

桑沟湾水域叶绿素 *a* 在海带收获前后的变化及其影响因素

吴文广, 张继红*, 王 巍, 房景辉, 刘 毅, 牛亚丽, 高振铨

(中国水产科学研究院黄海水产研究所,农业部海洋渔业可持续发展重点实验室,山东 青岛 266071)

摘要: 依据 2014 年 5 月和 8 月 2 个航次走航和定点连续调查资料,分析了桑沟湾水域叶绿素 *a* 的空间分布及海带养殖区叶绿素 *a* (Chl. *a*) 的昼夜变化特征,同时结合所调查的温度、盐度、pH 和营养盐等分布特征,分析了桑沟湾水域 Chl. *a* 浓度与理化因子的关系,探讨了海带收获前后 Chl. *a* 的变化及其影响因素。(1)走航调查的结果显示,桑沟湾夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春季。桑沟湾春季表、底层总 Chl. *a* 浓度均值分别为 (0.67 ± 0.39) 和 $(0.50 \pm 0.31) \mu\text{g/L}$, 表层 Chl. *a* 浓度高于底层,春季表层整体表现出自湾内向湾外逐渐降低的趋势;夏季表、底层总 Chl. *a* 浓度均值分别为 (3.39 ± 1.53) 和 $(3.12 \pm 1.43) \mu\text{g/L}$, 表层 Chl. *a* 浓度高于底层。桑沟湾夏季表层 Chl. *a* 高值区出现在海带养殖区,低值区出现在贝类养殖区,夏季底层 Chl. *a* 高值区出现在贝类和海带养殖区,低值区出现在外海区。(2)定点连续监测结果显示,春季海带养殖区 Chl. *a* 浓度变化范围在 $0.24 \sim 0.95 \mu\text{g/L}$, 均值为 $(0.70 \pm 0.19) \mu\text{g/L}$, 昼夜波动较小。而夏季海带养殖区 Chl. *a* 浓度变化范围在 $2.01 \sim 4.66 \mu\text{g/L}$, 均值为 $(3.04 \pm 0.82) \mu\text{g/L}$, 昼夜波动较大。桑沟湾海带养殖区夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春季。春季海带养殖区营养盐平均浓度及硅磷比、氮磷比、硅氮比均显著低于夏季。(3)桑沟湾春季表层 Chl. *a* 浓度主要与温度、硅酸盐呈显著正相关,而夏季底层 Chl. *a* 浓度与盐度呈显著正相关。桑沟湾海带收获前后 Chl. *a* 的变化及分布受温度、硅酸盐、盐度、养殖环境状况和水文环境的共同影响,多元的贝藻养殖模式是影响 Chl. *a* 变化及分布的重要因素。

关键词: 叶绿素 *a*; 海带区; 温度; 营养盐; 桑沟湾

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

叶绿素 *a* (Chl. *a*) 浓度是表征海洋中浮游植物现存生物量和光合作用有机碳同化能力的重要指标,是海域肥瘠程度和评价海域生态环境的重要依据^[1-3]。Chl. *a* 浓度的高低在一定程度上能反映海区海水质量状况,与海水养殖活动密切相关,养殖模式、种类和水域水质等均能引起 Chl. *a* 浓度的改变。目前有关养殖海域 Chl. *a* 浓度分布及其变化的研究已有报道^[4-7],但有关海带 (*Laminaria japonica*) 养殖活动对水域中 Chl. *a* 浓度影响及其因素的研究未见报道。桑沟湾是我国北方重要的海带养殖基地,湾内外海带养殖总面积达 75 km^2 , 淡干总产量达 8 万 t/年,已成为桑沟

湾海水养殖的支柱产业之一^[8]。桑沟湾春季(5 月份)海带处于快速生长期和繁盛期,其对营养盐的大量吸收能与浮游植物的生长形成竞争,而夏季(8 月份)海带已基本完成收获,缓解了营养盐限制的压力,因而能促进浮游植物的生长繁殖。自 20 世纪 80 年代以来,已有学者对桑沟湾的营养盐^[9-10]、海草床^[11-12]和浮游植物^[13-14]等进行了深入的研究,但对于桑沟湾海带养殖收获前后 Chl. *a* 变化及其定点连续监测的研究报道较少。

为了查明海带收获前后叶绿素 *a* 的变化及其影响因素,本研究于 2014 年 5 月和 8 月对桑沟湾

收稿日期:2015-06-15 修回日期:2015-07-01

资助项目:贝藻养殖的固碳潜力与调控因子研究(2014A01YY01);“十二五”国家科技支撑计划(2011BAD13B06);国家自然科学基金(41276172)

通信作者:张继红,E-mail:zhangjh@ysfri.ac.cn

主要养殖区表、底层海水 Chl. *a* 浓度进行了 2 个航次的调查,分析了桑沟湾 2 个季节不同养殖区 Chl. *a* 的变化特征,同时结合所调查的温度、盐度、pH 和营养盐等分布特征,分析了桑沟湾 Chl. *a* 浓度与理化因子的关系,本研究有助于掌握桑沟湾海带收获前后 Chl. *a* 的变化特征及其影响机制,为多元养殖模式下养殖水域固碳潜力的计量及估算提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 调查站 位

