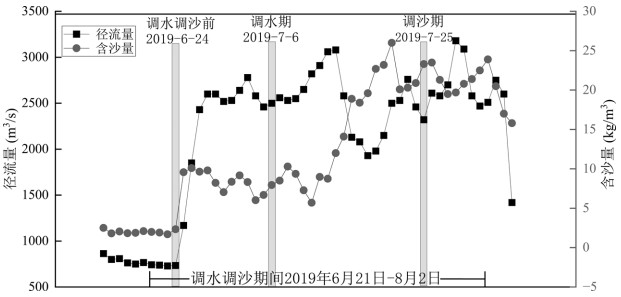


图 1 2019 年调水调沙期间利津站水沙通量

Fig.1 Water and sediment discharge at Lijin Station during the Water−Sediment Regulation Scheme (WSRS)in 2019

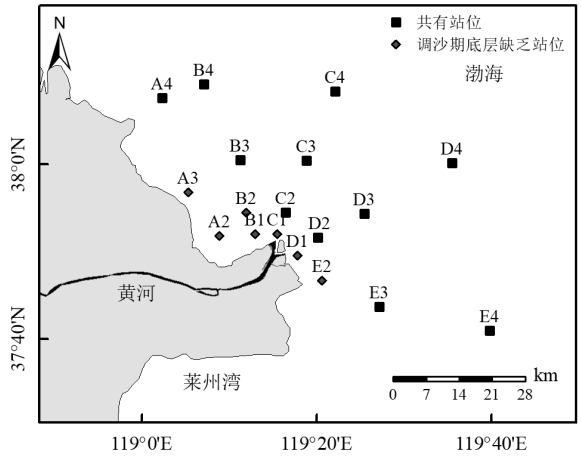


图 2 采样站位

Fig.2 Sampling sites

表 1 调查海域底层样品采样深度

Table 1 Sampling depth of the bottom layer in the studying sea area

站位	底层采样深度(m)	站位	底层采样深度(m)
A2	5.5	C3	16.5
A3	6.5	C4	18.0
A4	14.0	D1	3.5
B1	3.3	D2	10.5
B2	7.5	D3	16.5
B3	12.0	D4	19.0
B4	14.0	E2	7.5
C1	2.5	E3	13.3
C2	11.5	E4	14.8

1.2 样品采集与分析

样品采集与分析严格按照《海洋调查规范第 9 部分:海洋生态调查指南》(GB/T12763.9−2007)[47]进行.由 CTD 采水器获取表、底层水样.在弱光下使用直径 47mm 的 GF/F 滤膜(Whatman)过滤至少 500mL 海水,滤膜吸干水分,用铝箔纸包裹,保存于液氮罐中,用于色素测定,每个站位每个水层仅采集一个样品.另取水样 250mL,用 0.45μm 醋酸纤维滤膜过滤,滤液用于营养盐浓度测定.

温度、盐度使用船载 CTD(Seabird911)现场测定.营养盐利用营养盐自动分析仪(QuAAtro AutoAnalyzer 39)测定,硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)、氨氮(NH_4^+)、可溶性无机磷(DIP,即 PO_4)和可溶性硅酸盐(DSi,即 $Si(OH)_4$))的检出限分别为 0.015,0.003,0.040,0.020 和 0.040μmol/L.可溶性无机氮(DIN,为 NO_3^-、NO_2^-和 NH_4^+之和).

含有浮游植物色素的 Whatman 滤膜用剪刀剪碎,使用 2mL100%甲醇冰水浴超声提取 10min,提取液用孔径为 0.2μm 的 PTFE 滤膜去除杂质.进样前,滤液加入 1:0.2(体积比)的超纯水,涡旋振荡 1min,所有样品在制备完成后立即进行分析.色素使用 ZORBAX C8 色谱柱(4.6mm×100mm,5μm 粒径)分离,岛津 HPLC(LC20−SPD20/RF20)进行定量检测,流动相 A 为甲醇:乙腈:水合吡啶溶液(0.25mol/L 吡啶,具体配方见下文)(体积比 50:25:25)的混合物,流动相 B 为甲醇:乙腈:丙酮(体积比 20:60:20),具体流动相梯度详见 Zapata(2000)[48].所用的有机溶剂为 HPLC 级.色素标准品,包括叶绿素 a、叶绿素 b、别藻黄素、19’−丁酰基氧化岩藻黄素、19’−己酰基氧化岩藻黄素、岩藻黄素、玉米黄素、多甲藻素,购自丹麦水资源与环境研究所.

1.3 浮游植物粒级分析

粒级测定采用色素分类法[45].使用 7 种特征色素表征不同的浮游植物类群及其粒级结构(表 1);浮游植物生物量使用 Chl a 表示;不同粒级浮游植物比例分别以小型浮游植物贡献率(mPF),微型浮游植物贡献率(nPF)和微微型浮游植物贡献率(pPF)来表示,计算公式见表 2.

1.4 统计分析和图件绘制

浮游植物粒级及环境因子数据先进行正态性检验,对不符合正态分布的指标进行 lg(x+1)转换,

转换后的数据首先进行去趋势对应分析(DCA),结果显示 4 个轴最大梯度长度均小于 3,因此选择冗余分析(RDA)研究环境因子和浮游植物粒级结构的相关关系.环境因子空间分布图使用 Surfer15 绘制,Chl a 和粒级组成空间分布图使用 Arcgis10.3 绘制.

表 2　浮游植物粒级百分比计算公式[45]

Table 2　calculation formula for phytoplankton size class percentages[45].

参数		计算公式
诊断色素加权总和	weighted sum of diagnostic pigments(wDP)	0.35[But−fuco]+1.41[Fuco]+1.27[Hex−fuco]+1.41[Peri]+0.60[Allo]+0.86[Zea]+1.01[Chl b]
小型浮游植物百分比	microphytoplankton proportion factor(mPF)	(1.41[Fuco]+1.41[Peri])/wDP
微型浮游植物百分比	nanophytoplankton proportion factor(nPF)	(1.27[Hex−fuco]+0.35[But−fuco]+0.60[Allo])/wDP
微微型浮游植物百分比	picoophytoplankton proportion factor(pPF)	(0.86[Zea]+1.01[Chl b])/wDP

注:Chl a: 叶绿素a, Chl b:叶绿素b,Allo:别藻黄素, But−fuco:19'−丁酰基氧化岩藻黄素,Hex−fuco:19'−己酰基氧化岩藻黄,Fuco:岩藻黄, Zea:玉米黄, Peri:多甲藻素.

2　结果与分析

2.1　调水调沙期间环境因子的时空分布特征

2.1.1　温度、盐度范围　2019 年随着调水调沙进行,调查海域温度呈逐渐升高趋势.调水调沙前,调查海域表层温度平均值为(21.5±1.58)℃;调水期升至(22.16±1.48)℃;调沙期达到(26.47±2.27)℃(表 3);空间分布整体呈现随纬度升高递减的趋势(图 3A1~A3).与表层类似,底层温度也呈持续上升趋势,但温度明显低于表层,调水调沙前、调水期和调沙期,底层温度平均值分别为(18.83±2.87),(21.95±1.45)和(23.35±2.01)℃,空间分布与表层类似,但在黄河口北部离岸海域有一个明显低值区,且随着调水调沙进行向东侧离岸区域移动(图 3B1~B3).

