

孙绍庆,张晶晶,申瑞婷,等.调水调沙期黄河口邻近海域浮游植物影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3299-3310.

Sun S Q, Zhang J J, Shen R T, et al. Study on the dominant control effects on phytoplankton biomass in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River during the water and sediment regulation scheme [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3299-3310.

调水调沙期黄河口邻近海域浮游植物影响因素

孙绍庆¹,张晶晶^{1*},申瑞婷²,张孝民³,李凡³,吕振波¹ (1.鲁东大学滨海生态高等研究院,山东烟台 264025; 2.中国中交水运规划设计院,北京 100007; 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)

摘要: 为研究黄河调水调沙期间河口及其邻近海域浮游植物现存量的上、下行效应的相对重要性,利用 R2V 软件提取 2011~2020 年黄河口及其邻近海域中叶绿素 a(Chl a)浓度、环境因子和浮游动物丰度的历史文献数据,分析了 Chl a 浓度的空间分布和年际变化特征,并构建不同调水调沙阶段 Chl a 与环境生物因子的回归树模型.结果显示:2011~2020 年,调水调沙前黄河口及其邻近海域 Chl a 浓度整体呈现自河口至离岸逐渐降低的趋势,随着调水调沙进行,Chl a 高值区逐渐向河口西北部近岸转移,Chl a 浓度年际变化显著的区域基本与各阶段 Chl a 高值区重合.回归树模型显示随着调水调沙进行 Chl a 主要控制作用发生了转变.调水调沙前,浮游动物摄食的下行效应是驱动 Chl a 浓度空间变化的主控因素.调水调沙期间,Chl a 浓度主要受上行效应控制,前期,温度是主要驱动因子;后期 DIP 是主要驱动因子.调水调沙期间径流量引起的盐度锋面的变化可能是 Chl a 主要控制作用变化的重要诱因.

关键词: 黄河口; 调水调沙; 上、下行效应; 浮游植物; 环境因素

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3299-12

Study on the dominant control effects on phytoplankton biomass in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River during the water and sediment regulation scheme. SUN Shao-qing¹, ZHANG Jing-jing^{1*}, SHEN Rui-ting², ZHANG Xiao-min³, LI Fan³, LV Zhen-bo¹ (1.The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China; 2.China Communications construction Water Transportation Consultants Co., Ltd, Beijing 100007, China; 3.Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3299-3310

Abstract: To investigate the relative importance of the bottom-up versus top-down on phytoplankton biomass in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River during the water and sediment regulation scheme (WSRS), the study utilized R2V software to extract historical data (2011~2020) on chlorophyll a (Chl a) concentration, environmental factors, and zooplankton abundance in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from the literature. The spatial distribution and interannual variation of Chl a concentration was analyzed, and regression tree models Chl a with environmental and biological factors at different stages of WSRS were developed to explore the controlling factors. The results showed that Chl a concentrations in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River generally decreased from the estuary towards offshore areas from 2011 to 2020. As WSRS progressed, the high-value areas gradually shifted to the nearshore northwest of the estuary. Regions with significant interannual variations in Chl a concentrations largely overlapped with high-value areas at each stage. The regression tree model indicated that, with the progression of water and sediment regulation, there was a notable shift in the dominant effects on Chl a concentration. Before WSRS, the top-down effect of zooplankton grazing was the primary driver of Chl a spatial variability. During the water and sediment regulation period, Chl a concentration was mainly controlled by bottom-up effects. In the early WSRS, temperature was the primary driving factor, while in the later stage of WSRS, dissolved inorganic phosphorus (DIP) became the main driving factor. The changes in salinity fronts caused by freshwater flow during WSRS may be an important factor inducing changes in the dominant effects on Chl a concentration.

Key words: Yellow River Estuary; water and sediment regulation scheme; the bottom-up versus top-down control; phytoplankton; environmental factors

河口是河流-海洋的过渡地带,具有极重要的生态功能^[1].近半个世纪以来,由于河流径流量的持续减少和陆源营养物质的不断增多,全球大多数河口呈现不同程度高营养负荷现象^[2-3],导致河口及其邻

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(42306163,42201061); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD079);山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QD093)

* 责任作者,副教授, hpj2006@ldu.edu.cn

近海域有害藻华持续高频次爆发^[4].河口浮游植物变化规律及其驱动机制研究,对于藻华早期预警和防控意义重大^[5].黄河口及其邻近海域是渤海最重要的产卵场^[6],也是黄河流域高质量发展国家战略重点保护的生态环境区^[7].近年来,黄河口及其邻近海域藻华呈逐年上升趋势,虽然其爆发频次和规模仍低于长江口、珠江口和渤海其他海域,但极大危害了渤海渔业资源可持续发展^[8-9].黄河口及其邻近海域的藻华具有明显季节性,径流输入较多的夏季是藻华高发期^[9].夏季亦是黄河实施调水调沙,冲刷下游河道泥沙淤积的时间^[10].调水调沙期间,黄河径流量在短时间内激增^[11],超过 60%的年输沙量和 50%的年营养盐通量伴随径流输送到河口^[12],显著影响浮游植物高值区时空分布^[13].

叶绿素 a(Chl a)浓度往往与浮游植物生物量呈现显著的正相关性^[14],因此 Chl a 浓度在生态学中常常用于指示浮游植物生物量^[15].河口浮游植物生物量通常通过 Chl a 浓度来表征,且主要受到环境因子的上行控制(Bottom-up control)和摄食者引起的下行控制(Top-down control)的影响^[16-18].上行效应指浮游植物的生长受温度、营养盐水平和光照等环境条件影响;下行效应主要是指浮游动物通过摄食作用影响浮游植物生物量累积,浮游动物选择性摄食则会改变浮游植物群落结构^[19-20].

目前,针对黄河口浮游植物的研究主要针对上行控制开展^[21-24].目前普遍认为调水调沙携带的大量营养物质^[12]、泥沙引起的光照可利用率的降低^[23,25]和强烈湍流引起的藻细胞的损伤是影响 Chl a 浓度的主要原因.下行效应是调控浮游植物群落另一个决定因素,在许多沿海生态系统中,超过 80%的日初级生产力是被浮游动物捕食消耗^[26].调水调沙期间也是浮游动物大量繁殖的时间^[27],但下行控制对黄河口浮游植物的影响一直以来却鲜有研究.黄河调水调沙驱动河口浮游植物的主要影响因素尚不清楚,且先前的研究多针对特定年份开展,受随机因素影响较大.

鉴于此,本研究利用高级光栅图像矢量化软件 Raster2Vector 提取 2011~2020 年黄河口及其邻近海域文献资料的环境、浮游动物和 Chl a 数据,分析了黄河调水调沙期间黄河口及其邻近海域环境因子、浮游动物和 Chl a 的时空分布特征;并构建回归树模型,明确调水调沙时期河口 Chl a 的影响因素及其关键驱动因子,旨在阐释浮游植物响应调水调沙的内在规律,为河口高营养海域赤潮预防和生态环境保护提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 数据资料收集

表 1 2011~2020 年黄河口及其邻近海域历史观测数据调查时间及来源

Table 1 Historical observation data and sources in the waters adjacent in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River during 2011 to 2020

年份	调水调沙前						调水调沙前期						调水调沙后期						来源				
	T	S	DIN	DIP	DSi	Chl a	ZA	T	S	DIN	DIP	DSi	Chl a	ZA	T	S	DIN	DIP		DSi	Chl a	ZA	
2011	6	6	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	[28-29]
2012	6	6	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	[28-29]
2013	6	6	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6	6	-	7	7	7	7	7	7	7	7	[23,28]
2014	6	6	6	6	6	6	6	-	7	7	7	7	-	-	-	7	-	-	-	-	-	7	[28-29]
2015	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	[28,30]
2018	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	[13,28,31]
2019	-	-	-	-	-	6	6	-	7	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	7	[28,32]
2020	6	6	-	-	-	6	6	7	7	-	-	-	7	-	7	7	-	-	-	7	7	7	[28,33]

注:T表示温度,°C、S表示盐度、DIN表示可溶性无机氮浓度,μmol/L、DIP表示可溶性无机磷浓度,μmol/L、DSi表示可溶性硅酸盐浓度,μmol/L、Chl a,μg/L、ZA表示浮游动物丰度,ind/m³,数字代表数据调查的月份,-表示未收集到历史观测数据.