于 2014 年 5 月和 8 月在桑沟湾进行春、夏 2 个航次的大面积调查。航次调查设置 2 条航线, B 为海带区 24 h 连续监测站点(图 1)。2 条调查船按照 2 条航线同时进行调查,共计 13 个站 位。2 条航线的航行线路分别为,航线 1:18-15-10-6-3-1-21;航线 2:19-14-11-5-4-22。航次内的调查时间为 9:00-11:00。

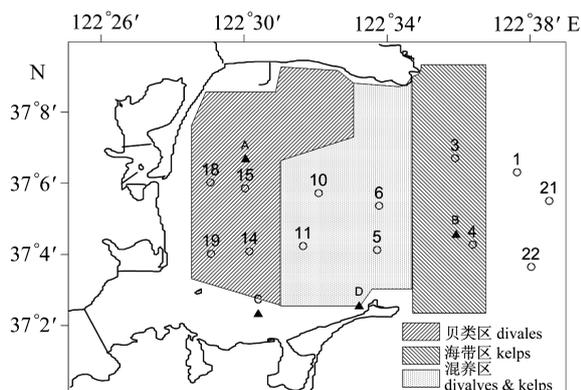


图 1 桑沟湾春季主要养殖区叶绿素 *a* 调查站 位设置 A 为贝类区监测站点, B 为海带区监测站 点, C 为网箱区监测站 点, D 为海草区监测站 点

Fig. 1 The survey stations for Chl. *a* in Sanggou Bay in spring

A, monitoring site of shellfish zone; B, monitoring site of kelp zone; C, monitoring site of cage zone; D, monitoring site of sea grasses zone

1.2 样品采集及测定

样品采集参照国家《海洋监测规范》进行^[15]。每个站 位分别采集表层和底层水样,昼夜连续站 水样采集白天每 2 h 取样 1 次,晚间每 3 h 取样 1 次。所有水样经 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后, 滴加 2 滴饱和碳酸镁溶液,过滤体积为 500 mL, 每个水样 3 个平行,滤膜于 -20 °C 冷冻保存并带

回实验室分析。样品的测定采用分光光度法^[6]。总氮、溶解无机氮(包括硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和 氨氮)、总磷、活性磷酸盐、硅酸盐的测定均依据 《GB17378.4-2007,海洋监测规范》进行分析 检测^[16]。

1.3 数据处 理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS17.0 进行统计学分析,ANOVA 单因子方差 分析检验组间差异, Pearson 相关分析和双侧显著 性检验叶绿素 *a* 与环境因子回归关系显著性。

2 结 果

2.1 环境参 数

春、夏季除盐度、pH 和溶解无机氮差异不显 著外,其余理化因子均差异显著(表 1)。春季水 温、总氮、硝酸盐、亚硝酸盐、总磷和硅酸盐均显著 低于夏季($P < 0.05$)。而春季氨氮和无机磷均 显著高于夏季($P < 0.05$)。

2.2 航线调查及连续观测

桑沟湾航线 1 中夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春 季(图 2)。春季航线 1 测得 Chl. *a* 浓度范围在 0.14 ~ 1.40 μg/L,表、底层均值分别为 (0.68 ± 0.45) 和 (0.47 ± 0.35) μg/L。除 1#站 位 Chl. *a* 浓度底层高于表层外,其余站 位表层 Chl. *a* 浓度均高于底层,即外海区底层 Chl. *a* 高于表层,贝类 区、混养区和藻类区表层 Chl. *a* 高于底层($P < 0.05$)。春季航线 1 中表、底层 Chl. *a* 浓度整体表 现出自湾内向湾外逐渐降低的趋势。夏季航线 1 测得 Chl. *a* 浓度范围在 0.65 ~ 5.72 μg/L,表、底 层均值分别为 (3.61 ± 1.54) 和 (2.88 ± 1.90) μg/L。贝类区 Chl. *a* 浓度底层高于表层,而海带 区和外海区表层 Chl. *a* 浓度均高于底层,夏季航 线 1 中表层 Chl. *a* 浓度分布趋势:海带区 > 混养 区 > 外海区 > 贝类区($P < 0.05$);而底层 Chl. *a* 分布趋势为:贝类区 > 混养区 > 海带区 > 外海区。

桑沟湾航线 2 中夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春 季(图 3)。春季航线 2 测得 Chl. *a* 浓度范围在 0.11 ~ 0.92 μg/L,表、底层均值分别为 (0.73 ± 0.34) 和 (0.53 ± 0.32) μg/L。除 22#站 位 Chl. *a* 浓度底层高于表层外,其余站 位表层 Chl. *a* 浓度均高于底层,即外海区底层 Chl. *a* 高于表层,贝类 区、混养区和藻类区表层 Chl. *a* 高于底层($P <$

0.05)。春季航线1中表、底层 Chl. *a* 浓度整体表现出自湾内向湾外逐渐降低的趋势。夏季航线2中 Chl. *a* 浓度范围在 1.30 ~ 5.69 $\mu\text{g/L}$, 表、底层均值分别为 (3.10 ± 1.75) 和 (3.44 ± 0.90) $\mu\text{g/L}$ 。贝类区 Chl. *a* 浓度底层高于表层, 而海带区表层