表 3　2019 年黄河调水调沙期间调查海域环境因子范围和平均值(±标准差)

Table 3　Concentration ranges and mean values (±sd) of environmental factors in the studying areas during WSRS s in 2019

项目		调水调沙开始前		调水期		调沙期	
		表层	底层	表层	底层	表层	底层
T(℃)	范围	19.20~26.60	8.50~22.70	18.70~25.40	20.00~25.30	21.90~30.20	20.50~26.80
	平均值±标准差	21.51±1.58	18.83±2.87	22.16±1.48	21.95±1.45	26.47±2.27	23.35±2.01
S	范围	21.26~30.75	27.71~31.09	19.09~27.71	20.94~28.77	2.59~32.14	27.93~32.13
	平均值±标准差	27.84±1.96	29.30±1.01	25.29±2.32	26.72±1.71	24.63±6.99	30.86±1.21
DIN(μmol/L)	范围	30.34~180.71	27.67~113.81	21.83~100.71	19.71~85.15	11.23~130.91	14.86~27.28
	平均值±标准差	50.24±33.08	43.01±18.06	37.72±17.61	34.35±14.80	60.49±32.24	22.26±4.12
DIP(μmol/L)	范围	0.03~0.26	0.02~0.32	0.02~0.11	0.02~0.26	0.03~0.27	0.03~0.07
	平均值±标准差	0.06±0.05	0.07±0.09	0.05±0.03	0.06±0.06	0.06±0.06	0.04±0.01
DSi(μmol/L)	范围	3.74~79.39	4.56~20.68	1.98~56.60	1.94~18.58	7.40~90.78	6.87~20.15
	平均值±标准差	13.64±16.95	9.04±3.80	16.09±11.14	10.72±3.97	42.10±24.52	12.99±4.50
DIN/DIP	范围	337.01~1592.10	101.47~1660.14	208.53~3908.65	121.05~3662.81	173.46~3612.06	203.62~731.67
	平均值±标准差	933.27±349.53	992.31±414.08	1006.55±844.78	1035.52±851.73	1355.82±906.27	540.67±168.11
DSi/DIN	范围	0.12~0.44	0.14~0.30	0.07~0.56	0.08~0.54	0.39~1.02	0.30~0.78
	平均值±标准差	0.23±0.09	0.21±0.05	0.41±0.13	0.33±0.11	0.68±0.14	0.59±0.19
DSi/DIP	范围	57.55~393.32	14.28~324.93	55.83~2196.77	35.63~799.33	113.63~2579.50	146.75~573.31
	平均值±标准差	207.91±93.72	208.26±88.56	445.16±493.82	315.24±227.96	943.67±682.20	317.92±154.09
相对氮限制	站位数	−	−	−	−	−	−
绝对氮限制	站位数	−	−	−	−	−	−
相对磷限制	站位数	18	17	18	18	18	18
绝对磷限制	站位数	14	15	16	16	16	18
相对硅限制	站位数	−	−	−	−	−	−
绝对硅限制	站位数	−	−	1	1	−	−

注:−为未限制.

与温度不同,表层盐度整体呈现逐渐降低的趋势,表层盐度由调水调沙前的(27.84±1.96)降至调水调沙后的(24.63±6.99)(表 3);空间分布整体呈现自河口到离岸逐渐升高的趋势(图 3C1~C3),低值区的范围随调水调沙进行不断扩大.底层盐度明显高于表层,整体呈现先降低后升高的趋势,调水调沙前、调水期和调沙期平均盐度分别为(29.30±1.01),(26.72±1.71)和(30.86±1.21),调沙期底层盐度与调水调沙前基本持平(表 3);空间分布变化趋势与表层类似,但低值区更靠近河口(图 3D1~D3).

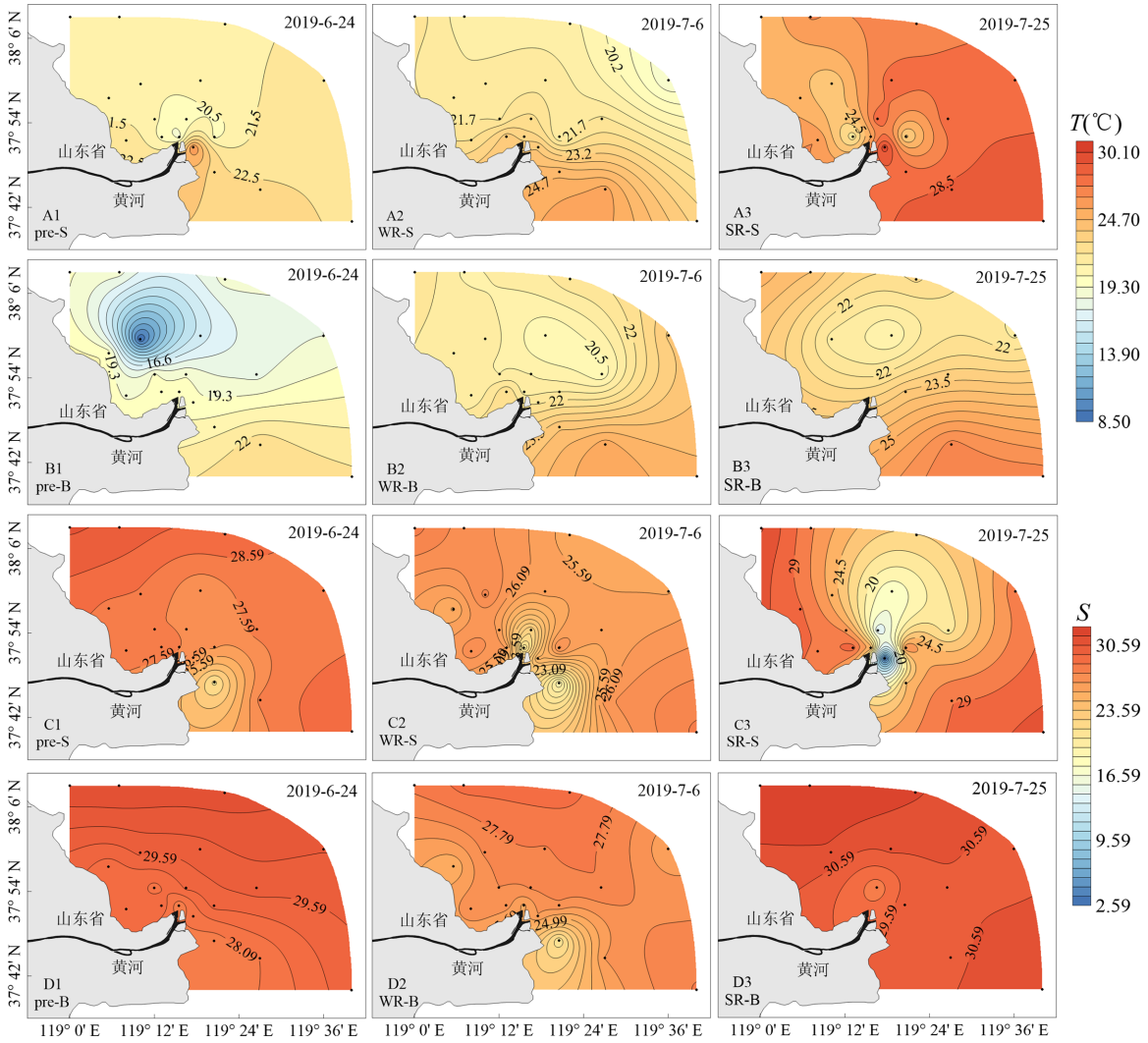


图 3 2019 年调查海域温度、盐度的时空分布特征

Fig.3 Temporal and spatial variations of temperature and salinity in the studying area in 2019