黄河调水调沙是通过水库联合调度的方式进行,黄河干流小浪底水库水沙流量能够较好反映调

水调沙开始结束时间,调水调沙开始小浪底水库径流会突然由小于 1000m³/s 升高至 2000~4000m³/s,

并一直维持至调水调沙结束,小浪底的水沙大约经过 3~4d 到达距河口最近的利津水文站,利津站的水沙流量通常略低于小浪底.根据黄河网(<http://www.yrcc.gov.cn/>)2010~2020 年小浪底水库水沙日变化数据进行分析确定了调水调沙的起始时间.根据距河口最近的利津站水沙日变化数据,结合 Zhang 等^[13]对调水调沙期间径流量与输沙量变化规律的研究结果,发现调水调沙存在三个明显的过程:调水调沙前,黄河口水沙流量表现为径流量小、输沙量小(径流量通常 $<1000\text{m}^3/\text{s}$ 、输沙量 $<5\text{kg}/\text{m}^3$);调水调沙前期,径流量大、输沙量小(径流量 $>2000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $5\text{kg}/\text{m}^3<$ 输沙量 $<10\text{kg}/\text{m}^3$);调水调沙后期径流量大、输沙量大(径流量 $>2000\text{m}^3/\text{s}$ 、输沙量 $>10\text{kg}/\text{m}^3$)的特点.根据这个时期水沙流量的特征,将调水调沙过程分为 3 个时期:调水调沙前,调水调沙前期和调水调沙后期.分别收集黄河口及其邻近海域 2011~2020 年调水调沙前和调水调沙前期、调水调沙后期环境因子、浮游动物和 Chl a 的历史观测数据,数据来源见表 1.历史数据内容主要包括:温度、盐度、可溶无机氮(DIN)浓度、可溶无机磷(DIP)浓度、硅酸盐(DSi)浓度、Chl a 浓度、浮游动物丰度.

1.2 数据提取

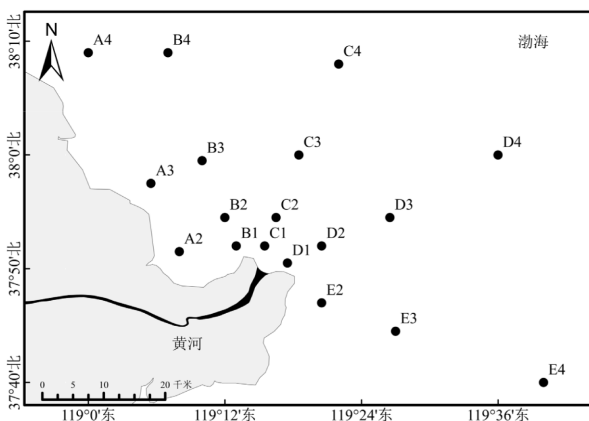


图 1 历史数据提取点位

Fig.1 Extraction sites of historical data

利用高级光栅图像矢量化软件 Raster2Vector 5.x(R2V)和 ArcMap 程序提取历史文献资料的水文、环境因子和浮游生物数据.首先,用 R2V 软件数字化文献中的实测站点的经纬度信息,再将文献中对应的环境数据和浮游生物数据的等值线图数字化,得

到每条等值线的经纬度及对应的数值.然后,利用 ArcMap 按照辐射状站位布设法于黄河口区域布设历史数据提取点位(图 1),将数字化后的等值线上的数值进行空间插值到点位,以此获得历史文献详细数值,将坐标信息及点位上的环境和生物数据提取至 Excel 表格中.最后,将得到的点位数据重新绘成等值线图与原图进行对比验证,以减少数字化过程所造成的误差.

利用 Surfer 15 软件绘制黄河口及其邻近海域 2010~2020 年环境因子、Chl a 和浮游动物丰度均值和标准差的等值线图.

1.3 统计分析

由于生态调查数据常常呈现非线性动力系统的特征^[34-35],采用线性方法分析研究变量之间的因果关系,可能因为变量共享行列式而产生假阳性的结果;也可能由于变量之间相关性不显著忽略重要因果关系而产生假阴性结果,使识别上行、下行控制带来困难^[36-37].本文利用非线性回归树分析来评估分析黄河口及其邻近海域浮游植物上、下行效应的相对重要性^[38].

利用 RStudio 软件 rpart 包构建回归树.首先,对环境因子和浮游动物丰度数据进行 Spearman 相关性分析,剔除存在较强相关性的因子($|\rho|>0.5$),确保最终选定的驱动因子之间没有显著相关性($|\rho|<0.5$),避免影响回归树分析的准确性.然后对筛选出的不符合正态分布的驱动因子进行 $\lg(x+1)$ 转换,以转换后的环境因子和浮游动物丰度分别作为指示上、下行效应驱动因子,以 Chl a(指示浮游植物生物量)作为响应变量,对调水调沙前、调水调沙前期、调水调沙后期分别进行回归树分析,回归树的根节点处第一次分裂的因子,对数据集的划分影响最大,为驱动因子,其所属的效应(上行或下行)为影响因素.调水调沙不同阶段环境因子、浮游动物、Chl a 差异性利用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行分析.

2 结果与分析

2.1 环境因子时空分布特征

2.1.1 温度、盐度 2011~2020 年,调水调沙期间存在一个明显的升温过程.调水调沙前,黄河口及其邻近海域表层水温范围为 $15.91\sim 25.20^\circ\text{C}$,平均值为

(20.90±1.96)°C(表 2),整体呈现由南向北递减的趋势,多年均值高值区出现在黄河口南部(图 2(a));黄河口以北 10~12km 处年际变化较为明显(图 2(b)).调水调沙前期,黄河口表层水温范围为 19.36~27.8°C,平均值为(22.92±1.85)°C(表 2),整体呈现由东南向西北梯度递减,高值出现在黄河口东南部(图 2(c));黄河口以

西 5~10km 处年际变化较为明显(图 2(d)).调水调沙后期,表层水温范围为 20.20~30.50°C,平均值为(25.04±2.57)°C(表 2),温度空间变化趋势与调水调沙前期类似,整体呈现由南向北递减的趋势,高值区出现在黄河口东南部(图 2(e));年际变化较调水调沙前、调水调沙前期更明显(图 2(f)).