Chl. *a* 浓度高于底层, 夏季航线2中表层 Chl. *a* 浓度分布趋势: 海带区 > 混养区 > 外海区 > 贝类区 ($P < 0.05$); 而底层 Chl. *a* 分布趋势: 贝类区 > 混养区 > 海带区 > 外海区。

表1 桑沟湾春、夏季相关环境理化因子
Tab. 1 The physical and chemical factors in spring and summer in Sanggou Bay

理化因子 physical and chemical factors	2014年5月(春季) spring		2014年8月(夏季) summer	
	平均值 average value	范围 range	平均值 average value	范围 range
水温/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	14.45 ± 2.09^a	11.45 ~ 16.93	22.56 ± 1.59^b	20.00 ~ 25.70
盐度 salt	30.40 ± 0.53^a	29.23 ~ 30.95	30.68 ± 0.17^a	30.35 ~ 30.84
pH	8.18 ± 0.07^a	8.07 ~ 8.26	7.97 ± 0.24^a	7.19 ~ 8.16
总氮/ $(\mu\text{mol/L})$ TN	260.25 ± 131.29^a	24.73 ~ 512.33	671.97 ± 81.55^b	553.21 ~ 917.45
无机氮/ $(\mu\text{mol/L})$ DIN	12.25 ± 2.77^a	6.01 ~ 17.63	12.92 ± 2.63^a	7.45 ~ 17.29
硝酸盐/ $(\mu\text{mol/L})$ $\text{NO}_3^- - \text{N}$	3.68 ± 1.21^a	1.49 ~ 6.08	8.96 ± 2.30^b	4.29 ~ 13.9
亚硝酸盐/ $(\mu\text{mol/L})$ $\text{NO}_2^- - \text{N}$	0.34 ± 0.21^a	0.08 ~ 1.16	0.66 ± 0.20^b	0.19 ~ 0.89
氨氮/ $(\mu\text{mol/L})$ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	8.23 ± 2.37^a	3.81 ~ 12.39	3.30 ± 1.46^b	1.07 ~ 6.58
总磷/ $(\mu\text{mol/L})$ TP	0.61 ± 0.55^a	0.05 ~ 1.93	4.77 ± 3.92^b	2.68 ~ 22.98
无机磷/ $(\mu\text{mol/L})$ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.88 ± 0.13^a	0.64 ~ 1.21	0.37 ± 0.13^b	0.10 ~ 0.63
硅酸盐/ $(\mu\text{mol/L})$ $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$	1.47 ± 0.42^a	0.84 ~ 2.29	5.16 ± 2.39^b	1.82 ~ 12.20

注:表中同一行带有不同字母的数据表示相互之间差异显著($P < 0.05$),下同

Notes: the data with different letter in the same column at different feeding modes means significantly different with each other ($P < 0.05$), the same as blow

春季海带区 Chl. *a* 浓度变化范围在 0.24 ~ 0.95 $\mu\text{g/L}$, 均值为 (0.70 ± 0.19) $\mu\text{g/L}$, 海带区 Chl. *a* 浓度昼夜波动较小(图4)。而夏季海带区 Chl. *a* 浓度变化范围在 2.01 ~ 4.66 $\mu\text{g/L}$, 均值为 (3.04 ± 0.82) $\mu\text{g/L}$, 海带区 Chl. *a* 浓度昼夜波动较大。桑沟湾海带区夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春季($P < 0.05$)。

2.3 不同养殖区 Chl. *a* 变化

桑沟湾春季不同养殖区 Chl. *a* 浓度范围: 0.30 ~ 1.87 $\mu\text{g/L}$, 最高值出现在贝类区表层, 为 (1.41 ± 0.18) $\mu\text{g/L}$, 最低值出现在混养区底层,

为 (0.30 ± 0.12) $\mu\text{g/L}$ (图5)。桑沟湾夏季不同养殖区 Chl. *a* 浓度范围为 1.39 ~ 5.70 $\mu\text{g/L}$, 最高值出现在海带区表层, 为 (5.70 ± 0.02) $\mu\text{g/L}$, 最低值出现在外海区底层, 最低值为 (1.39 ± 0.94) $\mu\text{g/L}$ 。桑沟湾夏季不同养殖区 Chl. *a* 浓度均显著高于春季。春季桑沟湾不同区域硅磷比(Si/P)范围在 1.44 ~ 3.21, 氮磷比(N/P)范围在 9.98 ~ 14.62, 硅氮比(Si/N)范围在 0.10 ~ 0.32(表2)。夏季桑沟湾不同区域硅磷比(Si/P)范围在 11.06 ~ 22.57, 氮磷比(N/P)范围在 29.62 ~ 55.28, 硅氮比(Si/N)范围在 0.27 ~ 0.47。

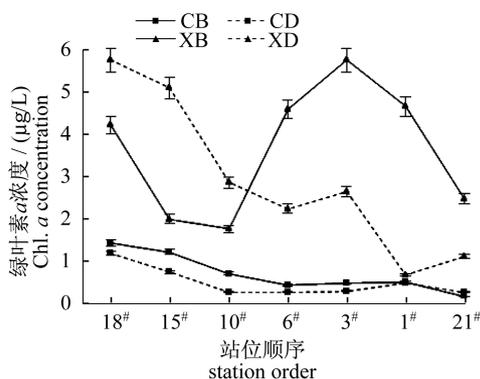


图 2 桑沟湾春、夏季航线 1 中表、底层叶绿素 *a* 浓度
CB 和 CD 分别为春季表层和春季底层, XB 和 XD 分别为夏季表层和夏季底层,下同

Fig. 2 The Chl. *a* concentration of surface and bottom layers for lane 1 in spring and summer in Sanggou Bay