pre-,WR-,SR-分别代表调水调沙前、调水期和调沙期;S 和 B 分别代表表层和底层,图 4~6 采用相同的缩写

2.1.2 营养盐 调查海域营养盐整体呈现高氮、硅,低磷的特征,不同阶段,营养盐空间分布变化显著(图 4).调水调沙前,表层 DIN、DIP 和 DSi 的变化范围分别为 30.34~180.71,0.03~0.26,3.74~79.39μmol/L,均值分别为(50.24±33.08),(0.06±0.05)和(13.64± 16.95)μmol/L(表 3),表层营养盐浓度均呈现自河口至离岸逐渐降低的趋势(图 4A1、C1、E1).底层 DIN、DIP、DSi 变化范围分别为 27.67~113.81,0.02~0.32,4.56~20.68μmol/L,平均值为(43.01±18.06),(0.07±0.09),(9.04±3.80) μmol/L,DIN 和 DSi 的高值区与表层类似,均集中在河口区域,DIP 的高值区则出现在河口以西近岸海域和东北离岸海域.调水期,调查海域营养盐浓度显著降低(底层 DSi 除外),空间分布与调水调沙前基本一致(图 4A2、C2、E2).表层 DIN、DIP 和 DSi 分别降至(37.72±17.61),(0.05±0.03)和(16.09±11.14)μmol/L;DIP 下降最为明显,河口附近高值区基本消失.底层 DIN、DIP 变

化趋势与表层类似,但下降幅度小于表层,DIN、DIP 平均值分别降至(34.35±14.80)和(0.06±0.06)μmol/L. 与 DIP 和 DIN 不同,底层 DSi 浓度略高于调水调沙前,平均值为(10.72±3.97)μmol/L.

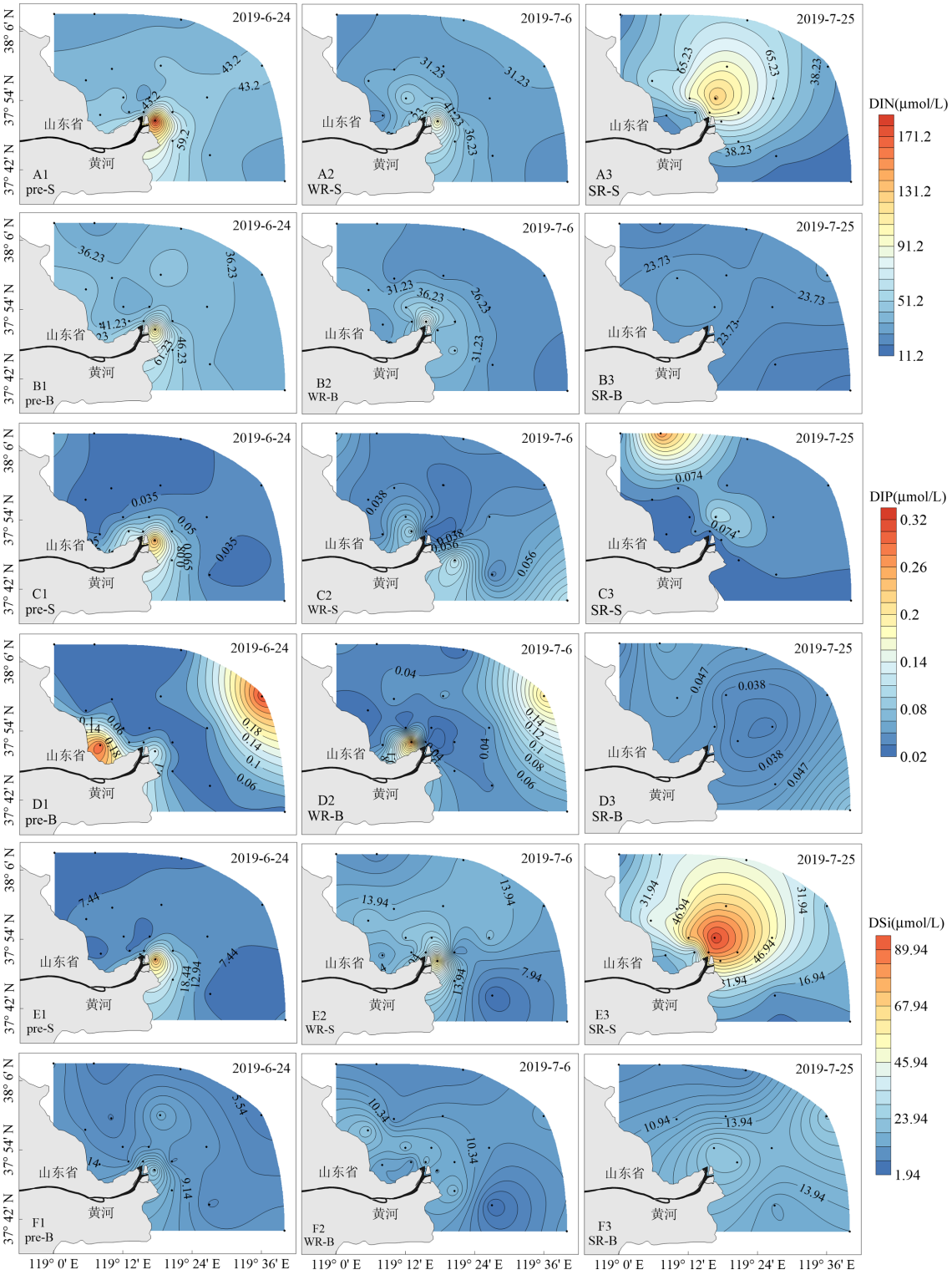


图 4　2019 年调查海域营养盐时空分布特征

Fig.4　Temporal and spatial variations of nutrients in the studying area in 2019

调沙期,相较于调水期,表层 DIN 和 DIP 浓度明显回升(图 4A3、C3),表层 DIN 和 DIP 浓度平均值分别升至(60.49±32.24)和(0.06±0.06)μmol/L;但底层 DIN 和 DIP 相较于调沙期反而下降,浓度均值分别

为(22.26±4.12)和(0.04±0.01)μmol/L.与 DIN 和 DIP 不同,调沙期表、底层 DSi 较调水期均呈现增长趋势,表层增长明显,平均值达约(42.10±24.52)μmol/L;底层增长幅度较小,平均值为(12.99±4.50)μmol/L,高值区仍位于河口且范围进一步扩大.