表 2 2011~2020 年黄河调水调沙不同阶段河口及其邻近海域环境因子、Chl a 浓度、浮游动物丰度范围和平均值(±标准差)
Table 2 Environmental factors, Chl a concentration, and zooplankton abundance range and mean values (± sd) of different WSRS stages in the adjacent sea area of the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from 2011 to 2020

参数	调水调沙前		调水调沙前期		调水调沙后期		One-way ANOVA	
	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	F	P
温度(°C)	15.91~25.20	20.90±1.96	19.36~27.8	22.92±1.85	20.20~30.50	25.04±2.57	88.06	<0.001
盐度	5.65~33.96	28.02±4.56	4.31~32.61	25.36±5.29	5.98~32.26	25.00±5.36	10.90	<0.001
DIN (μmol/L)	8.61~54.48	28.94±12.39	1.95~65.96	28.44±13.72	4.94~66.95	29.00±13.35	0.03	0.97
DIP(μmol/L)	0.04~0.35	0.18±0.09	0.02~0.29	0.12±0.07	0.02~0.43	0.14±0.08	9.70	<0.001
DSi (μmol/L)	0.86~35.61	14.20±8.37	1.73~42.57	17.24±10.33	5.27~91.46	27.78±20.18	13.83	<0.001
Chl a (μg/L)	0.39~13.6	3.06±2.18	0.62~11.21	3.50±1.85	0.88~13.66	4.76±3.07	12.35	<0.001
浮游动物丰度(ind/m ³)	1.77~1432.03	152.78±157.60	5.21~539.12	118.63±111.89	1.23~364.54	44.62±56.72	20.09	<0.001

2011~2020 年,调水调沙前,表层盐度范围介于 5.65~33.96 之间,平均值为(28.02±4.56)(表 2),低值区主要位于黄河口北部 5~10km 海域(图 2(g));年际变化较明显区域位于黄河口北部,与盐度低值区基本重合(图 2(h)).调水调沙前期,表层盐度明显降低,范围为 4.31~32.61,平均值为(25.36±5.29)(表 2),河口周围海域盐度整体降低,低盐区范围明显扩大(图 2(i));黄河口区域年际变化与调水调沙前类似(图 2(j)).调水调沙后期,表层盐度范围为 5.98~32.26,平均值为(25.00±5.36)(表 2),河口低盐区范围进一步扩大(图 2(k));黄河口年际变化较为明显的区域范围较调水调沙前、调水调沙前期明显扩大,扩展至莱州湾一侧海域(图 2(l)).

2.1.2 营养盐 2011~2020 年,黄河口及其邻近海域整体呈现高氮硅低磷的特征.调水调沙前 DIN 范围为 8.61~54.48μmol/L,平均值为(28.94 ± 12.39) μmol/L(表 2),整体呈现自河口至离岸逐渐减小的趋势(图 3(a));黄河口至莱州湾海域年际变化较为明显(图 3(b)).调水调沙前期 DIN 范围为 1.95~65.96μmol/L,平均值升至(28.44 ± 13.72) μmol/L(表 2),高值区位于河口以北 2~5km(图 3(c));年际变化于黄河口西部沿岸海域较为明显(图 3(d)).调水调沙后期 DIN 明显升高,范围为 4.94~66.95μmol/L,平均值升至(29.00 ±

13.35) μmol/L(表 2),高值区向河口西南部转移(图 3(e));年际变化明显的区域缩小,集中在河口附近(图 3(f)).2011~2020 年,调水调沙前,DIP 范围为 0.04~0.35μmol/L,平均值为(0.18 ± 0.09) μmol/L(表 2),高值区位于黄河口至西北部约 25km 海域内大片海域(图 3(g));黄河口西北部沿岸海域年际变化较为明显(图 3(h)).调水调沙前期,DIP 浓度明显降低((0.12 ± 0.07) μmol/L,表 2),高值区向入海口附近收缩(图 3(i));黄河口东侧近岸海域年际变化较为明显(图 3(j)).调水调沙后期,DIP 范围为 0.02~0.43μmol/L,平均值略有回升,为(0.14 ± 0.08) μmol/L(表 2),高值区再次扩展至黄河口近岸海域(图 3(k));黄河口西侧近岸海域年际变化较为明显(图 3(l)).

与 DIN 和 DIP 不同,2011~2020 年调水调沙不同阶段 DSi 高值区均在口门附近.年际变化较为明显的区域主要出现在调水调沙后期河口附近(图 3(m~r)).调水调沙前,DSi 范围为 0.86~35.61μmol/L,平均值为(14.20 ± 8.37) μmol/L.调水调沙前期,DSi 出现小幅升高,范围为 1.73~42.57μmol/L,平均值为(17.24 ± 10.33) μmol/L.调水调沙后期,DSi 显著升高,平均值为(27.78 ± 20.18) μmol/L,大约是调水调沙前的 2 倍,是调水调沙前期的 1.6 倍(表 2).

2.2 浮游动物丰度的时空分布特征

2011~2020 年,随着调水调沙进行,黄河口及其邻近海域浮游动物丰度整体呈现下降的趋势.调水调沙前浮游动物丰度变化范围为 1.77~1432.03ind/m³,平均值为(152.78±157.60) ind/m³(表 2),高值区位于黄河口及西北部约 5~10km 海域(图 4(a));此处年际变化也较明显(图 4(b)).调水调沙前期,浮游动物丰度小幅降低,变化范围为 5.21~539.12ind/m³,平均

值为(118.63±111.89) ind/m³(表 2),高值区位于黄河口以西 10~20km 近岸海域(图 4(c));年际变化较明显区域位于口门西部近岸海域(图 4(d)).调水调沙后期,浮游动物丰度明显降低,变化范围为 1.23~364.54ind/m³,平均值为(44.62±56.72) ind/m³(表 2),高值区位于口门西部近岸海域(图 4(e));与年际变化较明显区域基本重合(图 4(f)).

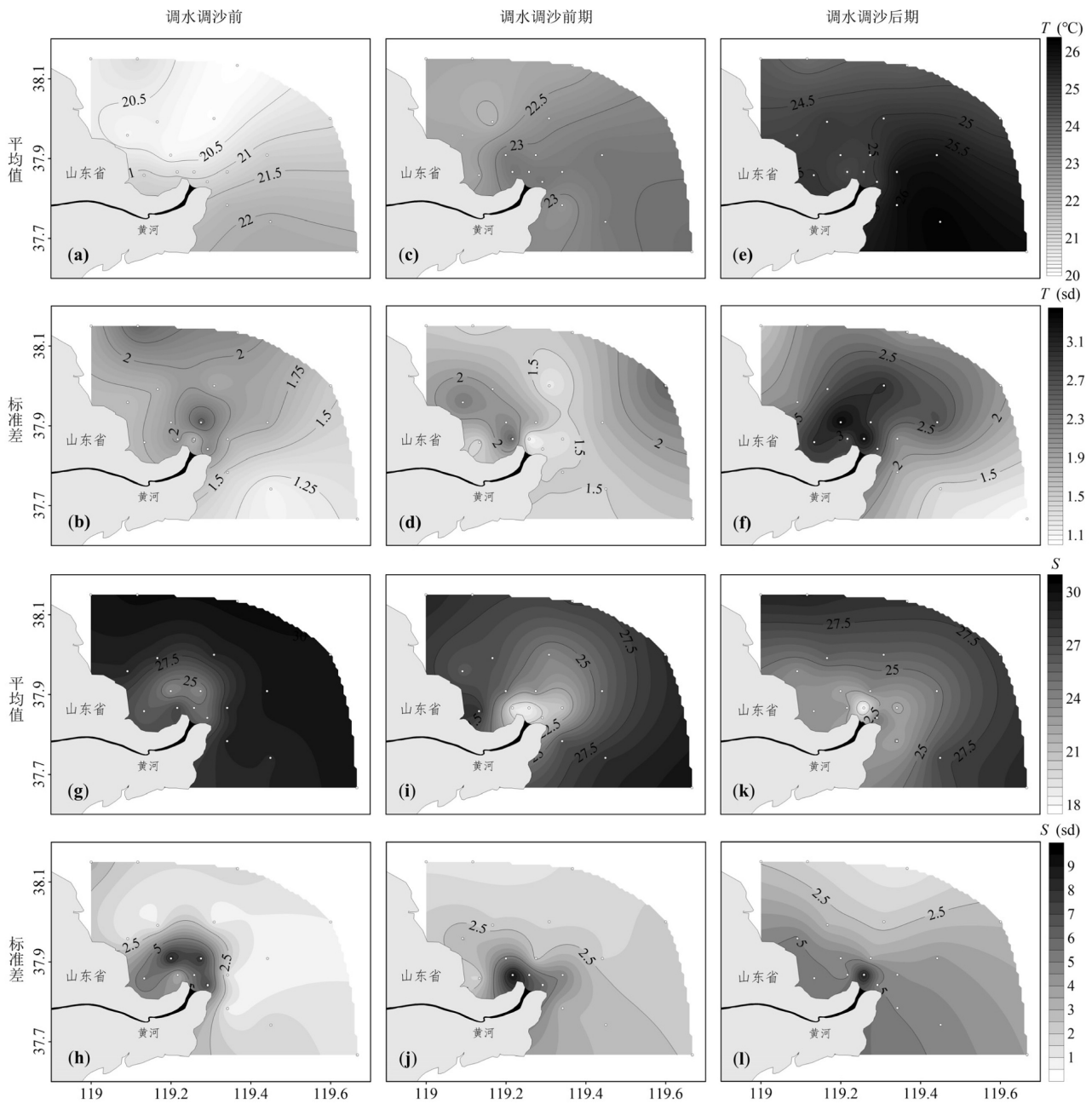


图 2 2011~2020 年黄河口及其邻近海域温度(T)、盐度(S)时空分布

Fig.2 Spatial and temporal distribution of temperature (T) and salinity (S) in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from 2011 to 2020

横标目表示经度,°E;纵标目表示纬度,°N,下同

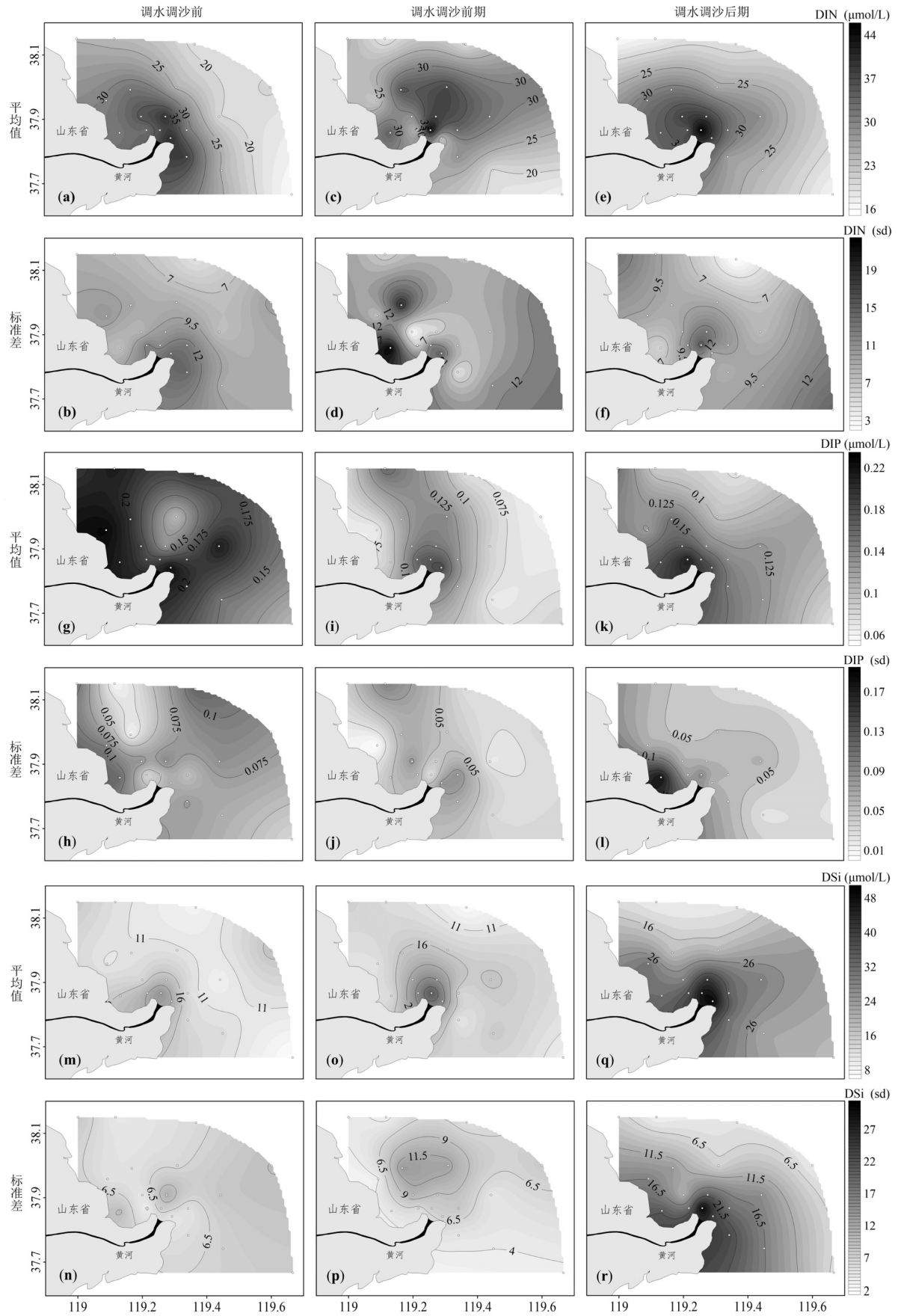


图3 2011~2020年黄河口及其邻近海域营养盐时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of nutrients in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from 2011 to 2020

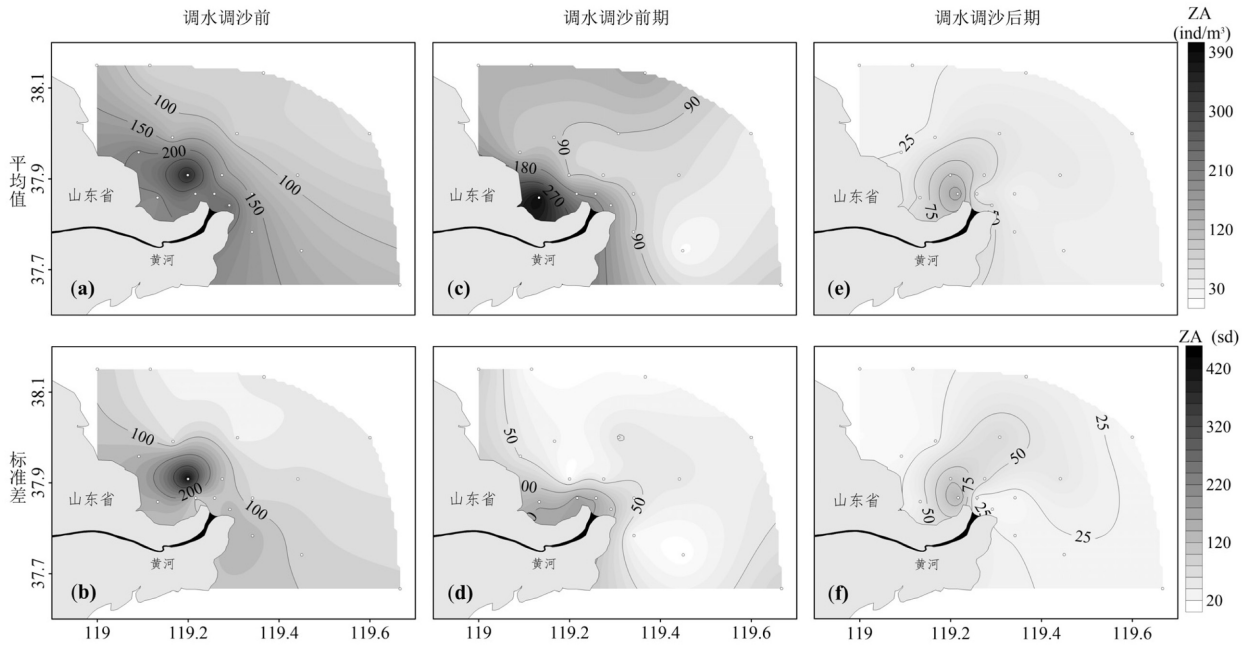


图 4 2011~2020 年黄河口及其邻近海域浮游动物丰度(ZA)时空分布

Fig.4 Spatial and temporal distribution of zooplankton abundance (ZA) in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from 2011 to 2020

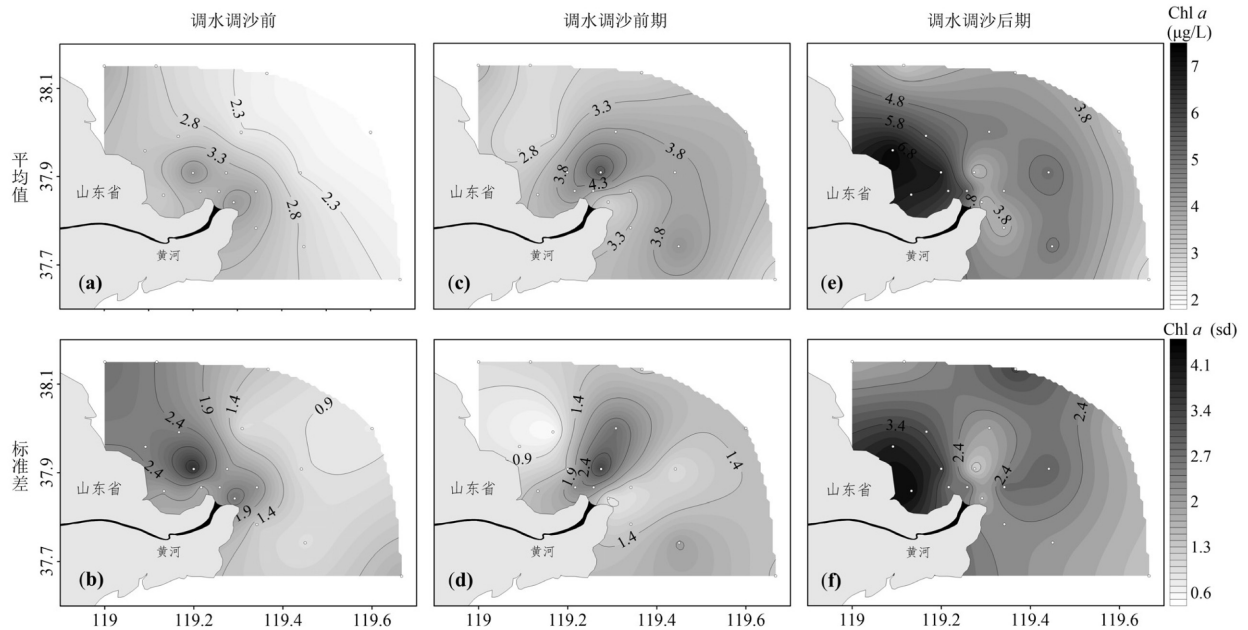


图 5 2011~2020 年黄河口及其邻近海域 Chl a 时空分布

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of Chl a in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River from 2011 to 2020

2.3 Chl a 的时空分布特征

与浮游动物丰度相反,2011~2020 年,黄河口及其邻近海域 Chl a 浓度整体呈现随着调水调沙进行升高的趋势.调水调沙前,Chl a 浓度范围为 0.39~13.6 $\mu\text{g/L}$,平均值为(3.06 \pm 2.18) $\mu\text{g/L}$ (表 2),高值区位于河口附近海域(图 5(a));河口西北部约 10km 海域

年际变化较明显(图 5(b)).调水调沙前期,Chl a 浓度小幅升高,变化范围为 0.62~11.21 $\mu\text{g/L}$,平均值为(3.50 \pm 1.85) $\mu\text{g/L}$ (表 2),高值区位于黄河口北部 8~12km 海域(图 5(c));同时该区域年际变化也较明显(图 5(d)).调水调沙后期,Chl a 浓度明显升高,变化范围为 0.88~13.66 $\mu\text{g/L}$,平均值为(4.76 \pm 3.07) $\mu\text{g/L}$ (表

2),高值区范围较调水调沙前、调水调沙前期显著扩大,位于黄河口西北部近岸海域(图 5(e));同时该区域年际变化也较明显(图 5(f)).

2.4 回归树分析

2.4.1 相关性分析 环境因子和生物因子进行 Spearman 相关性分析显示,调水调沙前,DIN 与盐度呈现强负相关($\rho=-0.71$),与浮游动物丰度呈现强正相关关系($\rho=0.54$),温度与浮游动物丰度呈现强负相关关系($\rho=-0.53$).调水调沙前期,DSi 与盐度呈强负相关($\rho=-0.65$).调水调沙后期,温度与 DIP 呈现强正

相关($\rho=0.52$),盐度与 DSi 和 DIN 呈现强负相关($\rho=-0.71,-0.83$),DIN 与 DSi 呈现强正相关($\rho=0.75$) (表 3).为避免共线性影响回归树模型分析的准确性,构建模型时剔除部分显著相关的因子.最终,调水调沙前保留盐度、DIP、DSi 代表环境上行效应,浮游动物丰度代表下行效应;调水调沙前期保留温度、盐度、DIN、DIP 代表环境上行效应,浮游动物丰度代表下行效应;调水调沙后期,保留 DIP、DSi 代表环境上行效应,浮游动物丰度代表下行效应,分别构建回归树模型.