CB, surface layer of spring; CD bottom layer of spring; XB, surface layer of summer; XD, bottom layer of summer, the same as below

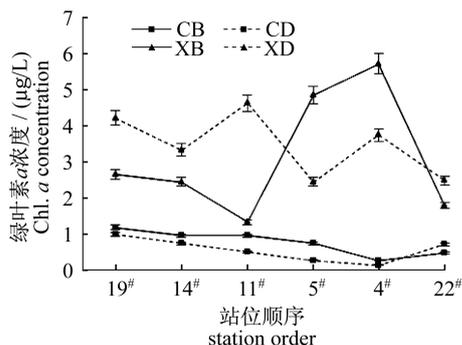


图 3 桑沟湾春、夏季航线 2 中
叶绿素 *a* 浓度

Fig. 3 The Chl. *a* concentration of surface and bottom layer for lane 2 in spring and summer in Sanggou Bay

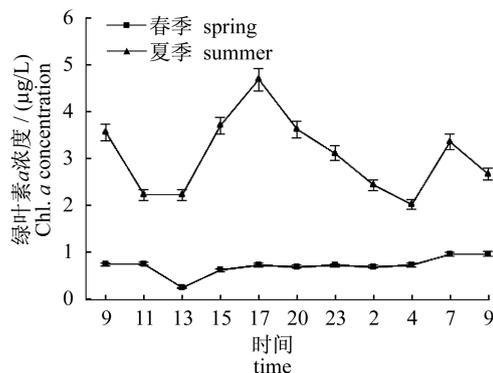


图 4 桑沟湾春、夏季海带区叶绿素 *a* 浓度
24 h 定点连续监测

Fig. 4 The continuous observation of Chl. *a* for 24 h from the kelp zone in spring and summer in Sanggou Bay

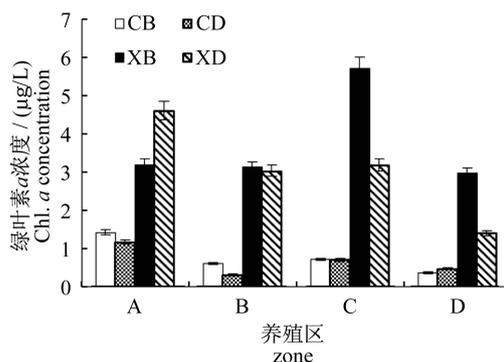


图 5 桑沟湾春、夏季不同养殖区
叶绿素 *a* 浓度均值变化

A 为贝类养殖区, B 为混养区, C 为海带养殖区, D 为外海区

Fig. 5 The change of Chl. *a* from the different culture zones in Sanggou Bay in spring and summer

A, shellfish zone; B, polyculture zone; C, kelp zone; D, outer site of the bay

表 2 桑沟湾春、夏季不同区域营养盐平均浓度与摩尔比

Tab. 2 Average concentration and mole ratio of nutrients in spring and summer in Sanggou Bay

调查站位 survey sites	季节 season	硅酸盐/($\mu\text{mol/L}$) $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$	溶解无机氮/($\mu\text{mol/L}$) DIN	磷酸盐/($\mu\text{mol/L}$) $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	硅磷比 ratio Si/P	氮磷比 ratio N/P	硅氮比 ratio Si/N
贝类养殖区 shellfish zone	C	2.57 ± 0.62	7.98 ± 2.15	0.80 ± 0.03	3.21	9.98	0.32
混养区 polyculture zone	X	7.90 ± 1.59	16.72 ± 5.48	0.35 ± 0.08	22.57	47.77	0.47
海带养殖区 kelp zone	C	1.52 ± 0.42	10.25 ± 2.84	0.91 ± 0.08	1.67	11.26	0.15
外海区 outer site of the bay	X	3.76 ± 1.75	13.75 ± 1.14	0.34 ± 0.12	11.06	40.44	0.27
	C	1.74 ± 0.42	7.66 ± 2.09	0.76 ± 0.05	2.29	10.08	0.23
	X	7.06 ± 1.13	17.69 ± 7.16	0.32 ± 0.07	22.06	55.28	0.40
	C	1.31 ± 0.13	13.30 ± 2.22	0.91 ± 0.07	1.44	14.62	0.10
	X	5.12 ± 1.90	12.44 ± 2.96	0.42 ± 0.09	12.19	29.62	0.41

注: DIN 为溶解无机氮; C 为春季; X 为夏季, 下同

Notes: DIN, dissolved inorganic nitrogen; C, spring; X, summer; the same as blow

2.4 Chl. *a* 与环境因子的相关性分析

桑沟湾春季表层 Chl. *a* 主要与温度、硅酸盐呈极显著正相关,与盐度呈极显著负相关,而底层 Chl. *a* 主要与温度呈显著正相关,与盐度呈显著

负相关(表 3)。桑沟湾夏季底层 Chl. *a* 与盐度呈显著正相关,除此之外,桑沟湾夏季表底层 Chl. *a* 与其余理化因子均无显著相关性。

表 3 桑沟湾春、夏季 Chl. *a* 与环境因子的 Pearson 相关性

Tab. 3 Pearson correlation analysis between Chl. *a* and environmental factors in spring and summer in Sanggou Bay