随着调水调沙进行,表层水体 DIN/DIP、DSi/DIN 和 DSi/DIP 均呈现逐渐升高的趋势;底层 DSi/DIN 和 DSi/DIP 与表层变化趋势类似,呈现逐渐升高的趋势,DIN/DIP 则呈现先升高后下降的趋势.根据 Dortch 等[49]和 Justic 等[50]提出的营养盐限制的标准,3 个调查航次均不存在氮限制,但磷限制明显,调水调沙前,表层所有站位均存在相对磷限制,其中有 14 个站位还同时存在绝对磷限制,底层相对磷限制站位 17 个,其中 15 个同时存在绝对磷限制;随着调水调沙进行,磷限制站位逐渐增多;同时调水期有个别站位受到绝对 DSi 限制(表 3).

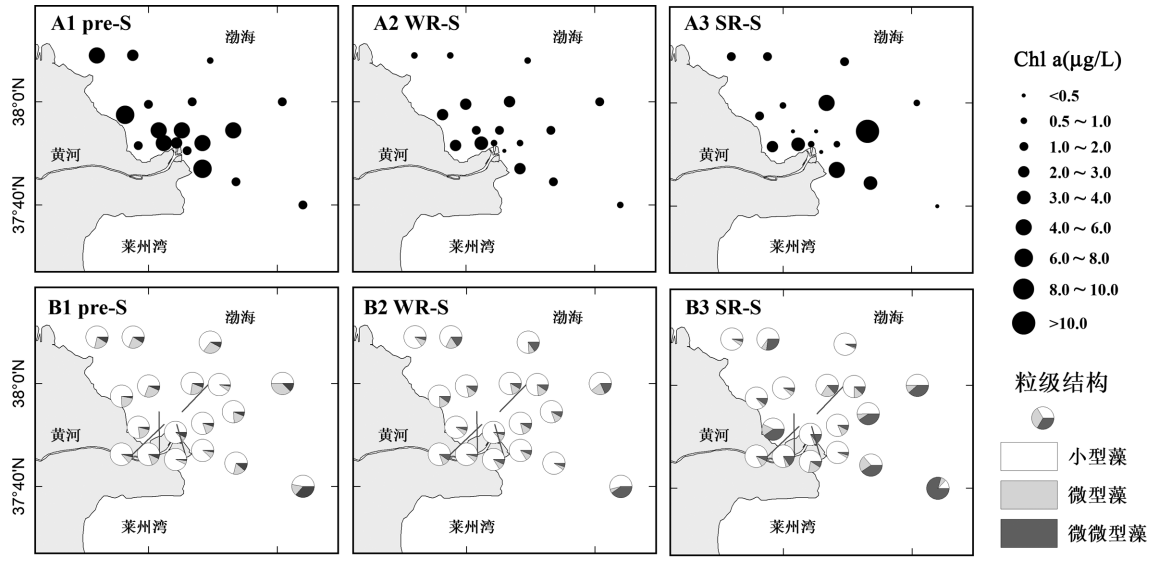
2.2 调水调沙期间 Chl a 和浮游植物粒级结构的时空间分布特征

随着调水调沙进行,表层 Chl a 浓度整体呈现先降低后升高的趋势.调水调沙前 Chl a 浓度为(3.32±1.99)μg/L(表 4),高值区出现在河口和西南部近岸海域(图 5A1);小型藻是主要浮游植物类群,微型藻次之(图 5B1).调水期 Chl a 浓度迅速降至(1.58±0.89)μg/L,Chl a 浓度高值区由河口转向口门两侧及莱州湾海域(图 5A2),河口、近岸、离岸区差异减小,小型藻继续占主导地位,同时微型藻占比明显缩小(图 5B2),微微型藻占比显著升高.调沙期,表层 Chl a 恢复升至(2.36±3.09)μg/L(表 4),但仍低于调水调沙前,空间差异更加明显,峰值出现在河口东北部中部站位,以小型藻和微微型藻为主,低值区出现口门附近和莱州湾海域,口门附近以小型藻为主,莱州湾一侧以微微型藻类为主(图 5A3).

表 4 2019 年调水调沙期间调查海域 Chl a 浓度和不同粒级浮游植物占比范围和平均值(±标准差)

Table 4 Concentration ranges and mean values (± sd) of Chl a concentrition and phytoplankton size class percentages in the studying areas during WSRS in 2019

参数	项目	调水调沙开始前		调水期		调沙期	
		表层	底层	表层	底层	表层	底层
Chl a(μg/L)	范围	0.95~7.23	1.33~7.79	0.42~3.38	0.27~3.13	0.19~12.90	0.20~2.78
	平均值±标准差	3.32±1.99	2.68±1.50	1.58±0.89	1.22±0.86	2.36±3.09	1.05±0.71
小型藻百分比(%)	范围	47.34~92.45	44.96~95.54	53.94~90.12	62.35~93.42	12.99~92.97	48.20~90.39
	平均值±标准差	74.86±12.10	76.45±11.68	78.58±9.30	83.64±8.37	69.02±21.57	78.32±14.16
微型藻百分比(%)	范围	5.55~37.77	2.97~31.17	4.67~20.72	4.53~21.44	1.99~22.64	2.71~9.61
	平均值±标准差	17.20±8.04	14.90±6.71	10.84±3.86	9.27±4.36	10.10±5.89	5.13±1.83
微微型藻百分比(%)	范围	1.92~36.21	1.49~39.34	3.79~40.30	1.62~30.02	4.06~79.62	6.41~46.16
	平均值±标准差	7.93±7.46	8.65±8.08	10.57±8.24	7.08±6.16	20.88±19.49	16.55±12.96



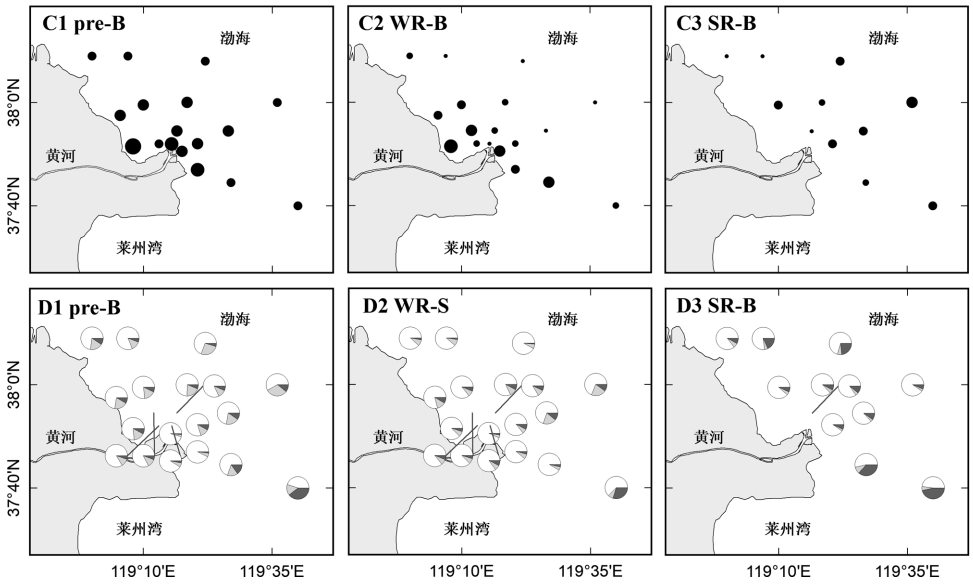


图 5　2019 年调查海域浮游植物丰度和粒级结构时空分布特征

Fig.5　Temporal and spatial variations of phytoplankton abundance and size−fractionated in the studying area in 2019

底层 Chl a 浓度低于表层,且随着调水调沙进行 Chl a 平均值呈现递减的趋势,调水调沙前,Chl a 浓度平均值为(2.68±1.50)μg/L(表 4),与表层不同,河口 Chl a 高值区不明显(图 5C1);浮游植物粒级结构与表层类似(图 5D1).调水期,Chl a 平均值降为(1.22±0.86)μg/L(表 4),高值区出现在口门两侧(图 5C2),小型藻是主要的浮游植物(图 5D2).调沙期,Chl a 平均值降为(1.05±0.71)μg/L(表 4),高值区出现东北侧离岸海域(图 5C3),小型藻依然是主要的浮游植物,但微微型藻占比显著升高(图 5D3).