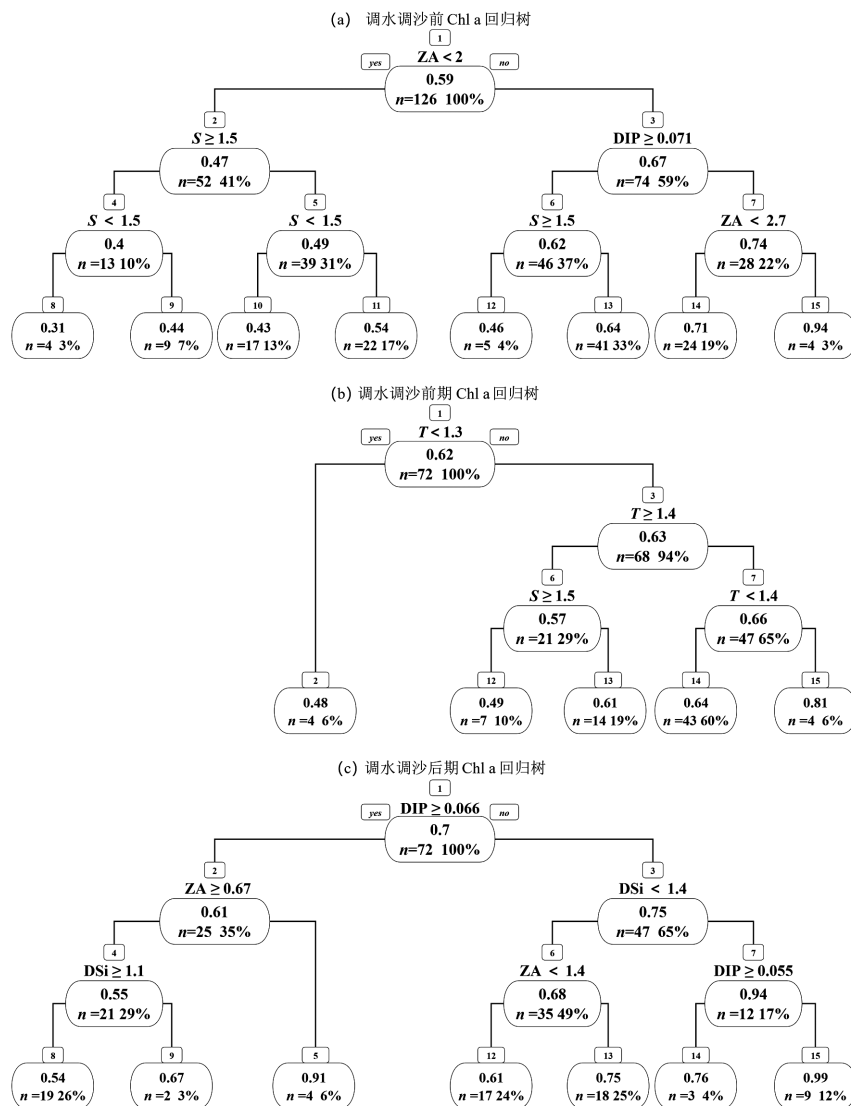


图 6 调水调沙不同阶段黄河口及其邻近海域 Chl a 回归树分析

Fig.6 Regression tree analysis of Chl a at different WSR stages in the estuary and its adjacent waters of the Yellow River

T-温度; S-盐度; DIN-可溶性无机氮; DIP-可溶性无机磷; ZA-浮游动物丰度

2.4.2 回归树模型 如图 6 所示,调水调沙前,回归树模型以浮游动物丰度为根节点(阈值为 2),表明浮

游动物丰度是该回归树模型的主要驱动因素,即调水调沙前浮游动物摄食下行效应是驱动 Chl a 浓度

变化的控制因素(图 6(a)).调水调沙前期,回归树以温度为根节点(阈值为 1.3),表明温度是影响该回归树模型的主要驱动因素,即调水调沙前期环境上行效应是驱动 Chl a 浓度变化的控制因素(图 6(b)).调水调沙后期,回归树以 DIP 为根节点(阈值为 0.066),表明 DIP 是影响该回归树模型的主要驱动因素,由于 DIP 与温度呈现强相关关系,因此温度可能也是调水调沙后影响 Chl a 分布的重要因素.说明调水调沙后,环境上行效应是驱动 Chl a 浓度的控制因素(图 6(c)).

表 3 环境因子、Chl a、浮游动物间 Spearman 相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficients among environmental factors, Chl a, and zooplankton abundance

时段	参数	T	S	DIN	DIP	DSi	ZA
调水调沙前	T	1.00					
	S	0.17	1.00				
	DIP	0.33	-0.08	1.00			
	DSi	0.35	-0.11	0.11	1.00		
	DIN	-0.40	-0.71	0.18	0.07	1.00	
	ZA	-0.53	-0.47	-0.24	-0.03	0.54	1.00
调水调沙前期	T	1.00					
	S	-0.08	1.00				
	DIP	0.28	-0.28	1.00			
	DSi	0.16	-0.65	0.25	1.00		
	DIN	-0.27	-0.43	-0.07	0.35	1.00	
	ZA	0.13	-0.22	0.31	-0.18	0.17	1.00
调水调沙后期	T	1.00					
	S	-0.30	1.00				
	DIP	0.52	-0.33	1.00			
	DSi	0.33	-0.71	0.46	1.00		
	DIN	0.08	-0.83	0.12	0.75	1.00	
	ZA	-0.21	-0.31	-0.12	0.31	0.47	1.00

3 讨论

3.1 调水调沙期间 Chl a 上、下控制的相对重要性

本研究发现,随着调水调沙进行,Chl a 浓度整体呈现缓慢升高的趋势,这与先前调水调沙期间 Chl a 略高于调水调沙前,但并未出现明显藻类暴发的研究结果类似^[23].与 Chl a 相反,随着调水调沙进行,浮游动物生物量逐渐降低至调水调沙后期,浮游动物生物量不足调水调沙前的 30%.回归树模型显示,调水调沙期间,Chl a 上、下控制的相对重要性是动态变化的.调水调沙前,Chl a 浓度主要受浮游动物捕食的下行效应控制,这证实了下行效应在湿季调控河口浮游植物丰度中起着重要作用^[13,20].这可能是由

于调水调沙前,温度较适宜于浮游动物生长,高营养盐水团团聚在河口附近区域,促进了河口浮游植物的生长^[39],为浮游动物的繁殖提供了充足食物,而盐度梯度限制了大多数物种的迁移^[40-42],因此,浮游动物集聚在低盐度区域,反过来影响浮游植物的存量.调水调沙期间,Chl a 浓度由下行效应主控转变为上行效应主控.这可能是由于大量淡水在短时间内涌入河口,研究区域盐度显著降低,浮游动物对盐度敏感^[43-44],无法在短期内适应盐度的快速变化,丰度降低,对浮游植物的控制作用逐渐减弱^[45].这与姜会超等研究发现的浮游动物丰度与盐度存在明显正相关关系的结果一致^[46].

尽管调水调沙期间,浮游植物主要受上行效应控制,但不同水沙条件下,驱动 Chl a 浓度变化的主要环境因子不同.在径流量大、输沙量较少的前期,温度是驱动河口 Chl a 浓度变化的主要因子,这可能是由于径流量增大使营养物质可以扩散到距河口更远的区域,而输沙量较小没有使大范围内水体浊度升高,因此,黄河口附近营养物质和光照充足条件下,温度升高有利于浮游植物增长^[25,47].这说明调水调沙虽然并未直接影响温度这一主控因子,但通过改善黄河口及其邻近海域浮游植物的营养环境,间接地增强了温度升高对浮游植物生长的促进作用.但该阶段,浮游动物生物量仍在较高水平,因此,Chl a 浓度升高的程度有限.在径流量高,输沙量高的后期,DIP 是驱动调水调沙后期浮游植物生长的主要因素,这与王英等^[30]研究发现的 DIP 是调水调沙后限制浮游植物生长的主要因素之一的结果一致.这可能是由于后期浮游动物迅速下降,捕食压力减小,浮游植物迅速生长消耗了大量 DIP,而 DIP 浓度在整个渤海海域偏低,因此 DIP 成为 Chl a 的限制因素.

3.2 黄河调水调沙驱动河口浮游植物变化的机制

近年来,国内外许多学者就黄河调水调沙驱动河口浮游植物变化的机制提出了假设.Liu^[12]认为,调水调沙期间从黄河输入的大量营养物质能够弥补浮游植物春季峰消耗的营养物质,促使夏季浮游植物迅速生长,导致浮游植物秋季峰提前,大量淡水的输入将会增加河口区域淡水藻的比例^[22].随后的研究发现,黄河口海域 Chl a 的季节变化与邻近受调水调沙影响较小的莱州湾和渤海中部相似,Chl a 峰

值仍出现在 9 月,而不是 6 月和 7 月(调水调沙期间)^[23].Wang 等^[23]和 Song 等^[48]认为,调水调沙期间,水体浑浊度增加引起的光照可利用性降低和强烈的水体湍流对藻类细胞的机械损伤等上行效应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^[13]首次提出,黄河调水调沙会诱导浮游动物短暂的快速增殖,其摄食的下行效应可能使浮游植物丰度远小于未调水调沙年份.

本研究发现 Chl a 主要控制作用是动态变化的,很难用单一的作用解释黄河口浮游植物变化.但是,在调水调沙不同阶段,盐度与营养盐均呈现显著的相关关系(表 3),并且与主要营养盐、浮游动物丰度和 Chl a 浓度的分布存在空间对应关系.此外,尽管盐度不是调水调沙各阶段回归树模型根节点的因子,但是在调水调沙前和调水调沙前期,盐度 $S \geq 1.5$ (盐度对数转换后,图 6(a)、(b))均是重要的次分裂节点,说明不同盐度水体 Chl a 含量有明显差异.这表明调水调沙期间,黄河径流变化引起的盐度羽状锋面变化可能是驱动黄河口主要控制作用变化的重要诱因.一方面,盐度锋面处浮游植物处水团辐聚过程可以促进浮游植物聚集,有利于藻类高值区的形成^[49-50].调水调沙前,盐度锋面主要位于河口附近,盐度锋面处水团辐聚过程使低盐高营养的水团主要聚集在河口^[49-50],促进了河口浮游植物的生长^[12,39],Chl a 高值区主要聚集在河口.浮游植物大量繁殖为浮游动物的繁殖提供了足够的食物,锋面限制了浮游动物的迁移^[40-42].因此,浮游动物在河口低盐区迅速繁殖并聚集,反过来影响河口浮游植物存量,河口呈现下行控制主导.另一方面盐度锋面能够通过影响环境因子的时空分布,间接影响浮游植物及其摄食者生长繁殖和浮游植物群落结构分布格局.例如,调水调沙前期,河口径流激增,淡水大量涌入河口,盐度锋面向外海扩展,大量的养分随着羽状峰向外输送,改善了浮游植物的营养环境,Chl a 高值区随着羽状峰逐渐从河口向外海移动.此外,河口及其邻近海域盐度进一步降低,浮游动物很难迅速适应羽状锋面变化引起的河口附近强烈的盐度变化^[41,51],高值区退缩至北部近岸盐度变化较小的海湾处(图 4c、e),调查区域总体捕食压力减小,浮游植物由下行控制转为上行控制.

综上,浮游植物生物量的变化受多种环境因子共同影响,且浮游植物主要控制作用是动态变化的,不同年份、不同采样时间点、河口不同区域浮游植物主要控制作用可能存在较大差别.由于历史数据中,可供提取的总悬浮物数据较少,本研究对可利用光对河口浮游植物分布的影响未进行深入研究.此外,浮游植物群落分布会迅速响应河口水团性质的变化,而总生物量变化往往滞后^[52].因此,黄河调水调沙对近海浮游植物丰度及其群落结构影响及其调控机制仍有待进一步研究.

4 结论

4.1 调水调沙输入大量高氮硅低磷的淡水,会使河口盐度明显降低,营养盐含量明显升高,盐度与营养盐、浮游动物生物量和 Chl a 浓度的分布存在空间对应关系.

4.2 随着调水调沙进行 Chl a 浓度缓慢升高,调水调沙前,Chl a 高值区主要集聚在河口;调水调沙前期,Chl a 高值区逐渐向外海扩散;调水调沙后期,河口附近 Chl a 显著降低,高值区移至河口西北部近岸海域.

4.3 回归树模型显示,随着调水调沙进行,Chl a 浓度的主要控制作用和驱动因子发生了变化.调水调沙前,Chl a 主要受下行效应控制,浮游动物生物量是主要驱动因子.调水调沙期间,Chl a 浓度主要受上行效应控制,前期,温度是主要驱动因子;后期 DIP 是主要驱动因子.

4.4 黄河径流变化引起的盐度羽状锋面变化可能是驱动黄河口主要控制作用变化的一个重要诱因.

参考文献:

- [1] Meybeck M. The global change of continental aquatic systems: dominant impacts of human activities [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49(7):73-83.
- [2] Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, et al. Global river nutrient export: a scenario analysis of past and future trends [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010,24(4):GB0A08.
- [3] Bertone E, Sahin O, Richards R, et al. Extreme events, water quality and health: a participatory Bayesian risk assessment tool for managers of reservoirs [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,135:657-667.
- [4] Chen Y R, Cheng W C, Zhang H, et al. Evaluation of the total maximum allocated load of dissolved inorganic nitrogen using a watershed-coastal ocean coupled model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,673:734-749.

- [5] Tao W, Niu L X, Liu F, et al. Influence of river-tide dynamics on phytoplankton variability and their ecological implications in two Chinese tropical estuaries [J]. *Ecological Indicators*, 2020,115.
- [6] Jin X S, Shan X J, Li X S, et al. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China [J]. *Science China-Earth Sciences*, 2013,56(3):366-374.
- [7] 牛玉国,王煜,李永强,等. 黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障布局 and 措施研究 [J]. *人民黄河*, 2021,43(8):1-6.
Niu Y G, Wang Y, Li Y Q, et al. Water security layout for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2021,43(8):1-6.
- [8] Jiang T, Wu G, Niu P, et al. Short-term changes in algal blooms and phytoplankton community after the passage of Super Typhoon Lekima in a temperate and inner sea (Bohai Sea) in China [J]. *Ecotoxicological and Environmental Safety*, 2022,232:113223.
- [9] Song N Q, Wang N, Lu Y, et al. Temporal and spatial characteristics of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952~2014 [J]. *Continental Shelf Research*, 2016,122:77-84.
- [10] Li G Y, Sheng L X. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2011,54(4):924-930.
- [11] Ji H Y, Pan S Q, Chen S L. Impact of river discharge on hydrodynamics and sedimentary processes at Yellow River delta [J]. *Marine Geology*, 2020,425:106210.
- [12] 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.
- [13] Zhang J J, Li F, Lv Q M, et al. Impact of the Water-Sediment Regulation Scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,294:126291.
- [14] 陈成桐,樊珂宇,林颂雄,等. 狮子洋水域浮游植物丰度与叶绿素 a 浓度的分布特征 [J]. *生物化工*, 2023,9(6):70-75,79.
Chen C T, Fan K Y, Lin S X, et al. Distribution characteristics of phytoplankton abundance and chlorophyll-a concentration in Shiziyang [J]. *Biochemical Engineering*, 2023,9(6):70-75,79.
- [15] Cao Z G, Ma R H, Duan H T, et al. A machine learning approach to estimate chlorophyll-a from Landsat-8 measurements in inland lakes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020,248.
- [16] Caraco N F, Cole J J, Strayer D L. Top-down control from the bottom: regulation of eutrophication in a large river by benthic grazing [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006,51(1part2):664-670.
- [17] Hart R C. Zooplankton biomass to chlorophyll ratios in relation to trophic status within and between ten South African reservoirs: causal inferences, and implications for biomanipulation [J]. *Water SA*, 2011,37(4):513-522.
- [18] Havens K E, Beaver J R. Zooplankton to phytoplankton biomass ratios in shallow Florida lakes: an evaluation of seasonality and hypotheses about factors controlling variability [J]. *Hydrobiologia*, 2013,703(1):177-187.
- [19] Sommer U. Scarcity of medium-sized phytoplankton in the northern Red Sea explained by strong bottom-up and weak top-down control [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000,197:19-25.
- [20] 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.
- [21] 杨作升,李国刚,王厚杰,等. 55 年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008,28(6):9-18.
Yang Z S, Li G G, Wang H J, et al. Variation of daily water and sediment discharge in the Yellow River lower reaches in the past 55 years and its response to the dam operation on its main stream [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008,28(6):9-18.
- [22] 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.
- [23] Wang Y J, Liu D Y, 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.
- [24] 秦雪,徐宾铎,杨晓改,等. 黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *水产学报*, 2016,40(5):711-720.
Qin X, Xu B D, Yang X G, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental variables in summer in the Yellow River estuary and its adjacent waters [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016,40(5):711-720.
- [25] 孙慧慧. 黄河口邻近海域浮游植物群落结构时空变化及其对调水调沙的响应 [D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
Sun H H. Temporal and spatial variations of phytoplankton community in response to the water-sediment regulation event in the adjacent sea of the Yellow River estuary [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [26] Calbet A, Landry M R. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004,49(1):51-57.
- [27] Cabrerizo M J, Carrillo P, Villafañe V E, et al. Differential impacts of global change variables on coastal south Atlantic phytoplankton: role of seasonal variations [J]. *Marine Environmental Research*, 2017,125:63-72.
- [28] 王秀霞,高彦洁,左明,等. 2011~2020 年调水调沙前后黄河口海域浮游动物年间变化及影响因子 [J]. *海洋科学*, 2022,46(12):115-127.
Wang X X, Gao Y J, Zuo M, et al. Interannual variations and influencing factors of zooplankton in the Yellow River estuary before and after water and sediment discharge regulation from 2011 to 2020 [J]. *Marine Sciences*, 2022,46(12):115-127.
- [29] Li F, Zhu M M, Chen W, et al. Interannual variation of ichthyoplankton community structure in the Yellow River estuary, China [J]. *Water*, 2023,15(6):1040-1040.
- [30] 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.
- [31] 杨艳艳,朱明明,宋泉清,等. 黄河调水调沙对河口及邻近海域鱼卵、仔稚鱼群落结构的影响 [J]. *水生生物学报*, 2024,48(3):488-503.

- Yang Y Y, Zhu M M, Song Q Q, et al. The water-sediment regulation scheme on the community structure of ichthyoplankton in the Yellow River estuary [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024,48(3):488-503.
- [32] Lu T A, Wang H J, Hu L M, et al. Dynamic transport of particulate organic carbon in the Yellow River during dam-orientated water-sediment regulation [J]. *Marine Geology*, 2023,460.
- [33] 王秀霞,张培超,杨艳艳,等.2020 年调水调沙工程实施期间黄河口海域浮游动物群落结构特征 [J]. *科学技术与工程*, 2022,22(21):9061-9070.
- Wang X X, Zhang P C, Yang Y Y, et al. Community structure of zooplankton in the Yellow River estuary during the water and sediment discharge regulation in 2020 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022,22(21):9061-9070.
- [34] Deyle E R, Fogarty M, Hsieh C H, et al. Predicting climate effects on Pacific sardine [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013,110(16):6430-6435.
- [35] Ye H, Deyle E R, Gilarranz L J, et al. Distinguishing time-delayed causal interactions using convergent cross mapping [J]. *Scientific Reports*, 2015,5.
- [36] Ye H, Bea2mish R J, Glaser S M, et al. Equation-free mechanistic ecosystem forecasting using empirical dynamic modeling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(13):E1569-E1576.
- [37] Anneville O, Chang C W, Dur G, et al. The paradox of re-oligotrophication: the role of bottom-up versus top-down controls on the phytoplankton community [J]. *Oikos*, 2019,128(11):1666-1677.
- [38] Lofton M E, Leach T H, Beisner B E, et al. Relative importance of top-down vs. bottom-up control of lake phytoplankton vertical distributions varies among fluorescence-based spectral groups [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020,65(10):2485-2501.
- [39] Statham P J. Nutrients in estuaries—an overview and the potential impacts of climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 434:213-227.
- [40] Lucena-Moya P, Duggan I C. Correspondence between zooplankton assemblages and the Estuary Environment Classification system [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2017,184:1-9.
- [41] Villate F, Iriarte A, Uriarte I, et al. Seasonal and interannual variability of mesozooplankton in two contrasting estuaries of the Bay of Biscay: relationship to environmental factors [J]. *Journal of Sea Research*, 2017,130:189-203.
- [42] Rose T H, Tweedley J R, Warwick R M, et al. Zooplankton dynamics in a highly eutrophic microtidal estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019,142:433-451.
- [43] 徐兆礼.长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势 [J]. *生态学杂志*, 2005,(7):780-784.
- Xu Z L. Character of zooplankton community and its variation in the water near the Yangtze River estuary [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005,(7):780-784.
- [44] Gao Q, Xu Z L, Zhuang P. The relation between distribution of zooplankton and salinity in the Changjiang estuary [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2008,26(2):178-185.
- [45] 黄加祺,郑 重.九龙江口桡足类和盐度关系的初步研究 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1984,(4):497-505.
- Huang J Q, Zheng Z. The relation of copepods to salinity in the estuary of Jiulong River [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1984,(4):497-505.
- [46] 姜会超,陈海刚,宋秀凯,等.莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2015,35(22):7308-7319.
- Jiang H C, Chen H G, Song X K, et al. Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(22):7308-7319.
- [47] 王朝晖,齐雨藻,陈菊芳,等.大亚湾角毛藻细胞数量波动及其与环境因子关系的多元分析 [J]. *生态学报*, 2006,(4):1096-1102.
- Wang Z H, Qi Y Z, Chen J F, et al. Population dynamics of *Chaetoceros* spp. and multivariate analysis of its relationship with environmental factors in Daya Bay, South China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,(4):1096-1102.
- [48] Song J, Hou C Y, Liu Q, et al. Spatial and temporal variations in the plankton community because of water and sediment regulation in the lower reaches of Yellow River [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,261:120972.
- [49] Franks P J S. Phytoplankton blooms at fronts: patterns, scales, and physical forcing mechanisms [J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1992, 6(2):121-137.
- [50] Lin L, Wang Y Q, Liu D Y. Vertical average irradiance shapes the spatial pattern of winter chlorophyll-a in the Yellow Sea [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2019,224:11-19.
- [51] Zervoudaki S, Nielsen T, Carstensen J. Seasonal succession and composition of the zooplankton community along an eutrophication and salinity gradient exemplified by Danish waters [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009,31(12):1475-1492.
- [52] Ibanez C, Alcaraz C, Caiola N, et al. Regime shift from phytoplankton to macrophyte dominance in a large river: top-down versus bottom-up effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2012,416:314-322.

作者简介: 孙绍庆(1999-),男,山东青岛人,鲁东大学硕士研究生,主要研究方向为海洋生态学.1808278812@qq.com.