季节 season	水层 layer	Pearson	温度/℃ temperature	盐度 salt	pH	TN/ ($\mu\text{mol/L}$)	DIN/ ($\mu\text{mol/L}$)	NO_3^- - N/ ($\mu\text{mol/L}$)	NO_2^- - N/ ($\mu\text{mol/L}$)	TP/ ($\mu\text{mol/L}$)	PO_4^{3-} - P/ ($\mu\text{mol/L}$)	SiO_3^{2-} - Si/ ($\mu\text{mol/L}$)
C	B	correlations	0.804 **	-0.706 **	0.144	-0.216	-0.131	0.199	0.004	0.083	-0.436	0.853 **
		sig.	0.001	0.007	0.638	0.478	0.669	0.514	0.990	0.786	0.136	0.000
	D	correlations	0.567 *	-0.661 *	-0.337	0.292	0.324	0.066	0.210	0.160	-0.531	0.063
		sig.	0.043	0.014	0.260	0.333	0.280	0.831	0.491	0.602	0.062	0.873
X	B	correlations	-0.094	-0.037	-0.458	-0.275	0.030	-0.010	0.038	-0.332	-0.193	-0.054
		sig.	0.759	0.905	0.116	0.363	0.922	0.901	0.901	0.268	0.528	0.861
	D	correlations	-0.543	0.568 *	0.246	0.440	-0.374	-0.229	-0.241	-0.429	-0.522	-0.194
		sig.	0.055	0.043	0.418	0.132	0.208	0.451	0.428	0.132	0.067	0.525

注: B 和 D 分别为表层和底层,不同处理之间带有“*”表示差异显著,“**”表示差异极显著

Notes: B, surface layer; D, bottom layer, a single asterisk means significant correlation, and double asterisk means highly significant correlation

3 讨论

3.1 Chl. *a* 浓度的变化特征

桑沟湾三面环陆,湾口向东,水深 0 ~ 18 m,湾内平均水深 7 ~ 8 m,为典型的浅水半封闭海湾,各站位间的水深不一,底层深度变化幅度较大,近年来逐渐形成了由湾内向湾外依次排列的贝类养殖区、海带和贝类混养区、海带养殖区的多元养殖模式^[8,10]。而多元的养殖模式就必然会引起该海域 Chl. *a* 浓度的改变。桑沟湾海带的养殖与收获能通过影响湾内海水的营养盐浓度分布而引起 Chl. *a* 浓度的改变,通过分析 Chl. *a* 浓度的变化特征能够在一定程度上反映该海域的水质状况,从而为指导生产提供数据支持。本研究表明,桑沟湾夏季 Chl. *a* 浓度总体水平显著高于春季,且表层均高于底层,春季 Chl. *a* 浓度的整体趋势是从湾内向湾外逐渐递减的,与郝林华等^[4]研究结果相符合。桑沟湾春季贝类区牡蛎、扇贝等高密度的养殖,其摄食压力并未明显降低该区域叶绿素 *a* 的浓度(图 3),而混养区和海带区的海带处于高速生长阶段,吸收大量的营养盐,限制了该区域浮游植物对营养盐的吸收,使该区叶绿素 *a* 浓度降低,这说明桑沟湾春季营养盐的限制作用较贝类的摄食压力大,即上行控制 > 下行控制。研究还表明,夏季表层 Chl. *a* 块状分布明显,高值区出现在海带养殖区,低值区出现在贝类养

殖区,夏季底层 Chl. *a* 块状分布也较为明显,高值区出现在贝类区,低值区出现在外海区。说桑沟湾夏季海带已全部收获,使得混养区和海带区大片海域成为空闲海区,该海区的浮游植物缺少了营养盐的竞争而快速生长,使得该海区 Chl. *a* 浓度明显高于其他海区,即上行控制 > 下行控制。另外,夏季航次调查结果表明,2 条航线的 Chl. *a* 浓度从湾底到湾口变化很大,这可能与大面积走航时,因取样时间的差异而导致的监测误差有关。

桑沟湾海带养殖区 24 h 定点连续监测结果显示,海带养殖区夏季 Chl. *a* 浓度显著高于春季 ($P < 0.05$),春季 Chl. *a* 浓度昼夜波动较小,而夏季 Chl. *a* 浓度昼夜波动较大,可能因为春季海带区高密度的筏式养殖,阻碍了海带区的水体流动,影响水体交换,使得潮流作用对海带区 Chl. *a* 浓度的昼夜变化影响较弱,同时也阻碍了潮流作用对海带养殖区营养盐的输入与输出^[4],从而使 Chl. *a* 浓度的昼夜波动较小。另外,5 月份桑沟湾海带已具备上市规格(3 ~ 6 m),其高密度的养殖势必会影响海水的透光度,进而影响浮游植物的生长;而夏季海带收获后,海带养殖区则成为空闲海区,使得该区域水体交换情况好转,潮流能畅通无阻通过该海区,为该海区带来充足的营养盐,使得 Chl. *a* 浓度的昼夜波动较大,这在以往的研究中已证实^[17-18]。