2.3　统计分析

为了进一步研究影响黄河口邻近海域浮游植物粒级分布的主要因素,本研究分别对调水调沙前、调水期和调沙期 3 个航次表、底层浮游植物粒级结构与环境因子进行了 RDA 分析.

调水调沙前,表层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 55.58%和 8.84%的粒级结构变化(图 6A1).影响排序轴 1 的主要环境变量是 DIN/DIP、DSi/DIP 和 DIP.小型藻与 DIN/DIP 和 DSi/DIP 呈现明显负相关,与主要营养盐浓度呈正相关;微型藻与小型藻相反,其与 DIN/DIP 和 DSi/DIP 呈明显正相关,与主要营养盐浓度呈负相关;微微型藻与温度正相关,与其它环境因子没有明显的相关性.底层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 48.66%和 6.30%的粒级结构变化(图 6B1).排序轴 1 主要由 DIN 和盐度主导.小型藻与 DIN 呈现明显的正相关;微型藻与盐度呈现明显正相关,与 DSi 显著负相关;微微型藻主要与温度、DSi/DIP 和 DIN/DIP 呈正相关,与 DIN 呈负相关.

调水期,表层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 62.90%和 7.33%的粒级结构变化(图 6A2).排序轴 1 主要受 DIN 的影响.小型藻与 DIN 呈明显的正相关关系,与盐度呈现负相关关系;微型藻与温度呈显著负相关;微微型藻则主要与 DIP 和盐度呈现正相关,与 DIN 负相关.底层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 64.06%和 8.63%的粒级结构变化(图 6B2).排序轴 1 主要由 DSi/DIN 主导.小型浮游植物与 DSi/DIN 呈显著的负相关,微型藻与 DIP 呈较强的正相关,微微型藻与温度呈一定的正相关关系.

调沙期,表层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 64.25%和 1.85%的粒级结构变化(图 6A3).影响排序轴 1 的环境因子主要是温度、DIN 和 DSi.小型藻与 DIN 和 DSi 呈现极强的正相关关系,与温度呈现显著的负相关关系.微微型藻与小型藻相反,与 DIN 和 DSi 呈现极强的负相关关系,与温度呈现显著的正相关关系.微型藻与盐度呈一定的正相关.底层 RDA 排序图第 1 轴和第 2 轴分别解释了 93.36%和 0.72%的粒级结构变化(图 6A3).第 1 轴主要由温度、DIN 和 DIN/DIP 主导.小型浮游植物与温度呈现显著的负相关关系,与 DIN 和 DIN/DIP 呈现显著的正相关关系.与表层一样,微微型藻与小型

藻呈相反的趋势;微型藻则主要与 DSi 呈现显著的负相关关系.

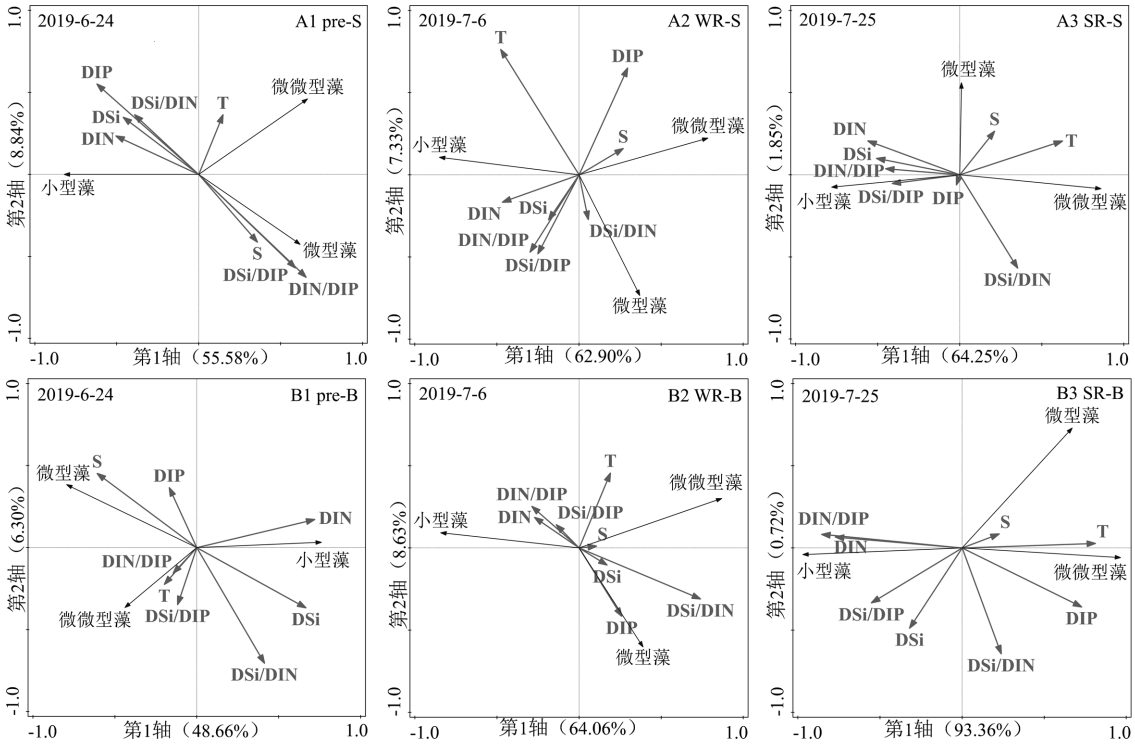


图 6 2019 年调查海域不同粒级浮游植物与环境因子的 RDA 排序

Fig.6 Redundancy analysis (RDA) correlation biplots of the different phytoplanktonsize and environmental factors in the studying area in 2019

3 讨论

3.1 调水调沙对黄河口邻近海域营养盐时空分布的影响

调水调沙显著改变了营养盐空间分布格局(图 4).调水调沙前,营养物质高值区出现在河口,与低盐区高度重合,说明淡水输入可能是其主要来源.RDA 分析也显示表、底层盐度与主要营养盐均呈现负相关关系,也说明河流输入是营养盐的主要来源[51].随着调水调沙进行,大量营养盐输入至河口,但河口营养浓度并没有显著升高,尤其是调水期,表、底层 DIN、DIP 均呈现显著下降的趋势,这可能是由于浮游植物生长使营养物质消耗增加引起的[52-53].与 DIN、DIP 不同,随着调水调沙进行,DSi 呈现逐渐升高的趋势,且高值区与低盐区基本高度重合,这可能是由于调水调沙期间大量生长的不仅有硅藻还有其他不消耗硅的藻类[38],因此 DSi 的消耗小于 DIN 和 DIP.此外,调沙期底层营养物质明显低于表层,且河口附近没有明显的低盐区,说明调沙期径流输入对黄河口邻近海域营养盐的影响主要集中在表层,底层河口盐度明显高于调水期和表层也证实了这一点.

调水调沙不仅会影响营养盐的空间分布,还会影响黄河口邻近海域的营养盐结构.随着调水进行表层、底层 DIN/DIP、DSi/DIP 均显著高于调水调沙前,说明调水调沙会进一步加剧黄河口邻近海域营养盐结构失衡,这与先前在该区域开展的研究一致[54-55].产生这种现象的原因可能是调水调沙带来的营养物质促使浮游植物的快速生长,消耗了大量的氮、磷和硅,而调水调沙补充的主要是氮和硅,磷较少[50],从而导致表层的 DIN/DIP 和 DSi/DIP 比值进一步升高[48].调沙期,底层 DIN/DIP 和 DSi/DIP 明显低于表层和调水期的底层,也说明调沙期径流输入对黄河口邻近海域营养盐结构的影响主要集中在表层.本研究还发现严重磷限制在调水调沙前就已经发生,这与王英等[37]的研究基本一致,但与孙珊等[51]的研究结果不同,这可能是由于调查年份调水调沙前黄河口邻近海域 Chl a 浓度明显高于孙珊采

样年份同期,导致磷在调水调沙前就被大量消耗,因此较早发生磷限制[56].

3.2　调水调沙对黄河口邻近海域 Chl a 和浮游植物粒级时空分布的影响

随着调水调沙进行,黄河口邻近海域表、底层 Chl a 浓度整体呈现先降低后缓慢升高的趋势,但至调沙期仍未恢复至调水调沙前的水平,这与先前调水调沙期间 Chl a 并未显著增加研究结果类似[39,46],说明尽管调水调沙期间黄河输入的大量营养物质到河口[32],但是并未使浮游植物现存量显著增加[46]. Wang 等[46]认为水体浑浊度增加引起的光照可利用性降低抵消了高营养盐可能带来的浮游植物爆发性生长,降低了夏季爆发藻华的可能性;Zhang 等[39]则认为,黄河调水调沙会诱导浮游动物短暂地快速增殖,其摄食的下行效应可能是浮游植物没有快速增长的主要原因.本研究发现,Chl a 浓度显著降低主要出现在径流量大,输沙量低的调水期,但在径流与调水期类似但输沙量明显增加的调沙期,Chl a 浓度却显著升高,表明光限制可能并不是显著影响浮游植物生物量的主要因素.调水调沙期间是黄河口浮游动物大量繁殖的时间[57],且黄河口邻近海域呈现下行效应主导时典型的高营养盐和低浮游植物生物量特征[58],这表明下行效应在该阶段浮游植物生物量控制中可能起着重要作用.本文虽然没有测定浮游动物的生物量,但是调水期,河口较低的营养盐浓度说明同期应该存在一个浮游植物快速生长消耗营养物质的过程,而 Chl a 却明显下降,侧面证实确实可能存在下行控制的过程.

所有阶段小型藻均是最主要的浮游植物,这与温带近岸高营养盐海域,小型浮游植物占主导地位的结果基本一致[59-60].这可能是由于小型藻类高效的氮吸收机制,使其在营养盐丰富的环境中占据优势[61],RDA 分析也显示小型藻在所有阶段的表、底层均与 DIN 呈现显著的正相关关系也证实了这一点.王英等在黄河口邻近海域的研究结果也显示,调水调沙期间黄河口邻近海域浮游植物主要优势种以舟形藻(*Navicula* spp.)、针杆藻(*Synedra* spp.)和圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)等小型浮游硅藻为主,进一步说明在黄河口邻近海域粒级较大的小型藻占据明显优势[37].随着调水调沙进行,小型藻占比呈现先增加后减小的趋势.小型藻占比在调水期增加可能是因为调水期外源性营养盐输入促进小型细胞类型的生长[62].

与小型藻不同,微型藻呈现持续下降的趋势,尤其是底层,占比由调水调沙前的 15%降至调水调沙后的 5%,这与方涛等[63]在实验室模拟中提出的高氮环境促进微型藻类生长的结论不同,其原因可能是由于黄河口水体浊度较高,从而更有利于具有运动能力小型类群占据生态位.微微型藻则呈现持续上升的趋势,尤其是调沙期表层,微微型藻的占比达 21%,这可能是由于调水调沙期间存在一个明显的升温过程,温度升高有利于微微型藻生长.RDA 分析也显示,微微型藻均与温度呈现明显的正相关关系(除了调水期表层),说明调水调沙期间温度升高可能是微微型藻占比逐渐增高的主要原因.此外,黄河径流变化引起的盐度羽状锋面位置变化,可能是导致微微型藻比例上升的又一关键因素.在调沙期,调查区域东北部形成了一个明显的低盐高营养盐水团.锋面的存在阻碍了营养盐的向外扩散,使得锋面外侧水域营养盐相对贫乏,微微型浮游植物在低营养条件生长较快[13,63],在这一区域内,微微型藻的相对丰度最高达 80%,明显高于其他区域.

综上,影响浮游植物粒级的变化的环境因子较多,且主要影响因素是动态变化的,不同年份、不同采样时间点、环境因子和浮游植物粒级结构影响因素可能存在较大差别.在调水调沙期间,河口邻近站位还可能因泥沙输入导致可利用光照降低,从而影响浮游植物粒级结构.然而,本研究未采集可反映光照条件的相关数据,未能评估光照变化对浮游植物粒级的影响程度和范围.因此,黄河调水调沙对邻近海域浮游植物粒级结构影响及其主控因素仍有待进一步研究.

4　结论

4.1　调水调沙过程向河口输入大量高氮、高硅、低磷的淡水,加剧了调查海域营养盐比例的失衡.然而,这种影响主要体现在调水期和调沙期的表层水体,对底层水体的影响相对较弱.

4.2　随着调水调沙的进行,表层 Chl a 浓度先降后升,高值区由河口逐渐向两侧及外海扩散,调沙期位于东北侧离岸海域;底层 Chl a 浓度低于表层,整体呈现持续降低的趋势,空间分布趋势与表层类似.

4.3 调水调沙所有阶段,调查海域小型藻类均占主导,随着调水调沙进行,表、底层小型藻占比均呈现先升高后下降的趋势;微型藻占比均逐渐降低;微微型藻类则均呈现逐渐上升的趋势.

4.4 RDA 分析表明,不同阶段浮游植物粒级结构主控因子存在差异.调水调沙前,表层受 DIN/DIP、DSi/DIP 和 DIP 影响,底层由 DIN 与盐度主导;调水期,表层以 DIN 主导,底层主要受 DSi/DIN 影响;调沙期,表层受温度、DIN 和 DSi 共同作用,底层则主要由温度、DIN 和 DIN/DIP 决定.

参考文献:

[1] McCarthy J J, Robinson A R, Rothschild B J. The sea [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002:297-336.

[2] Sun X, Zhang H, Wang Z,etal.Responses of zooplankton community pattern to environmental factors along the salinity gradient in a seagoing river in Tianjin, China [J]. Microorganisms, 2023,11(7):1638.

[3] Rodríguez P, Pizarro H, Vera M S. Size fractionated phytoplankton production in two humic shallow lakes with contrasting coverage of free floating plants [J]. Hydrobiologia, 2012,691:285-298.

[4] Bharathi M D, Sarma V, Ramaneswari K. Intra-annual variations in phytoplankton biomass and its composition in the tropical estuary: Influence of river discharge [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,129 (1):14-25.

[5] Gameiro C, Cartaxana P, Cabrita M T, et al. Variability in chlorophyll and phytoplankton composition in an estuarine system [J]. Hydrobiologia, 2004,525:113-124.

[6] Hillebrand H. Temperature mediates competitive exclusion and diversity in benthic microalgae under different N:P stoichiometry [J]. Ecological Research, 2011,26(3):533-539.

[7] Kiøboe T, Jiang H, Gonçalves R J, et al. Flow disturbances generated by feeding and swimming zooplankton [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014,111(32):11738-11743.

[8] Andersen K H, Berge T, Gonçalves R J, et al. Characteristic sizes of life in the oceans, from bacteria to whales [J]. Annual Review of Marine Science, 2016,8(1):217-241.

[9] Petchey O L, Beckerman A P, Riede J O, et al. Size, foraging, and food web structure [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008,105(11):4191-4196.

[10] Ridgwell A, Zeebe R E. The role of the global carbonate cycle in the regulation and evolution of the Earth system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005,234(3):299-315.

[11] Sarthou G, Timmermans K R, Blain S, et al. Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review [J]. Journal of Sea Research, 2004,53(1):25-42.

[12] Sunda W, Kieber D J, Kiene R P, et al. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algaeb [J]. Nature, 2002,418(6895):317-320.

[13] Sieburth J, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions [J]. Limnology and Oceanography, 1978,23: 1256-1263.

[14] Moreno D V, Marrero J P, Morales J, et al. Phytoplankton functional community structure in Argentinian continental shelf determined by HPLC pigment signatures [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012,100:72-81.

[15] Aiken J, Fishwick J R, Lavender S, et al. Validation of MERIS reflectance and chlorophyll during the BENCAL cruise October 2002: preliminary validation of new demonstration products for phytoplankton functional types and photosynthetic parameters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007,28(3/4):497-516.

[16] 傅明珠,孙 萍,王宗灵,等.黄海冷水团水域浮游植物群落粒级结构的季节变化 [J]. 海洋学报(中文版), 2010,32(1):120-129.
Fu M Z, Sun P, Wang Z L, et al. Seasonal variations of phytoplankton community size structures in the Huanghai(Yellow) Sea cold water mass area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007,28(3/4):497-516.

[17] Agawin N S R, Duarte C M, Agustí S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production [J]. Limnology and Oceanography, 2000,45(3):591-600.

[18] Magazzu G, Decembrini F. Primary production, biomass and abundance of phototrophic picoplankton in the Mediterranean Sea: a review [J]. Aquatic Microbial Ecology, 1995,9(1):97-104.

[19] 李 涛,刘 胜,黄良民,等.广东沿岸不同海洋功能区秋季浮游植物群落结构比较研究 [J]. 海洋通报, 2007,26(2):50-59.
Li T, Liu S, Huang L M, et al. Comparative study on the community structure of phytoplankton in autumn in different oceanic function of zones of Guangdong seacoast [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(2):50-59.

[20] 董燕红,蔡建东,钱宏林.珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系 [J]. 海洋通报, 2009,28(1):3-10.
Dong Y H, Cai J D, Qian H L. Nutrient ratios and its relationship with phytoplankton in the Pearl River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2009,28(1):3-10.

[21] Takahashi M, Bienfang P K. Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters [J]. Marine Biology, 1983,76(2):203-211.

[22] Hallegraeff G M, Jeffrey S W. Tropical phytoplankton species and pigments of continental shelf waters of north and north-west Australia [J]. Marine Ecology Progress Series, 1984,20(1):59-74.

[23] 李佳俊,谭烨辉,周林滨,等.南海东北部贫营养海区营养盐对浮游植物生长的限制 [J]. 海洋通报, 2016,35(5):562-570.
Li J J, Tan Y H, Zhou L B, et al. Effects of nutrients on phytoplankton growth in the oligotrophic waters of north-eastern South China Sea [J]. Marine Science Bulletin, 2016,35(5):562-570.

[24] Mousing E A, Ellegaard M, Richardson K. Global patterns in phytoplankton community size structure—evidence for a direct temperature effect [J]. Marine Ecology Progress Series, 2014,497:25-38.

[25] Bell T, Kalff J. The contribution of picophytoplankton in marine and freshwater systems of different trophic status and depth [J]. Limnology and Oceanography, 2001,46(5):1243-1248.

[26] Contant J, Pick F R. Picophytoplankton during the ice-free season in

five temperate-zone rivers [J]. Journal of Plankton Research, 2013, 35(3):553-565.

[27] Gaulke A K, Wetz M S, Paerl H W. Picophytoplankton: a major contributor to planktonic biomass and primary production in a eutrophic, river-dominated estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010,90(1):45-54.

[28] 宁修仁,沃洛 D.长江口及其毗连东海水域蓝细菌的分布和细胞特性及其环境调节 [J]. 海洋学报(中文版), 1991,13(4):552-559.
Ning X R, Vaulot D. Distribution, cell characters and environmental regulation of cyanobacterum synechococcus in the Yangtze RiverEstuary and the adjacent East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991,13(4):552-559.

[29] 宋书群,孙　军,沈志良,等.三峡库区蓄水后夏季长江口及其邻近水域粒级叶绿素 a [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006,(S1):114-120.
Song S Q, Sun J, Shen Z L, et al. Summer size fractionated chlorophyll-a in the Yangtze Estuary andits adjacent waters after the sluice of the Three-Gorge Dam [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006,(S1):114-120.

[30] Qiu D, Huang L, Zhang J, et al. Phytoplankton dynamics in and near the highly eutrophic Pearl River Estuary, South China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2010,30(2):177-186.

[31] 彭少明,郑小康,王　煜,等.黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化 [J]. 水科学进展, 2017,28(5):681-690.
Peng S M, Zheng X K, Wang Y, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2017,28(5):681-690.

[32] Liu S M. Response of nutrient transports to water–sediment regulation events in the Huanghe basin and its impact on the biogeochemistry of the Bohai [J]. Journal of Marine Systems, 2015,141:59-70.

[33] Li G, Sheng L. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect [J]. Science China Technological Sciences, 2011,54(4):924-930.

[34] 姚庆祯,于志刚,王　婷,等.调水调沙对黄河下游营养盐变化规律的影响 [J]. 环境科学, 2009,30(12):3534-3540.
Yao Q Z, Yu Z G, Wang T,et al. Effect of the first water-sediment regulation on the variations of dissolved inorganic nutrients' concentrations and fluxes in the lower main channel of theYellow River [J]. Environmental Science, 2009,30(12):3534-3540.

[35] Gong Y, Yao Q, Yu Z. Impact of the water-sediment regulation and a rainstorm on nutrient transport in the Huanghe River [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014,32(1):140-147.

[36] Liu S M, Li L W, Zhang G L, et al. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary [J]. Journal of Hydrology, 2012,43:103-110.

[37] 王　英,张晶晶,吕其明,等.调水调沙对黄河口近海浮游植物群落结构时空分布影响 [J]. 海洋环境科学, 2021,40(3):369-378.
Wang Y, Zhang J J, Lü Q M, et al. Effects of water and sediment regulation scheme on phytoplankton community and abundance in the Yellow River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2021,40(3):369-378.

[38] 苏芝娟,王玉珏,董志军,等.调水调沙后黄河口邻近海域浮游植物群落响应特征 [J]. 海洋学报, 2015,37(4):62-75.
Su Z J, Wang Y J, Dong Z J, et al. Response of phytoplankton assemblages to the water-sediment regulation in the adjacent sea of the Yellow River mouth [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015,37(4):62-75.

[39] Zhang J J, Li F, Lv Q, et al. Impact of the water–sediment regulation scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,294(7120):126291.

[40] Roy S, Llewellyn C, Egeland E.S and Johnsen G. Phytoplankton pigments: Characterization, chemotaxonomy and applications in oceanography [J]. Journal of Phycology, 2013,49(1):213-214.

[41] 孙　军,刘东艳,钟　华,等.浮游植物粒级研究方法的比较 [J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003,33(6):917-924.
Sun J, Liu D Y, Zhong H, et al. A comparison of three methods for studying phytoplankton size fraction [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003,33(6):917-924.

[42] 李超伦,栾凤鹤.东海春季真光层分级叶绿素 a 分布特点的初步研究 [J]. 海洋科学, 1998,(4):59-62.
Li C L, Luan F H. A proliminary study on the distribution of size-fractionated chlorophyll-a in the euphotic zone of the East China Sea in spring [J]. Marine Sciences, 1998,(4):59-62.

[43] 黄邦钦,刘　媛,陈纪新,等.东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布 [J]. 海洋学报(中文版), 2006,28(2):156-164.
Huang B Q, Liu Y, Chen J X, et al. Temporal and spatial distribution of size-fractionized phytoplankton biomass in East China Sea and Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006,28(2):156-164.

[44] Vidussi F, Claustre H, Manca B B, et al. Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2001,106(C9):19939-19956.

[45] Uitz J, Claustre H, Morel A, et al. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006,111:C08005.

[46] Wang Y, Liu D, Lee K, et al. Impact of Water-Sediment Regulation Scheme on seasonal and spatial variations of biogeochemical factors in the Yellow River estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017,198:92-105.

[47] GB/T12763.9-2007　海洋调查规范第 9 部分:海洋生态调查指南 [S].
GB/T12763.9-2007　Specifications for oceanographic survey-Part 9: Guidelines for marine ecological survey [S].

[48] Zapata M, Rodríguez F, Garrido J. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8column and pyridine-containing mobile phases [J]. Marine Ecology Progress, 2000,195(3):29-45.

[49] Dortch Q, Packard T T. Differences in biomass structure between oligotrophic and eutrophic marine ecosystems [J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1989,36(2):223-240.

[50] Justić D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995,30(1):41-46.

[51] 孙　珊,苏　博,李　凡,等.调水调沙对黄河口及邻近海域环境状况的影响 [J]. 海洋环境科学, 2019,38(3):399-406.

Sun S, Su B, Li F, et al. Effects of water and sediment discharge regulation on environment in the Yellow River Estuary and adjacent waters [J]. Marine Environmental Science, 2019,38(3):399-406.

[52] Jung H S, Lim D, Kim J H, et al. Intensified intrusion and retention of saltwater in the Sumjin River Estuary, South Korea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2023,290:108381.

[53] Pinckney J L, Knotts E R, Kibler K J, et al. Nutrient breakpoints for estuarine phytoplankton communities [J]. Limnology and Oceanography, 2020,65(12):2999-3016.

[54] Li L, Shen X, Jiang M. Change characteristics of DSi and nutrition structure at the Yangtze River Estuary after Three Gorges Project impounding and their ecological effect [J]. Archives of Environmental Protection, 2017,43(2):74-79.

[55] Nakakuni M, Yamaguchi H, Ichimi K, et al. Seasonal variation in pore water nutrients and their fluxes from the bottom sediments in Harima Nada, Seto Inland Sea [J]. Journal of Oceanography, 2024,80(3):219-232.

[56] 胡 琴,曲 亮,黄必桂,等.2014 年秋季黄河口附近海域营养现状与评价 [J]. 海洋环境科学, 2016,35(5):732-738.
Hu Q, Qu L, Huang B G, et al. Status and evaluation on nutrients for the adjacent sea water of the Yellow River Estuary in autumn of 2014 [J]. Marine Environmental Science, 2016,35(5):732-738.

[57] 董志军,杨 青,孙婷婷,等.黄河口邻近海域浮游动物群落时空变化特征 [J]. 生态学报, 2017,37(2):659-667.
Dong Z J, Yang Q, Sun T T, et al. Spatial and seasonal variability of the zooplankton community in the Yellow River Estuary's adjacent sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(2):659-667.

[58] Goericke R. Top-down control of phytoplankton biomass and community structure in the monsoonal Arabian Sea [J]. Limnology and Oceanography, 2002,47(5):1307-1323.

[59] 吴文广,张继红,刘 毅,等.獐子岛及邻近海域秋季浮游植物的粒级结构及其影响因素 [J]. 生态学报, 2018,38(4):1418-1426.
Wu W G, Zhang J H, Liu Y, et al. Size-fractionated phytoplankton and its influencing factors in autumn near Zhangzidao Island and its adjacent waters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(4):1418-1426.

[60] 孙晓霞,任琳琳,郑 珊,等.2011 年春夏季黄、东海浮游植物粒级结构 [J]. 海洋与湖沼, 2012,43(3):419-428.
Sun X X, Ren L L, Zheng S, et al. Phytoplankton size structure in the Yellow Sea and East China Sea in the spring and summer of 2011 [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2012,43(3):419-428.

[61] 彭 欣,宁修仁,孙 军,等.南海北部浮游植物生长对营养盐的响应 [J]. 生态学报, 2006,26(12):3959-3968.
Peng X,Ning X R, Sun J, et al. Responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments in the northern South China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(12):3959-3968.

[62] Zhou Y, Yang X, Wang Y, et al. Exogenous nutrient inputs restructure phytoplankton community and ecological stoichiometry of Eastern Indian Ocean [J]. Ecological Indicators, 2021,127:107801.

[63] 方 涛,李道季,余立华,等.光照和营养盐磷对微型及微微型浮游植物生长的影响 [J]. 生态学报, 2006,26(9):2783-2790.
Fang T, Li D J, Yu LH, et al. Effect of irradiance and phosphate on growth of nanophytoplankton and picophytoplankton [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(9):2783-2790.

作者简介：张斯瀚(2001-),男,广东省潮州市人,上海海洋大学硕士研究生.主要研究方向为海洋生态学.zsh13539367331@126.com.