

DOI: 10.5846/stxb201808031655

张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 袁红明, 叶思源, 王丽莎, 石晓勇. 初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素研究. 生态学报, 2019, 39(17): - .
Zhang H B, Pei S F, Zhu Y X, Yuan H M, Ye S Y, Wang L S, Shi X Y. Study on the distribution characteristic of primary productivity and its controlling factors in Bohai Bay in the early summer. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素研究

张海波^{1,2}, 裴绍峰^{1,3,*}, 祝雅轩¹, 袁红明¹, 叶思源^{1,3}, 王丽莎², 石晓勇²

1 中国地质调查局 滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266071

2 中国海洋大学 化学化工学院, 青岛 266100

3 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

摘要: 根据 2016 年初夏在渤海湾周边重要经济开发区外海域所进行的调查和研究数据进行分析, 利用稳定同位素¹³C 示踪技术估算海域内初级生产力 (Primary Productivity, *PP*) 等, 同时结合叶绿素 a (Chlorophyll-a, *Chl a*), 营养盐以及透明度等水文环境参数, 深入分析和探讨初夏渤海湾环境特征对浮游植物生物量 (*Chl a*) 和初级生产力的影响。结果表明: 受陆地径流和渤海中部冷流输入等因素的影响, 调查海域呈现三个温盐特征差异显著的海区, 即近岸高温低盐海区、中部高温高盐海区和湾口低温高盐海区。*Chl a* 受温度和营养盐等因素影响整体呈现近岸高湾口低、表层高底层低的分布特征, 含量变化范围为 1.27—20.82 mg/m³; 在近岸营养盐含量充足, 温度适宜, 浮游植物生产旺盛, *Chl a* 平均含量达 (8.37±2.90) mg/m³, 其中表层近 27.5% 水样中含量超 10 mg/m³, 存在发生赤潮的风险。而在中部和湾口区域受营养盐限制和温度的影响, *Chl a* 含量远低于近岸。*PP* 整体水平在 44.79—792.73 mg C m⁻³ d⁻¹ 之间, 平均为 (144.13±137.79) mg C m⁻³ d⁻¹。其中近岸营养盐含量充足浮游植物生长旺盛, 初级生产力水平较高, 而中部和湾口海域受营养盐和温度的限制, 初级生产力水平较低。初级生产力指数 *I* (同化系数) 变化范围在 0.79—5.90 mg C/(mg *Chl a* · h) 之间, 平均为 (3.40±1.33) mg C/(mg *Chl a* · h)。本文利用标准深度积分模型对水柱初级生产力 (Depth-integrated primary productivity, ΣPP) 进行估算, 结果表明其范围在 56.88—772.31 mg C m⁻² d⁻¹ 之间, 平均为 (232.26±126.47) mg C m⁻² d⁻¹, 近岸受陆源输入影响 *Chl a* 较高, 在天津海河口和黄骅市排污河外出现高值点, 受透明度的影响, 中部和湾口部分站点出现高生产力区。

关键词: 渤海湾; 稳定同位素示踪; 叶绿素 a; 初级生产力

Study on the distribution characteristic of primary productivity and its controlling factors in Bohai Bay in the early summer

ZHANG Haibo^{1,2}, PEI Shaofeng^{1,3,*}, Zhu Yaxuan¹, YUAN Hongming¹, YE Siyuan^{1,3}, Wang Lisha², Shi Xiaoyong²

1 Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

2 College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3 Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China

Abstract: In the early summer of 2016, we investigated the primary productivity (*PP*) and productivity index (*I*) using the stable isotope ¹³C tracer method, and other environmental parameters, including chlorophyll-a (*Chl a*), temperature (*T*), salinity (*S*), and Secchi depths, in order to examine the relationships between *PP* distribution characteristics and environmental parameters in Bohai Bay. The results show that there were three obvious water masses with different temperature and salinity characteristics in our study area, because of the river discharge and cold water mass at the mouth of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41306175); 青岛市市南区科技发展资金项目 (2013-14-007-JY); 渤海湾西部等重点海岸带综合地质调查 (121201005000150004); 国家重点研发计划子课题 (2016YFC1402101)

收稿日期: 2018-08-03; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: peishaofeng@gmail.com

the bay. Chl *a* concentrations ranged from 1.27 to 20.82 mg/m³, and declined from the surface to the bottom and from the nearshore to offshore. In the coastal high-T and low-S zone, nutrients from river runoff and relatively higher temperature supported phytoplankton growth and thus Chl *a* was found as high as (8.37±2.90) mg/m³ on average, and 27.5% of the samples with Chl *a* concentrations higher than 10 mg/m³ were from the surface layer, probably suggesting the possibility of an algal bloom when the temperature increases as summer progresses. Comparatively, Chl *a* concentrations in the central area and mouth of the bay were much lower than those in the coastal zone, probably because of phosphate and temperature limitations. The *PP* was estimated to be from 44.79 to 792.73 mg C m⁻³ d⁻¹, with a mean value of (144.13±137.79) mg C m⁻³ d⁻¹. Controlled by high phytoplankton biomass and sufficient nutrients, *PP* also exhibited a declining trend from the coast towards the offshore. Productivity index was estimated to be from 0.79 to 5.90 mg C/(mg Chl *a* · h) with a mean value of (3.40±1.33) mg C/(mg Chl *a* · h). Depth-integrated primary productivity ($\sum PP$) of the water column was also estimated and it ranged from 56.88 to 772.31 mg C m⁻² d⁻¹, with a mean value of (232.26±126.47) mg C m⁻² d⁻¹. It was found that $\sum PP$, controlled by Chl *a* in the coastal zone, showed high-value stations off the Haihe River and Huanghua Drainage River Estuary. Further, in the central area and the mouth of the bay, affected by the transparency (the euphotic layer was deeper), $\sum PP$ showed several high-value stations.

Key Words: Bohai Bay; stable isotopic tracer; chlorophyll-*a*; primary production

海洋初级生产力(Primary Productivity, *PP*)指海水中自养生物通过光合作用或者化学合成作用合成有机物的能力,除受浮游植物现存量直接影响外,还受光照强度和时问、营养盐的含量和结构、海水温度、盐度和海洋环流等环境因素的影响^[1],是海洋食物链的基础和海洋生物资源估算的重要依据^[2],对海洋渔业资源的发展具有重要影响^[3]。近海海域作为受陆源输入和人类活动影响最剧烈的水域之一,初级生产力水平较高,是海洋环境重点研究区域,也是全球碳循环重要组成部分。

渤海湾是我国重要的海湾之一,是众多经济类鱼虾的产卵场和饵料场^[4],平均水深 12.5 m,内有顺时针方向的渤海湾环流^[5],受沿岸径流和渤海中部冷流^[6]影响较为明显。环渤海湾周边城市更是我国重要的政治、经济和文化中心。周围有海河、永定新河等多条河流,入海径流量有明显的季节性。近年受陆源污染排放、围海造陆、拦河截流等诸多人类活动的影响,渤海湾海域面积减少了约 15%^[7],同时,大量的氮磷等营养物质输入导致近海营养盐结构失衡以及富营养化,赤潮灾害频发^[8-10]。研究表明,近些年来渤海湾海域浮游植物优势藻以硅藻门为主,且最优藻种不断变化^[11],杨世民等^[12]的研究发现渤海湾西部近岸海域浮游植物细胞丰度最高是在 5 月,7 月次之,浮游植物群落结构的变化进一步影响海域初级生产力季节变化^[13-15]。为进一步分析渤海湾近年周边发展对其生态环境的影响,本研究于 2016 年初夏季节针对渤海湾西部和北部两个重要沿海经济开发区外海域开展综合调查,利用¹³C 稳定同位素示踪技术测定水域内浮游植物光合速率,通过分析海域浮游植物现存量、初级生产力和环境因子之间的关系,以期探明渤海湾环境因子变化对海域初级生产力的影响,并对近岸海域生态环境变化进行探讨。

1 材料与方法

1.1 调查区域和站位

本研究于 2016 年 5 月底至 6 月初在渤海湾开展调查,共设常规站位 204 个,其中初级生产力观测站位 22 个,研究区域主要集中在西部和北部经济开发区外临近海域(图 1)。

1.2 数据采集与分析

现场使用 Niskin 采水器采集不同水层海水,并按照海洋调查规范(GB 12763.4—2007-T)方法对水文、化学等参数采集和测定,其中温度(T,℃)和盐度(S)使用水质测定仪(HANNA HI98194)现场测定,透明度(Z_{SD} , Secchi depths)使用海水透明度盘测定。海水经 GF/F(Whatman, 47 mm 直径,0.7 μm 孔径)滤膜过滤后,滤液冷冻保存用于测定营养盐,滤膜用锡纸包装冷冻保存用于测定叶绿素。其中叶绿素萃取后利用分光

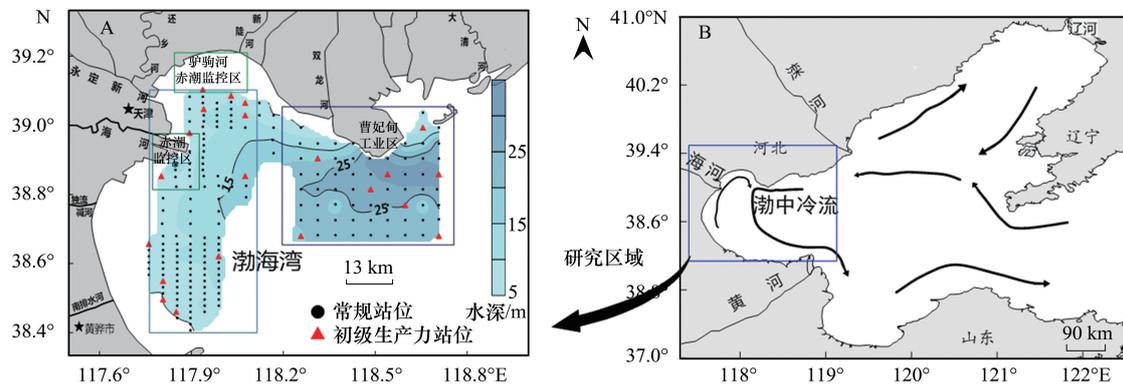


图1 渤海湾调查区域及站位设置和渤海夏季主要环流系统(根据毕聪^[16]论文重新绘制)

Fig.1 Study area, sampling stations and circulation in Bohai Bay, China

光度法测定,并使用 Jeffrey and Humphrey 方程计算^[17]。叶绿素 a 是海洋浮游植物现存量的指标,浓度异常反映水体富营养化程度和赤潮的水平^[18],本文以 10 mg/m^3 作为发生赤潮潜在风险的评价标准^[19-20]。

海洋初级生产力的研究方法,主要有叶绿素 a 估算法、黑白瓶测氧法、 ^{18}O 示踪法、 ^{14}C 和 ^{13}C 等同位素示踪法等。其中同位素示踪法具有精密度高、灵敏度好的优点,是海洋初级生产力主要调查方法。日本科学家 T. Hama 等^[21]曾同时利用放射性同位素 ^{14}C 和稳定性同位素 ^{13}C 测定生产力,并开展对比试验,结果发现两种方法在精密度和重复性均具有良好的一致性;且 ^{13}C 不具放射性,对于海域内生态环境无污染,因此可作为替代方法测定生产力,故本文选取 ^{13}C 稳定同位素示踪法进行现场初级生产力培养、测试和计算。现场,水样经 $200 \mu\text{m}$ 筛绢过滤以去除大型浮游动物干扰,倒入培养瓶后加入一定量 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 示踪剂使得培养瓶中总无机碳中 ^{13}C 的百分含量在 6%—11% 之间。培养瓶置于阳光下并在循环海水中培养,光照时长 4—6 小时且控制在 9:00—15:00 之间(图 2),后使用 GF/F (Whatman, 25 mm 直径, $0.7 \mu\text{m}$ 孔径,预先 450°C 煅烧 4h) 滤膜过滤水样,滤膜冷冻保存。实验室内酸蒸去除膜上的无机碳,然后利用元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机 (Flash EA 1112 HT-Delta V Advantages, Thermo) 测定滤膜中 POC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 。利用 T. Hama^[21]提出公式计算水体浮游植物的光合速率 (P , Photosynthetic Rate, $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$),同时根据叶绿素和光照时间(以 12h 计)计算初级生产力 (PP , $\text{mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) 和生产力指数 (I , Productivity Index, $\text{mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$)。利用 Behrenfeld 和 Falkowski^[22]提出的标准深度积分模型计算水柱初级生产力 ($\sum PP$, Depth-integrated Primary Productivity, $\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),其中真光层深度 (Z_{eu}) 为透明度 Z_{SD} 的三倍)。

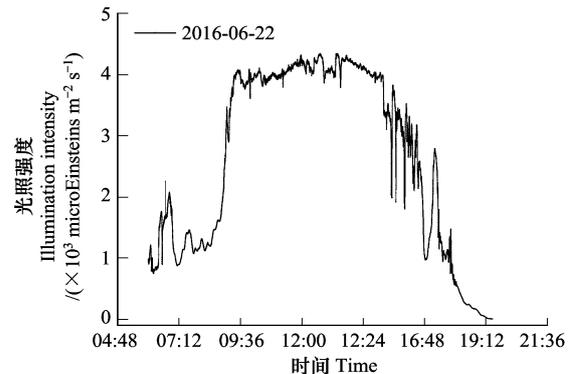


图2 渤海湾光照强度日变化

Fig.2 Diurnal variation of illumination intensity in Bohai Bay

2 结果和讨论

2.1 温盐分布特征

根据本次调查所获温盐分布特征(图 3A)可见,湾内大致呈现三个区别较为明显的区域(图 3B):其中近岸高温低盐海区受河流输入影响,平均温度为 $(20.63 \pm 1.21)^\circ\text{C}$,平均盐度为 27.88 ± 0.24 ,温盐环境可能比较适合浮游植物生长;中部海域水流交换缓慢,温盐相对较高,平均温度和盐度分别为 $(23.26 \pm 1.00)^\circ\text{C}$ 和 31.09 ± 0.18 ,变化幅度较小;湾口受渤海中部冷流影响,平均温度和盐度分别为 $(17.46 \pm 1.75)^\circ\text{C}$ 和 31.79 ± 0.12 。

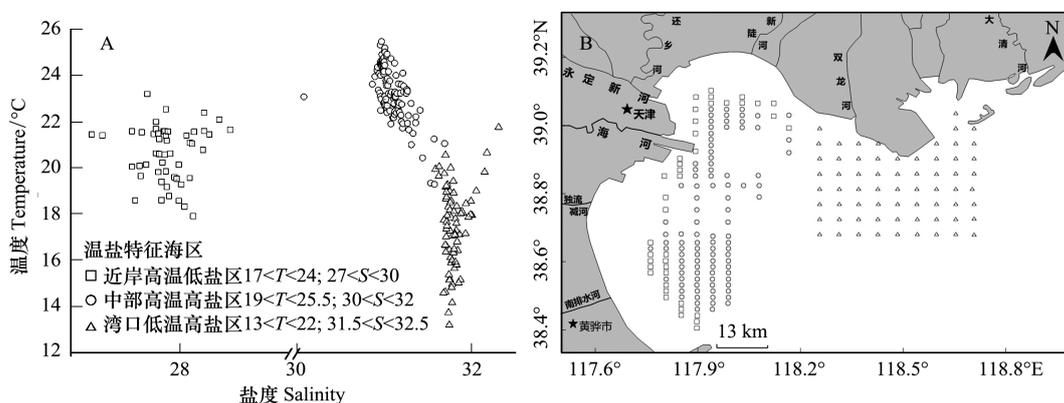


图3 调查海域内水样的温度(°C)-盐度点聚图及温盐平面分布

Fig.3 Scatter diagrams and horizontal distribution of temperature and salinity in the study area

2.2 叶绿素 a 分布特征

调查区 Chl a 分布呈现近岸高远岸低、表层高底层低的特征,其变化范围为 1.27—20.82 mg/m^3 ,平均浓度为 $(4.96 \pm 2.92) \text{mg}/\text{m}^3$ 。表层受光照条件以及温度等因素影响,浮游植物生长较快,Chl a 平均浓度达 $(5.13 \pm 3.01) \text{mg}/\text{m}^3$ 。且表层存在 3 个明显的高值区,主要集中在临近西部天津市和黄骅市的近岸海域以及北部曹妃甸开发区的外海域,其中有 14 个水样叶绿素 a 含量超过 $10 \text{mg}/\text{m}^3$ (图 4A),占表层水样的 6.9%。底层受光照条件和低温的限制,Chl a 浓度范围为 1.57—10.84 mg/m^3 ,平均为 $(4.48 \pm 2.34) \text{mg}/\text{m}^3$ 。

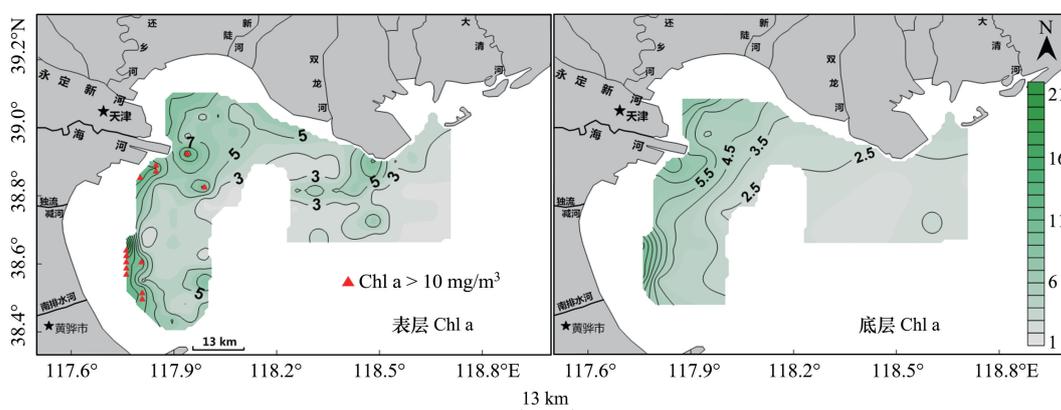


图4 调查海域内叶绿素 a (mg/m^3) 的平面分布

Fig.4 Horizontal distributions of Chlorophyll a in the surface and bottom of Bohai Bay

针对三个不同温盐特征海区进行分析可见,近岸高温低盐海域,受陆源输入等因素影响,生源要素含量较为丰富^[23](表 1),海水温度高,适宜浮游植物生长,Chl a 浓度在 3.72 — $20.82 \text{mg}/\text{m}^3$ 之间,平均为 $(8.40 \pm 3.72) \text{mg}/\text{m}^3$;其中表层高于 $10 \text{mg}/\text{m}^3$ 水样有 11 个,占该海区表层站位的 27.5%,随着夏季海水温度和光照强度进一步增强,高 Chl a 即高生物量的局部区域可能存在爆发赤潮的潜在风险。中部高温高盐海域,前期研究^[23]表明此区域浮游植物生长明显受活性磷酸盐的限制(表层 74.3% 站位含量低于阈值 $0.03 \mu\text{mol}/\text{L}$ ^[24]),Chl a 浓度 $(4.85 \pm 2.24) \text{mg}/\text{m}^3$ 低于近岸。而在湾口低温海域,根据 Pei 等^[25]研究温度与生产力之间的关系发现,该区较低的温度可能不利于浮游植物生长,从而成为限制浮游植物生物量 and 生产力的重要因素,这与该区较低的 Chl a 浓度 $(3.19 \pm 1.70) \text{mg}/\text{m}^3$ 是一致的;值得注意的是,该区表层近岸海域受曹妃甸陆源输入影响,在北部近岸存在一个 Chl a 高值区,中心最高浓度可达 $9.55 \text{mg}/\text{m}^3$,但底层受低温和光照等因素影响,Chl a 浓度含量较低 $(2.24 \pm 0.44) \text{mg}/\text{m}^3$ 。

表 1 不同水团中营养盐($\mu\text{mol/L}$),叶绿素 a (Chl a , mg/m^3),生产力指数(I , $\text{mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$),初级生产力(PP , $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$)和水柱初级生产力(ΣPP , $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)与环境参数的相关性分析

	The Pearson correlation coefficient of nutrients, Chl a, I, PP, the Depth-integrated PP and environmental parameters in the different water mass											
	整个海域 study area				近岸低盐海域表层 (Chl a 为表层)				中部和湾口高盐海域 Surface of high salinity watermass			
	DIN	PO ₄	SiO ₃	ΣPP	DIN	PO ₄	SiO ₃	ΣPP	DIN	PO ₄	SiO ₃	ΣPP
均值 Average	4.96±2.92	144.13±137.79	348.39±189.70	8.40±3.72	2.24±1.01	253.34±235.19	4.07±2.19	3.81±1.18	104.82±39.83	4.13±2.02	3.56±1.23	107.18±46.19
样品数 Numbers	34	34	22	35	9	9	9	94	25	25	63	13
透明度 Secchi depths/m	-0.650**	-0.431*	0.386	-0.165	-0.105	-0.229	0.180	-0.354	0.246	-0.240	-0.282	-0.256
温度 Temperature/°C	0.303**	0.340*	0.267	0.541**	0.427	0.599	0.457	0.490**	-0.216	0.480*	0.431*	0.376
盐度 Salinity	-0.654**	0.532**	0.189	0.362*	0.453	0.650	0.576	-0.391**	-0.040	-0.490*	-0.344**	-0.445
Chl a	-0.337	0.853*	0.264	0.556	0.362*	0.892**	0.746*	-0.230	0.741**	0.007	0.773**	0.325
NH ₄	0.087	-0.344*	-0.123	0.033	-0.330	-0.249	-0.046	-0.27**	-0.389	0.160	0.142	-0.209
NO ₃	0.288**	-0.450**	0.180	-0.095	-0.152	-0.251	-0.308	-0.241**	-0.222	0.033	0.149	-0.047
NO ₂	0.319**	-0.476**	0.295	0.030	-0.084	-0.057	-0.083	-0.333**	-0.294	0.094	0.228	0.012
DIN	0.289**	-0.488**	0.168	-0.077	-0.206	-0.282	-0.298	-0.278**	-0.289	0.065	0.173	-0.309
SiO ₃	0.686**	-0.301	0.198	0.624**	0.509	0.868**	0.625	-0.206*	-0.143	0.401*	0.159	-0.059
PO ₄	0.117	-0.235	0.188	0.208	0.380	0.676*	0.516	-0.122	-0.284	-0.169	0.014	-0.206
N/P	-0.113	-0.141	-0.092	-0.127	-0.154	-0.286	-0.376	0.093	-0.222	-0.053	0.093	-0.270
Si/P	-0.094	0.082	0.308	0.120	0.036	-0.010	-0.110	0.116	-0.031	0.047	0.116	-0.185
Si/N	-0.151	0.424*	0.149	0.557**	0.384	0.717*	0.485	-0.105	0.368	-0.048	-0.105	0.377
DON	0.530**	-0.486**	0.410*	0.252	-0.102	0.002	0.005	0.429**	-0.207	0.440*	0.429**	-0.139
DOP	0.247**	-0.373*	0.138	0.015	-0.213	0.022	0.140	0.197	-0.045	0.696**	0.197	0.121
I			0.639**				0.875**					0.506
PP			0.572**				0.884**					0.485

** 表示相关置信水平小于0.01; * 表示相关置信水平小于0.05,其他为不相关; NH₄, 铵氮; NO₃, 硝酸盐; NO₂, 亚硝酸盐; DIN, 溶解无机氮; DON, 溶解有机氮; dissolved organic phosphorus; SiO₃, 活性磷酸盐; DOP, 溶解性磷酸盐; Si/N, 氮磷比值; N/P, 氮磷比值; Si/P, 硅磷比值; ratio of SiO₃/PO₄; Si/N, 硅氮比值; ratio of SiO₃/DIN; I, 生产力指数; productivity index; PP, 初级生产力; primary production; ΣPP , 水柱初级生产力; Depth-integrated primary productivity; Chl a, 叶绿素 a; Chlorophyll-a

2.3 初级生产力与生产力指数分布特征

通过现场培养实验和后期计算表明,海域内 PP 在 $44.79\text{--}792.73\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 之间,平均为 $(144.13 \pm 137.79)\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 。受到温度和营养盐含量等因素的影响(图 5AB),分布呈现近岸高远岸低、表层高底层低的特征。近岸高温低盐海域,受陆源输入的影响营养盐丰富(表 1),且温盐条件合适,浮游植物光合作用较强, PP 在 $73.87\text{--}792.72\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 之间,平均值为 $(253.34 \pm 235.19)\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$,生产力水平较高。中部高温高盐海域,受到磷营养盐限制(表 1,表层 100% 站位存在 P 限制^[24-25]), PP 在 $6.87\text{--}217.42\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 之间,平均值为 $(133.52 \pm 43.55)\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$,远低于近岸海域。在湾口低温高盐度海域,受温度(图 3)和氮营养盐限制(表 1,50% 站位 DIN 含量低于阈值 $1\mu\text{mol/L}$ ^[24]), PP 平均值为 $(88.67 \pm 27.46)\text{ mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$,远低于近岸和中部高温海域。

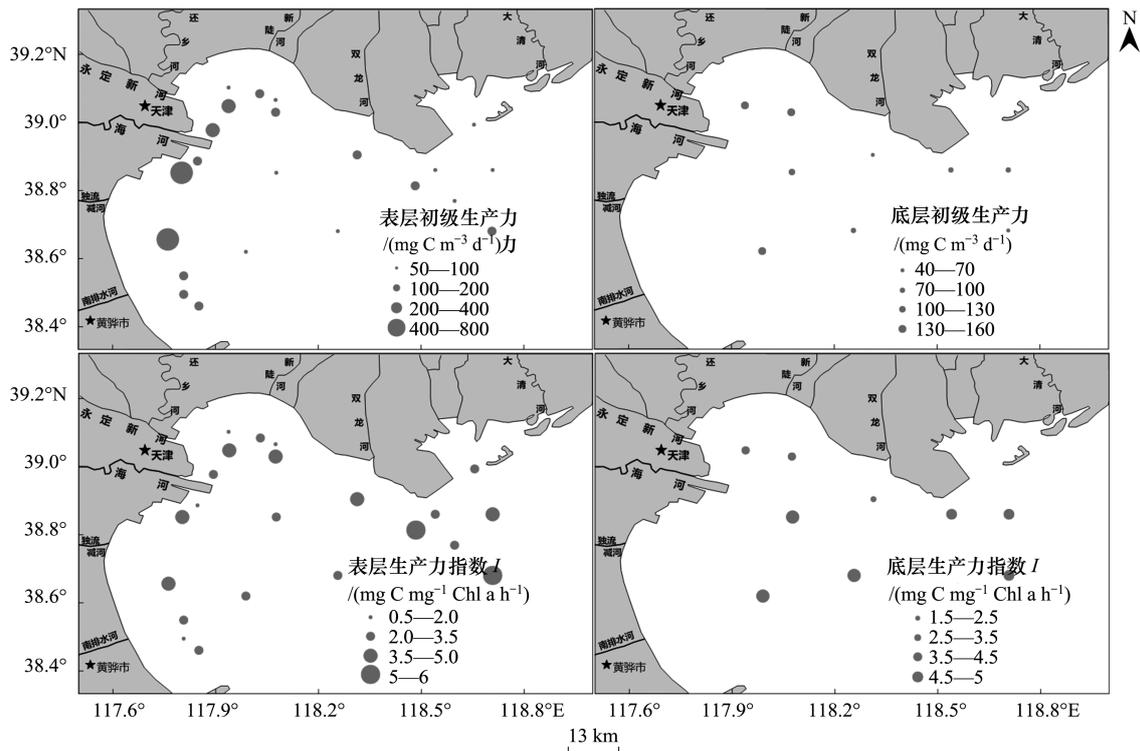


图 5 渤海调查海域初级生产力 ($\text{mg C m}^{-3}\text{ d}^{-1}$) 和生产力指数 ($\text{mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$) 的平面分布

Fig. 5 Horizontal distributions of primary productivity and Productivity index in Bohai Bay

生产力指数 (Productivity index, I) 是指单位叶绿素 a 的生产能力^[26]。经计算,本次调查中 I 的范围约在 $0.79\text{--}5.90\text{ mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$ 之间,平均值为 $(3.40 \pm 1.33)\text{ mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$ 。其分布特征(图 5CD) 表现为近岸低盐度区域受水体浑浊度影响,光照条件差, I 平均值为 $(2.24 \pm 1.01)\text{ mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$ 。中部和湾口海域,透明度高,光照强度适宜, I 平均值分别为 $(3.61 \pm 0.89)\text{ mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$ 和 $(3.53 \pm 1.46)\text{ mg C}/(\text{mg Chl a} \cdot \text{h})$ 。

2.4 水柱初级生产力估算及其分布特征

夏季渤海湾水柱初级生产力高值站位主要分布在近岸和中部(图 6B),其中近岸高值点位于河口和排污口外,而中部高值点位于高透明度区域(图 6AB)。在整个调查海域内 ΣPP 变化范围在 $56.88\text{--}772.31\text{ mg C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 之间,平均为 $(232.26 \pm 126.47)\text{ mg C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 。中部海区受高透明度的影响, ΣPP 平均值为 $(313.48 \pm 128.55)\text{ mg C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$,远高于透明度相对较差的近岸 ($(204.21 \pm 157.69)\text{ mg C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$) 和湾口低温海区 ($(213.06 \pm 63.06)\text{ mg C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$)。

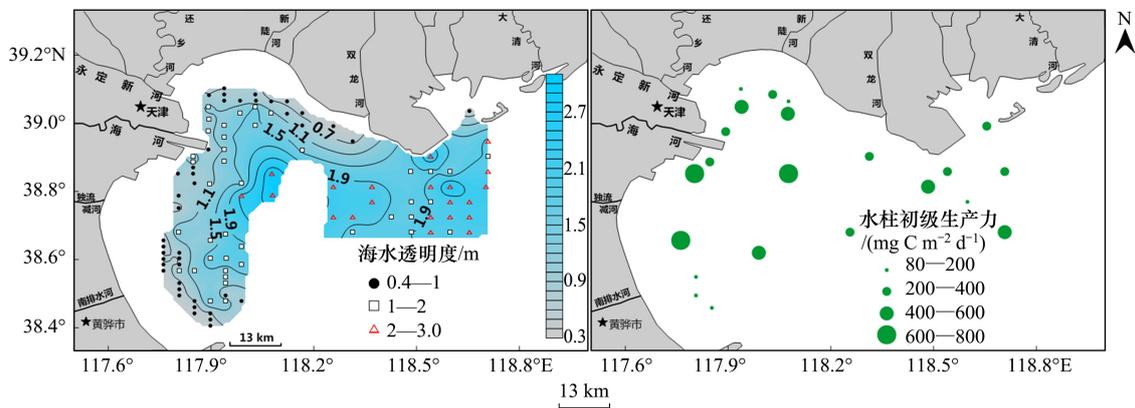


图6 渤海调查海域内透明度(m)和水柱初级生产力($\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)的平面分布

Fig.6 Horizontal distributions of secchi depths and the Depth-integrated primary productivity of the study area

2.5 叶绿素与初级生产力的影响因素分析

为深入分析调查区域内不同海区叶绿素和初级生产力与水文环境因子之间的相互关系,对调查结果进行了 Pearson 相关分析,结果汇总在表 1 中。可见。

在整个调查海域内,Chl a 与温度、营养盐(DIN, SiO_3 , DOP, DON)呈现明显的正相关。近岸低盐海域浮游植物的优势藻种以硅藻为主^[12],因此受到 SiO_3 以及 Si/N 影响明显;而中部和湾口高盐度海区,Chl a 受 DIN 限制,DON 作为重要的氮补充源^[27],与浮游植物具有明显的正相关。PP 主要受 Chl a 和 SiO_3 的影响,其中中部和湾口高盐海域陆源输入影响较小,受浮游植物对活性磷酸盐“过度消费”影响, PO_4 含量相对较低($(0.06 \pm 0.08) \mu\text{mol/L}$)^[23],DOP 作为磷重要赋存形态。对浮游植物的光合作用具有明显的支撑作用($r = 0.696$, $P < 0.01$, $n = 25$)。ΣPP 指单位面积水柱浮游植物光合固碳能力,近岸低盐区由于水深较浅,水体较混浊,Chl a 是其主要影响因素;中部和湾口高盐海区,水深较深且透明度较高,因此该区域内生产力主要受真光层厚度以及光照条件影响($r = 0.573$, $P < 0.05$, $n = 13$)。

2.6 渤海不同海域叶绿素 a 和初级生产力研究对比

本文对以往在渤海湾及渤海内其他海域开展的叶绿素 a 和初级生产力调查与研究进行了汇总分析(表 2),结果显示渤海湾全年叶绿素 a 在春秋两季出现双峰值,而初级生产力的变化则相反,受温度和光照等因素适合浮游植物的光合作用影响,在夏季出现峰值^[28]。

近几十年渤海湾初级生产力的调查和研究发现,受人类活动和陆源营养盐输入的影响,渤海湾整体营养盐水平较高,初级生产力一直处于较高水平。对比渤海其他海域可见,莱州湾全年的初级生产力最高($535 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$),渤海中部次之,渤海湾与辽东湾最低。受到调查季节以及研究区域不统一,目前对渤海不同海域浮游植物生物量和初级生产力变化尚不能定论,仍需对渤海海域进一步开展综合调查和研究。

3 结论

初夏渤海湾受陆地径流和渤海中部冷流(低温高盐水)输入的影响,呈现三个明显的温盐海区,其中近岸和中部温度有利于浮游植物的生长和光合作用,湾口低温可能为浮游植物光合作用的限制因素。

Chl a 受温度、营养盐以及光照条件的影响呈近岸高湾口低,表层高底层低的分布特征。在近岸低盐海域受温度和硅酸盐浓度的影响,Chl a 含量为(8.37 ± 2.90) mg/m^3 ,表层中超过 10 mg/m^3 水样占 27.5%,存在爆发赤潮的潜在风险。中部海域浮游植物的生长受到磷酸盐限制,Chl a 含量为(4.85 ± 2.24) mg/m^3 。湾口低温海域 Chl a 含量为(2.99 ± 1.57) mg/m^3 ,与温度、硝氮、活性硅酸盐和磷酸盐呈现显著的正相关。

表 2 渤海不同海域内叶绿素 a (mg/m^3) 的浓度和初级生产力 ($\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) 的研究进展

Table 2 Studies on Chlorophyll-a and primary productivity in various part of Bohai Sea

研究海域 Study area	调查时间 Survey time	季节 Season	叶绿素 a Chlorophyll-a	初级生产力 Primary productivity	测定方法 Measuring methods	文献 References
渤海湾 Bohai bay	1982.05	春季		103	^{14}C	Fei ^[13]
	1982.08	夏季		277		
	1983.05	春季		98		
	1992-1993	全年		90	^{14}C	吕瑞华 ^[14]
	1997.06	晚春	1.14	154.5	^{14}C	宁修仁 ^[15]
	1998.05	春季	3.57	242	叶绿素法 (Q=3.7)	王俊 ^[28]
	1998.08	夏季	1.63	329		
	1998.10	秋季	2.77	253		
	2016.06	初夏	4.96±2.92	348.39±189.70	13C	本研究
莱州湾 Laizhou bay	1992-1993	全年		535	^{14}C	吕瑞华 ^[14]
	1997.06	晚春	1.6	138	^{14}C	宁修仁 ^[15]
	1998.05	春季	2.75	271	叶绿素法 (Q=3.7)	王俊 ^[28]
	1998.08	夏季	2.21	316		
	1998.10	秋季	3.46	235		
辽东湾 Liaodong bay	1992-1993	全年		96	^{14}C	吕瑞华 ^[14]
	1997.06	晚春	1.15	129	^{14}C	宁修仁 ^[15]
	1998.05	春季	3.99	464	叶绿素法 (Q=3.7)	王俊 ^[28]
	1998.08	夏季	3.69	487		
	1998.10	秋季	0.93	87		
渤海中部 Center of Bohai sea	1992-1993	全年		186	^{14}C	吕瑞华 ^[14]
	1997.06	晚春	0.71	125.6	^{14}C	宁修仁 ^[15]

Q, 碳同化系数 carbon assimilation number

PP 受温度、营养盐以及光照条件等因素影响呈近岸高湾口低, 表层高底层低的特征。整个海域生产力在 44.79—792.73 $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 之间, 平均为 (144.13 ± 137.79) $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 。近岸受陆源输入影响, 营养盐含量丰富温度适宜, 浮游植物生长旺盛, 生产力水平较高 ((253.34 ± 235.19) $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$), 远高于受磷酸盐限制的中部海域 ((133.52 ± 43.55) $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$) 和受冷水团影响的湾口海域 ((88.67 ± 27.46) $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$)。初夏渤海湾生产力指数平均为 (3.40 ± 1.33) $\text{mg C}/(\text{mg Chl } a \cdot \text{h})$, 可作为估算渤海湾海域生产力参考标准。

ΣPP 在 56.88—772.31 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 之间, 平均为 (232.26 ± 126.47) $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 生产力水平高, 有利于渤海湾海域渔业资源的恢复和发展。近岸低盐海域与叶绿素分布呈现一致性, 因透明度影响水柱生产力较低; 中部高温海域, 水温和光照条件较好, 有利于浮游植物的光合作用, 生产力较高 ((313.48 ± 128.55) $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

参考文献 (References):

- [1] 沈国英, 施并章. 海洋生态学 (第二版). 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] Chassot E, Bonhommeau S, Dulvy N K, Mélin F, Watson R, Gascuel D, Le Paper O. Global marine primary production constrains fisheries catches. *Ecology Letters*, 2010, 13(4): 495-505.
- [3] Ma Z Q, Zhou Z C, Xue K, Wang N B. The relationship between the primary production and fishery resources in the northern waters of Liaodong bay. *Fisheries Science*, 2004, 23(4): 12-15.
- [4] 乔延龙, 宋文平, 李文抗, 贾磊. 渤海湾渔业资源的现状及其可持续利用制约因素//2009年中国水产学会学术年会论文集. 海口: 中国水产学会, 2009.
- [5] 江文胜, 汪景庸, 赵建中, 王辉. 渤海湾环流的一次观测和分析. *青岛海洋大学学报*, 1997, 27(1): 23-32.
- [6] 宋文鹏. 渤海冬、夏季温盐场结构及其海流特征分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.

- [7] 孙百顺, 左书华, 谢华亮, 李怀远, 阳志文. 近 40 年来渤海湾岸线变化及影响分析. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2017, (4): 139-148.
- [8] 张洁帆, 陶建华, 李清雪, 赵海萍. 渤海湾氮磷营养盐年际变化规律研究. 安徽农业科学, 2007, 35(7): 2063-2064, 2107-2107.
- [9] 阚文静, 张秋丰, 石海明, 徐玉山, 王彬, 江洪友. 近年来渤海湾营养盐变化趋势研究. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 238-241.
- [10] 尹翠玲, 张秋丰, 刘洋, 崔健, 何荣. 2012 年渤海湾赤潮监控区赤潮发生及富营养化状况. 海洋湖沼通报, 2014, (1): 137-142.
- [11] 徐玉山, 刘宪斌, 张秋丰. 渤海湾近岸海域浮游植物多样性研究. 盐业与化工, 2009, 38(6): 11-14.
- [12] 杨世民, 董树刚, 李锋, 徐宗军, 吴以平. 渤海湾海域生态环境的研究 I. 浮游植物种类组成和数量变化. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 442-445.
- [13] Fei Z L, Mao X H, Zhu M Y, et al. The study of productivity in the Bohai Sea- II. Primary productivity and estimation of potential fish catch. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 9(2): 303-313.
- [14] 吕瑞华, 夏滨, 李宝华, 费尊乐. 渤海水域初级生产力 10 年间的变化. 海洋科学进展, 1999, 17(3): 80-86.
- [15] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明, 刘诚刚. 渤海晚春浮游植物粒度分级生物量与初级生产力. 海洋科学集刊, 2002, (44): 30-41.
- [16] 毕聪聪. 渤海环流季节变化及机制分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [17] Jeffrey S W, Humphrey G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1975, 167(2): 191-194.
- [18] 高爽. 北黄海叶绿素和初级生产力的时空变化特征及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [19] 蔡励勋. 厦门同安湾海域赤潮期间叶绿素变化的若干典型特征. 海洋环境科学, 2008, 27(4): 331-334.
- [20] 张水浸, 杨清泉, 邱辉煌, 林琼芳. 赤潮及其防治对策. 北京: 海洋出版社, 1994.
- [21] Hama T, Miyazaki T, Ogawa Y, Iwakuma T, Takahashi M, Otsuki A, Ichimura S. Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ¹³C isotope. Marine Biology, 1983, 73(1): 31-36.
- [22] Behrenfeld M J, Falkowski P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. Limnology and Oceanography, 1997, 42(7): 1479-1491.
- [23] 张海波. 渤海湾初夏生态环境特征及其对初级生产力影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2017.
- [24] 张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 王丽莎, 石晓勇, 叶思源, 袁红明, 丁喜桂. 初夏渤海湾营养盐结构特征及其限制状况分析. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3524-3530.
- [25] Pei S F, Laws E A, Zhang H B, Ye S Y, Kemper M T, Yuan H M, Xu G, Yang S X, Zhu Y X. Study on chemical hydrography, chlorophyll-a and primary productivity in Liaodong Bay, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 202: 103-113.
- [26] 李冠国, 范振刚. 海洋生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [27] 徐环, 张桂成, 李悦悦, 梁生康. 近海溶解有机氮对浮游植物生物可利用性研究进展. 海洋湖沼通报, 2016, (4): 59-67.
- [28] 王俊, 李洪志. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. 渔业科学进展, 2002, 23(1): 23-28.