3.2 影响 Chl. *a* 浓度变化的因素

桑沟湾春季水温、总氮、硝酸盐、亚硝酸盐、总磷和硅酸盐均显著低于夏季(表 1, $P < 0.05$)。桑沟湾春季海带处于高速生长阶段,吸收大量的营养盐,限制了该区域浮游植物对营养盐的吸收,使该区 Chl. *a* 浓度降低,而夏季海带已全部收获,使得混养区和海带养殖区大片海域成为空闲海区,该海区的浮游植物缺少了营养盐的竞争而快速生长,使得夏季 Chl. *a* 浓度明显高于春季,营养盐是制约海带区浮游植物生长繁殖的主要因素^[4,13]。N、P、Si 是海洋浮游植物必不可少的营养盐,由于不同海区的状况不同,以上几项营养盐都有可能成为浮游植物生长的限制因子^[19]。营养盐对于浮游植物生长的影响是迅速而灵敏的^[20],Justi 等^[21]提出系统评估何种营养为限制性元素的标准:当 $Si/N > 1$ 且 $N/P < 10$, N 是限制性元素;当 $Si/P > 22$ 且 $N/P > 22$, 则 P 是限制性元素;而当 $Si/P < 10$ 且 $Si/DIN < 1$ 时, 则 Si 是限制性元素。Fisher 等^[22]提出营养盐半饱和常数评价标准: $N = 2 \mu\text{mol/L}$; $P = 0.2 \mu\text{mol/L}$; $Si = 2 \mu\text{mol/L}$, 来判断浮游植物是否受到营养盐的限制。本研究结合这 2 种方法来判断桑沟湾海带养殖区的浮游植物是否受到营养盐的限制,结果表明,桑沟湾春季除贝类区外($Si > 2 \mu\text{mol/L}$),其他调查区域均存在硅限制,即 $Si/P < 10$, $Si/DIN < 1$ 且 $Si < 2 \mu\text{mol/L}$ (表 2)。而夏季不同调查区域 $DIN > 2 \mu\text{mol/L}$, $P > 0.2 \mu\text{mol/L}$, $Si > 2 \mu\text{mol/L}$, 因此,夏季桑沟湾不同调查区域营养盐充足,浮游植物的生长繁殖并未受到营养盐的限制。

研究已表明水体 Chl. *a* 浓度受水温、盐度、pH、营养盐和养殖活动等因素的影响^[19-22]。本研究发现桑沟湾春季表层水体 Chl. *a* 主要与温度、硅酸盐呈显著正相关,说明春季温度越高、硅酸盐浓度越高越有利于浮游植物的生长。研究已发现,桑沟湾浮游植物种类主要由硅藻类(74 种)和甲藻类(11 种)组成,硅藻是绝对优势种(春季平均为 63.0×10^4 个/ m^3)^[23],而硅酸盐是硅藻的必需营养元素^[24]。硅藻喜低温,最适合的温度通常低于 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[25]。而桑沟湾春季水温在 $11.45 \sim 16.93 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 1),是硅藻生长的理想温度,因此,桑沟湾春季海带养殖区硅酸盐可能是该海域浮游植物生长的主要限制因子,这与已有的推测

一致^[25-27]。本研究还发现,桑沟湾夏季底层 Chl. *a* 与盐度呈显著正相关,而与其他因子均无显著相关性,说明在一定范围内,夏季底层高盐水域有利于浮游植物的生长^[28],而其他理化因子并不是影响桑沟湾 Chl. *a* 生长繁殖的主要限制性因素。

另外,水体混浊度、潮流和潮汐作用也是影响 Chl. *a* 变化及其分布的重要因素,在今后的研究中应增加对桑沟湾海域水体混浊度、潮流等数据的监测。总体看来,桑沟湾海带收获前后 Chl. *a* 的浓度变化及分布受温度、硅酸盐、盐度、养殖环境状况和水文环境的共同影响。

参考文献:

- [1] Sara G, Mazzola A. The carrying capacity for Mediterranean bivalve suspension feeders: evidence from analysis of food availability and hydrodynamics and their integration into a local model [J]. Ecological Modelling, 2004, 179 (3): 281 - 296.
- [2] Liu Z L, Chen J F, Liu Y L, et al. The size - fractionated chlorophyll a concentration and primary productivity in the Bering Sea in the summer of 2008 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33 (3): 148 - 157. [刘子琳, 陈建芳, 刘艳岚, 等. 2008 年夏季白令海粒度分级叶绿素 a 和初级生产力. 海洋学报, 2011, 33 (3): 148 - 157.]
- [3] Rueda J L, Smaal A C, Scholten H. A growth model of the cockle (*Cerastoderma edule* L.) tested in the Oosterschelde estuary (The Netherlands) [J]. Journal of Sea Research, 2005, 54 (4): 276 - 298.
- [4] Hao H L, Sun P X, Hao J M, et al. The spatial and temporal distribution of chlorophyll - a and its influencing factors in Sanggou Bay [J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21 (2): 338 - 345. [郝林华, 孙丕喜, 郝建民, 等. 桑沟湾海域叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素研究. 生态环境学报, 2012, 21 (2): 338 - 345.]
- [5] Li B, Gu W L, Jin Y, et al. Distribution of chlorophyll - a and primary productivity in Yantai Sishili Bay [J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33 (2): 19 - 23. [李斌, 谷伟丽, 靳洋, 等. 烟台四十里湾叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. 渔业科学进展, 2012, 33 (2): 19 - 23.]
- [6] Sun X X, Sun S, Zhang Y S, et al. Long - term changes of chlorophyll - a concentration and primary productivity in the Jiaozhou Bay [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2011, 42 (5): 654 - 661. [孙晓霞, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾叶绿素 a 及初级生产

- 力的长期变化. 海洋与湖沼, 2011, 42 (5):654 - 661.]
- [7] Wen F, Sun X X, Zheng S, *et al.* Spatial and seasonal variations of chlorophyll a and primary productivity in spring and summer in the Yellow sea and east China sea [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2012, 43 (3): 438 - 444. [文斐, 孙晓霞, 郑珊, 等. 2011 年春、夏季黄、东海叶绿素 a 和初级生产力的时空变化特征. 海洋与湖沼, 2012, 43 (3): 438 - 444.]
- [8] Fang J G, Sun H L, Kuang S H, *et al.* Assessing the carrying capacity of Sanggou Bay for culture of kelp *Laminaria Japonica* [J]. *Marine fisheries reseach*, 1996, 17 (2): 7 - 18. [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究, 1996, 17 (2): 7 - 18.]
- [9] Sun S, Liu S M, Ren J L, *et al.* Distribution features of nutrients and flux across the sediment - water interface in the Sanggou Bay [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32 (6): 108 - 117. [孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物 - 水界面扩散通量研究. 海洋学报, 2010, 32 (6): 108 - 117.]
- [10] Zhang J H, Wang W, Han T T, *et al.* The distributions of dissolved nutrients in spring of Sungo Bay and potential reason of outbreak of red tide [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36 (1): 132 - 139. [张继红, 王巍, 韩婷婷, 等. 桑沟湾春季营养盐分布特征及赤潮暴发诱因. 水产学报, 2012, 36 (1): 132 - 139.]
- [11] Gao Y P, Fang J G, Tang W, *et al.* Seagrass meadow carbon sink and amplification of the carbon sink for eelgrass bed in Sanggou Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34 (1): 17 - 21. [高亚平, 方建光, 唐望, 等. 桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算. 渔业科学进展, 2013, 34 (1): 17 - 21.]
- [12] Liu B J, Zhou Y, Liu X J, *et al.* Ecological characteristics research of *Zostera marina* L. in Sanggou Bay [J]. *Marine Sciences*, 2013, 37 (1): 42 - 48. [刘炳舰, 周毅, 刘旭佳, 等. 桑沟湾楮岛近岸海域大叶藻生态学特征的基础研究. 海洋科学, 2013, 37 (1): 42 - 48.]
- [13] Li C L, Zhang Y S, Sun S, *et al.* Species composition, density and seasonal variation of phytoplankton in Sanggou Bay, China [J]. *Progress in Fisheries Sciences*, 2010, 31 (4): 1 - 8. [李超伦, 张永山, 孙松, 等. 桑沟湾浮游植物种类组成、数量分布及其季节变化. 渔业科学进展, 2010, 31 (4): 1 - 8.]
- [14] Mu J D, Dong W, Chen B J, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in Sanggou Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, 30 (3): 91 - 96. [慕建东, 董玮, 陈碧鹃, 等. 桑沟湾浮游植物生态特征. 渔业科学进展, 2009, 30 (3): 91 - 96.]
- [15] GB 17378.7—2007. The specification for marine monitoring—part 7: Ecological survey for offshore pollution and biological monitoring [S]. Beijing: China Standard Press, 2008. [GB 17378.7—2007. 海洋监测规范第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [16] GB 17378.4—2007. The specification for marine monitoring—part 4: Seawater analysis [S]. Beijing: China Standard Press, 2008. [GB 17378.4—2007. 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [17] Jiang Z J, Fang J G, Men Q, *et al.* Studies on the interaction between shellfish long - line culture and environment in Sungo Bay [J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 1 (2): 23 - 29. [蒋增杰, 方建光, 门强, 等. 桑沟湾贝类筏式养殖与环境相互作用研究. 南方水产, 2006, 2 (1): 23 - 29.]
- [18] Li T J, Guo Y M, Xu H X, *et al.* Analysing - the Change of the Hydrodynamic Condition by Suspension Aquaculture in Shore Sea [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science Edition*, 2012, 31 (4): 329 - 334. [李铁军, 郭远明, 徐汉祥, 等. 近海筏式养殖造成的水文动力条件变化分析. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2012, 31 (4): 329 - 334.]
- [19] Zou F R. Response of Classified Chlorophyll to Changes of Concentrations of Nutrients in Bohai Bay [D]. Tianjin: Tianjin University. 2009. [邹芳睿. 渤海湾分级叶绿素对营养盐浓度变化的响应. 天津: 天津大学.]
- [20] Uye S. Replacement of large copepods by small ones with eutrophication of embayments; cause and consequence [J]. *Ecology and Morphology of Copepods*, 1994, 102: 513 - 519.
- [21] Justi C D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river - dominated coastal waters; stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40 (3): 339 - 356.
- [22] Fisher T R, Peele E R, Ammerman J W, *et al.* Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake

- Bay [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 82 (1): 51 - 63.
- [23] Li C L, Zhang Y S, Sun S, *et al.* Species composition, density and seasonal variation of phytoplankton in Sanggou Bay, China [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31 (4): 1 - 8. [李超伦, 张永山, 孙松, 等. 桑沟湾浮游植物种类组成、数量分布及其季节变化. *渔业科学进展*, 2010, 31 (4): 1 - 8.]
- [24] Liang J R, Chen D D, Gao Y H, *et al.* A review on the process and mechanism of marine diatom silica structure formation [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(5): 1 - 8. [梁君荣, 陈丹丹, 高亚辉, 等. 海洋硅藻硅质细胞壁结构的形成机理研究概述. *海洋学报*, 2010, 32(5): 1 - 8.]
- [25] Wasmund N, Tuimala J, Suikkanen S, *et al.* Long - term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 87 (2): 145 - 159.
- [26] Sun S, Liu S M, Ren J L, *et al.* Distribution features of nutrients and flux across the sediment - water interface in the Sanggou Bay [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32 (6): 108 - 117. [孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物 - 水界面扩散通量研究. *海洋学报*, 2010, 32 (6): 108 - 117.]
- [27] Qu K M, Song Y L, Xu Y, *et al.* Experiment on nutrient limitations in cultured areas of Sanggou Bay in situ in spring and summer [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27 (2): 124 - 128. [曲克明, 宋云利, 徐勇, 等. 桑沟湾养殖水域春季和夏季营养限制的现场实验. *海洋环境科学*, 2008, 27 (2): 124 - 128.]
- [28] 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. [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. *海洋与湖沼*, 2012, 43 (3): 419 - 428.]

Variation of Chl. *a* concentration and its control factors pre-and-post-the-harvest of kelp in Sanggou Bay

WU Wenguang, ZHANG Jihong*, WANG Wei, FANG Jinghui, LIU Yi, NIU Yali, GAO Zhenkun

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Yellow Sea Fisheries Research Institute,

Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Two sampling transects for chlorophyll *a* (Chl. *a*) between inner bay and the mouth of bay were performed and one sampling station in kelp zone was daily sampled once every 2 hours in May and August, 2014 in Sanggou Bay. The spatial distribution and diurnal variation characteristics of Chl. *a* were studied, and the correlations between Chl. *a* concentration and physical and chemical factors were analyzed by combining with the environmental factors such as temperature, salt, pH, nutrients and so on in Sanggou Bay, the change of Chl. *a* and its influencing factor were discussed pre-and-post-the-harvest of kelp in Sanggou Bay. (1) For the voyage survey, Chl. *a* concentration was significantly higher in summer than in spring in Sanggou Bay. In spring, the average Chl. *a* concentration in the surface layer and the bottom layer were $0.67 \pm 0.39 \mu\text{g/L}$, $0.50 \pm 0.31 \mu\text{g/L}$, respectively, and Chl. *a* concentration was higher in the surface layer than in the bottom layer. The general trend of Chl. *a* concentration was decreasing from inner bay to the outside of the bay in surface layer in spring. In summer, the average Chl. *a* concentrations in the surface layer and the bottom layer were $3.39 \pm 1.53 \mu\text{g/L}$ and $3.12 \pm 1.43 \mu\text{g/L}$, respectively, and Chl. *a* concentration was higher in the surface layer than in the bottom layer. The kelp area showed the highest values Chl. *a* concentrations and shellfish area showed the lowest values in the surface layer in summer. The kelp area and shellfish area showed the highest values Chl. *a* concentrations and outer site of the bay showed the lowest values in the bottom layer in summer. (2) The results of continuous observation showed that Chl. *a* concentration was in the range of $0.24 - 0.95 \mu\text{g/L}$, and the average value were $0.70 \pm 0.19 \mu\text{g/L}$ in spring in kelp zone. There was less fluctuation for Chl. *a* concentration day and night in spring. In summer, Chl. *a* concentration was in the range of $2.01 - 4.66 \mu\text{g/L}$, and the average value were $3.04 \pm 0.82 \mu\text{g/L}$ in kelp zone. There was greater fluctuation for Chl. *a* concentration day and night in summer. The Chl. *a* concentration in spring was significantly higher than those in summer. And the nutrient concentration, Si/P, N/P and Si/N ratio in spring were significantly lower than that in the summer. (3) There was a significantly positive correlation between Chl. *a* concentration and temperature or silicate concentration in the surface layer in spring. And Chl. *a* was significantly positive correlation with salinity in the bottom layer in summer. The distribution of Chl. *a* is commonly affected by temperature, silicate, salinity, marine cultures and hydrological environment pre-and-post-the-harvest of kelp in Sanggou Bay. The multi-trophic aquaculture mode of bivalves and seaweeds is important influence factor of Chl. *a* distribution and variation in Sanggou Bay.

Key words: Chl. *a*; kelp zone; temperature; nutrient; sanggou bay

Corresponding author: ZHANG Jihong, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn