

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180317001

http://www.yykxjz.cn/

栾青杉, 孙坚强, 乔芮, 王俊, 臧有才, 张媛. 北黄海獐子岛海域浮游植物沉降通量的周年变化. 渔业科学进展, 2018, 39(4): 01-08

Luan QS, Sun JQ, Qiao R, Wang J, Zang YC, Zhang Y. Annual variations in the phytoplankton settling flux in the northern Yellow Sea off Zhangzi Island. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(4): 01-08

## 北黄海獐子岛海域浮游植物沉降通量的周年变化\*

栾青杉<sup>1,2</sup> 孙坚强<sup>1</sup> 乔芮<sup>1</sup> 王俊<sup>1,3①</sup> 臧有才<sup>4</sup> 张媛<sup>4</sup>

(1. 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 4. 獐子岛集团股份有限公司 大连 116001)

**摘要** 于 2011 年 9 月至 2012 年 11 月, 在北黄海獐子岛邻近海域, 利用德国 MST24 型沉积物捕集器, 开展了 5 d 期采样频率的浮游植物组成及其沉降通量的周年变化研究。71 份沉降样品共记录浮游植物 51 属 93 种, 其中硅藻 38 属 66 种, 是主要的沉降类群。沉降优势种主要有具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、离心列海链藻(*Thalassiosira excentrica*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)、辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus*)、八幅辐环藻(*Actinocyclus octonarius*)等硅藻物种, 以及小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*)、八幅硅鞭藻(*Octactis octonaria*)等硅鞭藻物种。浮游植物沉降通量变化在  $(6.1\sim 169)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均  $39.4\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 在春、秋季各出现 1 个高通量时段, 春季峰值主要为硅藻贡献, 而秋季峰值则由硅藻和硅鞭藻共同形成。沉降浮游植物作为獐子岛底播虾夷扇贝的重要饵料, 其种类组成及沉降通量的周年变化, 与獐子岛海域虾夷扇贝的底播、生长时节相关, 以具槽帕拉藻、海链藻、圆筛藻等硅藻属种为主的食物来源和结构是扇贝重要的饵料基础。旨在通过浮游植物沉降的时间序列研究, 查明獐子岛底播虾夷扇贝的饵料组成及其通量水平的周年变化特征, 为该水域可持续的底播养殖提供基础资料和参考依据。

**关键词** 浮游植物; 沉降通量; 周年变化; 獐子岛; 虾夷扇贝

**中图分类号** S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)04-0001-08

在海洋生态系统中, 浮游植物的初级生产过程通常处于真光层以内, 而通过沉降作用输出真光层的一部分初级生产常被认为是输出生产, 其通量大小、季节变化等特征, 将直接影响到海洋生物地球化学过程, 以及以输出生产为食物源的底栖生物(Tallberg *et al.*, 1998)。海洋对大气 CO<sub>2</sub> 的调节主要是通过海洋生物泵过程来完成, 而沉降颗粒物是认识和表征这一过程变化的有力证据, 其来源、组成、季节变化和受控因

素的时间序列研究, 对于全球海洋通量以及气候变化的研究有着重要的意义(陈建芳等, 1996)。

水体产生的颗粒物主要以沉降、平流等输运过程达到海底表面, 而浅海风浪、潮汐以及生物扰动等作用产生的底表沉积物再悬浮过程, 又给底层颗粒物沉降通量和组成带来影响(张岩松等, 2004)。獐子岛海域位于北黄海, 是我国最大的虾夷扇贝底播养殖基地, 底播双壳贝类能高效地滤食底层浮游植物和悬浮

\* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(20603022015017-1; 20603022011001)和“泰山学者”建设工程专项共同资助[This work was supported by the Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes (20603022015017-1; 20603022011001) and the Special Funds for Taishan Scholar Project of Shandong Province]. 栾青杉, E-mail: luanqs@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 王 俊, 研究员, E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-03-17, 收修改稿日期: 2018-05-25

颗粒物, 并通过下行控制作用改变浮游植物的群落结构, 进一步刺激表层浮游植物的生长, 形成很好的渔业碳汇功能(张继红等, 2007; 唐启升, 2011)。獐子岛所处的整个长海县海域, 浮游植物呈现春秋高、夏冬季低的季节变化特征, 优势种以圆筛藻属(*Coscinodiscus*)、角毛藻属(*Chaetoceros*)和海线藻属(*Thalassionema*)等硅藻属种为主(王鉴等, 1995), 此外浮游植物的自然演替为该海域海珍品(如扇贝)的生长与繁殖提供了丰富的天然饵料(徐铭等, 1994)。本研究于 2011~2012 年在獐子岛扇贝底播区中部海域, 通过沉积物捕集器的布放与回收, 对浮游植物沉降进行了时间序列的研究, 旨在查明扇贝饵料来源、组成及其通量水平的周年变化特征, 为该海域虾夷扇贝的底播养殖提供基础资料和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 捕集器布放及样品采集

本研究使用獐子岛集团股份有限公司“科研 19”调查船, 利用德国 Hydro-Bios 公司生产的 MST24 型多通道沉积物捕集器, 在獐子岛虾夷扇贝底播养殖区中部海域进行了采样(图 1), 开展了浮游植物沉降的时间序列研究。布放方式为由重物、锚链、钢缆、捕集器、尼龙绳和浮球组成的固定锚系统, 布放区域为 39.0°N、122.9°E, 水深 42 m, 布放深度 35 m。收集筒开口面积 0.015 m<sup>2</sup>, 250 ml 样品杯 24 个, 采样频率为 5 d/杯, 布放时间段分别为 2011 年 9 月 12 日至 2012 年 1 月 10 日、2012 年 2 月 28 日至 2012 年 6 月 27 日和 2012 年 7 月 12 日至 2012 年 11 月 9 日, 布放前于样品杯中加入 0.2 μm 过滤原位海水, 并分别按照 5% 体积浓度和 0.5% 质量分数添加硼酸-福尔马林缓冲液和 NaCl 进行固定保存, 第一阶段最后一份样品因收集筒脱落未采集到, 返厂维修用时 30 d。3 次布放和回收累计获取 71 份捕集器沉降样品, 秋季(9 月、10 月、11 月)、冬季(12 月、1 月、2 月)、春季(3 月、4 月、5 月)和夏季(6 月、7 月、8 月)分别采集到 30、8、18 和 15 份样品。此外, 在捕集器布放与回收期间, 使用“科研 19”调查船于每月中旬同步进行了水温、浮游植物、叶绿素 *a* 和初级生产力的调查。

### 1.2 样品镜检及数据分析

捕集器样品于实验室内进行分样, 亚样品(sub-samples)使用德国 Hydro-Bios 公司浮游植物计数框, 在光学倒置显微镜(COIC IBE2000)160 倍率下进行沉降浮游植物的物种鉴定和细胞丰度统计。物种分类

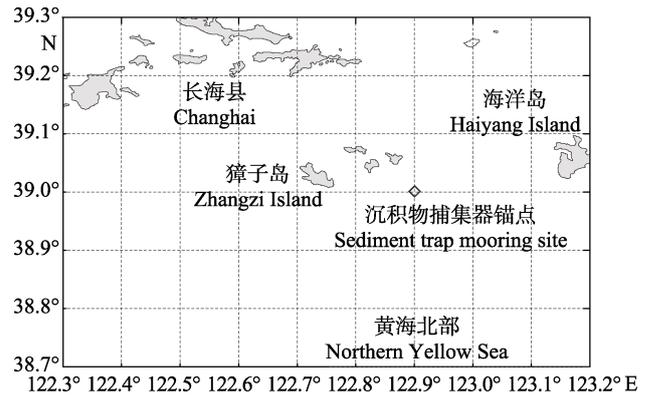


图 1 北黄海獐子岛海域沉积物捕集器布放点

Fig.1 Deployment site of the sediment trap in the Northern Yellow Sea off the Zhangzi Island

主要依据形态学差异, 并参考已有分类标准(金德祥等, 1965; Tomas, 1997)。沉降浮游植物的物种丰富度、多样性、均匀度和优势度, 分别采用 Margalef 指数、Shannon-Weaver 指数、Pielou 指数和 Dufrene-Legendre 指数进行计算, 具体公式参考文献(张雪等, 2016), 本研究选取优势度大于 0.02 的物种为优势种。

## 2 结果

### 2.1 沉降浮游植物物种组成

2011 年 9 月至 2012 年 11 月之间, 捕集器沉降样品共计鉴定浮游植物 51 属 93 种(含变种), 其中硅藻 38 属 66 种, 甲藻 10 属 23 种, 硅鞭藻 2 属 3 种, 针胞藻(*Raphidophyceae*)1 种。硅藻占到了全部样品出现物种数的 70.6%~96.6%(平均 84.6%), 是沉降浮游植物中的主要类群, 角毛藻属、圆筛藻属和海链藻属(*Thalassiosira*)分别出现了 10 种、9 种和 5 种。甲藻平均仅占到了各样品中总物种数的 8.8%, 原甲藻属(*Prorocentrum*)、原多甲藻属(*Protoperidinium*)和角藻属(*Tripos*: *Ceratium* 和 *Neoceratium* 的同属异名)各出现了 4 种、8 种和 3 种。

从沉降浮游植物的优势种组成来看(表 1), 优势种主要由硅藻和硅鞭藻组成, 甲藻全年都未在沉降浮游植物中形成优势。优势度大于 0.02 的物种中, 硅藻有具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)、离心列海链藻(*Thalassiosira excentrica*)、八幅辐环藻(*Actinocyclus octonarius*)、六幅辐裯藻(*Actinoptychus senarius*)、琼氏圆拱形藻(*Coscinodiscopsis jonesiana*)、辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus*)和印度鼻状藻(*Proboscia indica*), 硅鞭藻有小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*)和八幅硅鞭藻(*Octactis octonaria*)。

表 1 北黄海獐子岛海域沉降浮游植物优势种组成  
Tab.1 Dominant taxa composition of settling phytoplankton in the Northern Yellow Sea off the Zhangzi Island

类群 Group	中文名 Chinese name	拉丁文名 Latin name	出现频率(%) Percentage of occurrence (%)	优势度 Dominance
硅藻	八幅辐环藻	<i>Actinocyclus octonarius</i> Ehrenberg	100	0.091
Diatom	六幅辐环藻	<i>Actinocyclus senarius</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	100	0.059
	琼氏圆拱形藻	<i>Coscinodiscopsis jonesiana</i> (Greville) E.A.Sar & I.Sunesen	100	0.029
	圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> spp.	60.6	0.002
	蛇目圆筛藻	<i>Coscinodiscus argus</i> Ehrenberg	84.5	0.004
	星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg	100	0.011
	格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i> L.F.Gough	80.3	0.005
	辐射圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i> Ehrenberg	100	0.026
	细弱圆筛藻	<i>Coscinodiscus subtilis</i> Ehrenberg	76.1	0.003
	威氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailiesii</i> Gran & Angst	100	0.007
	矮小短棘藻	<i>Detonula pumila</i> (Castracane) Gran	40.8	0.002
	布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i> (T.West) Grunow	97.2	0.111
	斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle	56.3	0.005
	舟形藻	<i>Navicula</i> spp.	76.1	0.001
	具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve	100	0.319
	羽纹藻	<i>Pinnularia</i> spp.	93.0	0.003
	斜纹藻	<i>Pleurosigma</i> spp.	100	0.016
	印度鼻状藻	<i>Proboscia indica</i> (H.Peragallo) Hernández-Becerril	84.5	0.025
	海链藻	<i>Thalassiosira</i> spp.	87.3	0.022
	离心列海链藻	<i>Thalassiosira excentrica</i> (Ehrenberg) Cleve	100	0.091
	鼓胀海链藻	<i>Thalassiosira gravida</i> Cleve	71.8	0.006
	细海链藻	<i>Thalassiosira leptopus</i> (Grunow) Hasle & G.Fryxell	67.6	0.005
硅鞭藻	小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg	100	0.062
Silicoflagellate	八幅硅鞭藻	<i>Octactis octonaria</i> (Ehrenberg) Hovasse	74.6	0.034

## 2.2 沉降通量的周年变化

研究期间, 浮游植物沉降通量变化在 $(6.1\sim 169)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均 $39.4\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 峰值出现在 2012 年秋初 9 月上旬, 其次为春季上中旬。秋季峰值主要由硅藻和硅鞭藻贡献, 而春季峰值则主要为硅藻贡献。硅藻沉降通量变化在 $(5.6\sim 154)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均 $34.9\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 周年变化趋势与总通量相一致(图 2), 硅藻通量占到了总通量的 37.5%~99.6% (平均 88.6%), 对沉降浮游植物的贡献最大。甲藻沉降通量及其对总通量的贡献分别为 $0.22\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d 和 0.84%, 周年贡献较小, 春末至秋初甲藻沉降通量相对较高, 甲、硅藻通量比亦出现相同的趋势。硅鞭藻沉降通量变化在 $(0.12\sim 28.5)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均 $4.3\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 峰值出现在秋季, 2011 年秋季峰值从 9 月中旬持续到 10 月下旬, 2012 年秋季峰值出现在 9 月上旬, 硅鞭藻在总通量中的比例介于 0.35%~

62.2%之间, 平均为 10.5%, 主要由小等刺硅鞭藻和八幅硅鞭藻贡献。

从优势种沉降通量来看, 具槽帕拉藻通量变化在 $(0.31\sim 88.3)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均 $12.6\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 占到总通量的 2.8%~67.8% (平均 29.8%), 为贡献最大的优势种, 其高通量时段从夏季 7 月下旬持续到秋季 9 月下旬(图 3)。海链藻通量变化在 $(1.8\sim 17.3)\times 10^6$  cells m<sup>2</sup>d, 平均 $5.3\times 10^6$  cells m<sup>2</sup>d, 占到总通量的 5.2%~33.8% (平均 14.6%), 对总通量的贡献亦较高, 高通量时段出现在 2012 年秋季上旬和春季 3 月中旬至 4 月上旬。布氏双尾藻在春季对总通量的贡献为全年最高, 其春季通量为 $(0.91\sim 56.3)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 平均占到春季总通量的 32.9%。八幅辐环藻变化在 $(0.4\sim 15.0)\times 10^6$  cells m<sup>2</sup>d, 平均 $3.6\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 对总沉降通量的贡献主要在冬季, 平均高达 24.7%。圆筛藻、六幅辐环藻和琼氏圆拱形藻的周年平均通量分别为 $(2.5、2.3$  和  $1.1)\times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, 其对总通量的贡献周年平均分别为

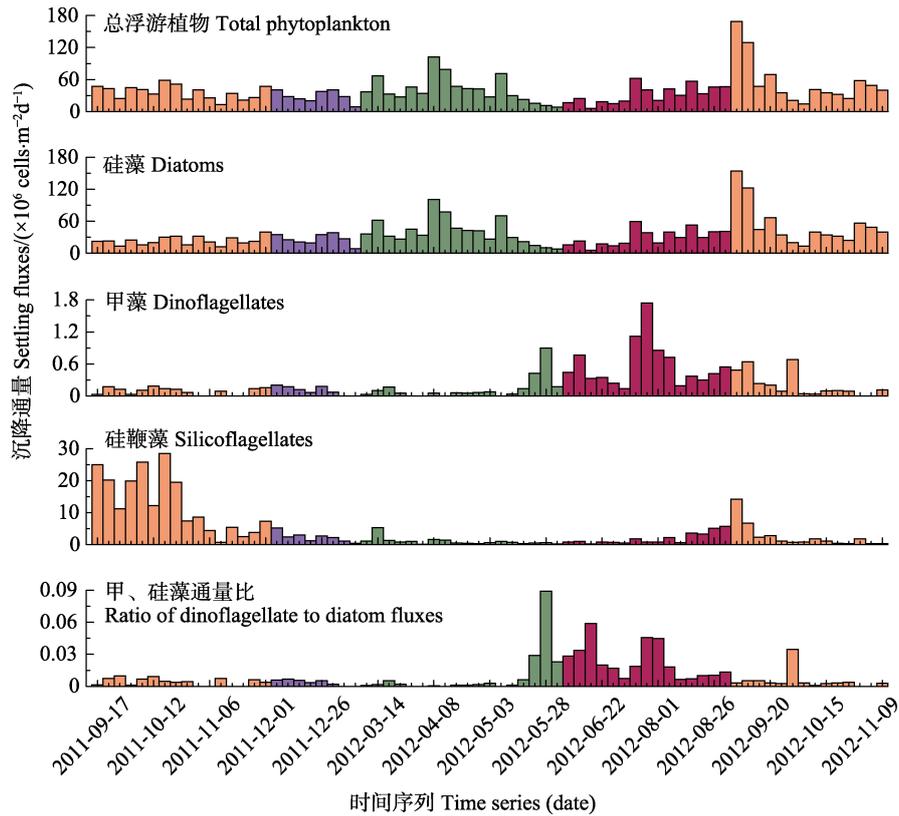


图 2 浮游植物沉降通量的周年变化

Fig.2 Annual variations on the settling fluxes of phytoplankton

7.0%、5.9%和 3.3%。印度鼻状藻的通量高峰时段亦出现在春季,平均达到  $3.6 \times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d,且能平均占到总通量的 9.1%。小等刺硅鞭藻和八幅硅鞭藻的周年平均通量分别为(2.4 和 1.8)×10<sup>6</sup> cells/m<sup>2</sup>d,其对总通量的贡献周年平均分别为 6.1%和 4.4%。

### 2.3 沉降浮游植物多样性的变化

从沉降浮游植物的多样性水平来看(图 4),物种丰富度 Margalef 指数变动在 1.16~2.35 之间(平均 1.61),丰富度较高的时段出现在 5 月下旬至 7 月下旬,平均高达 2.07。物种多样性 Shannon-Weaver 指数变动在 1.95~4.09 之间(平均 3.08),冬季多样性水平最好,平均高达 3.37,其次为春季的 3.17,夏、秋季分别为 3.13 和 2.91。物种均匀度 Pielou 指数的变化趋势与多样性的变化趋势相一致,变动在 0.43~0.80 之间(平均 0.64),冬季沉降浮游植物的均一性最好(平均 0.71),春、夏、秋三季分别为 0.65、0.63 和 0.61。

### 2.4 捕集器邻近水域同期海表温度和初级生产力

从捕集器布放和回收期间邻近水域海表温度和初级生产力的同期变化来看(图 5),海表温度变化在 1.72℃~25.5℃之间(平均 12.8℃),最高值和最低值分别出现在夏季的 8 月和冬季的 2 月。初级生产力变化

在 96.3~1045 mgC/m<sup>2</sup>d(平均 384.9 mgC/m<sup>2</sup>d),最大值出现在春季的 3 月,进入 4 月、5 月后逐渐递减,整个春季捕集器邻近水域初级生产力水平较高,平均达到 902.1 mgC/m<sup>2</sup>d。

## 3 讨论

### 3.1 獐子岛海域浮游植物周年沉降特征

北黄海自然水体中浮游植物群落常呈现温带海区典型的“双峰型”特征,在上下半年(常为春、秋季)各出现 1 个峰值(俞建銮等, 1993)。在长海县邻近海域,浮游植物亦出现春、秋季 2 个丰度高值,春季以硅藻物种为主,进入夏季甲藻开始形成优势(董婧等, 1999)。而在高强度养殖水域,丰度高峰仅出现在春季 3 月,夏末秋初浮游植物常由于摄食压力而受到抑制(付成东等, 2012)。本研究从獐子岛海域浮游植物沉降总通量的周年变化趋势来看,与长海县海域和北黄海水体浮游植物丰度的季节变化趋势是一致的,5 d 分辨率的沉降通量显示春季高峰从初春一直持续到春末,而秋季的峰值尽管比春季要高,但是持续时间仅有 10 d 左右,因此整体来看,春季水体浮游植物的持续性旺发对沉降通量的贡献较大,且以硅藻的沉降为主。

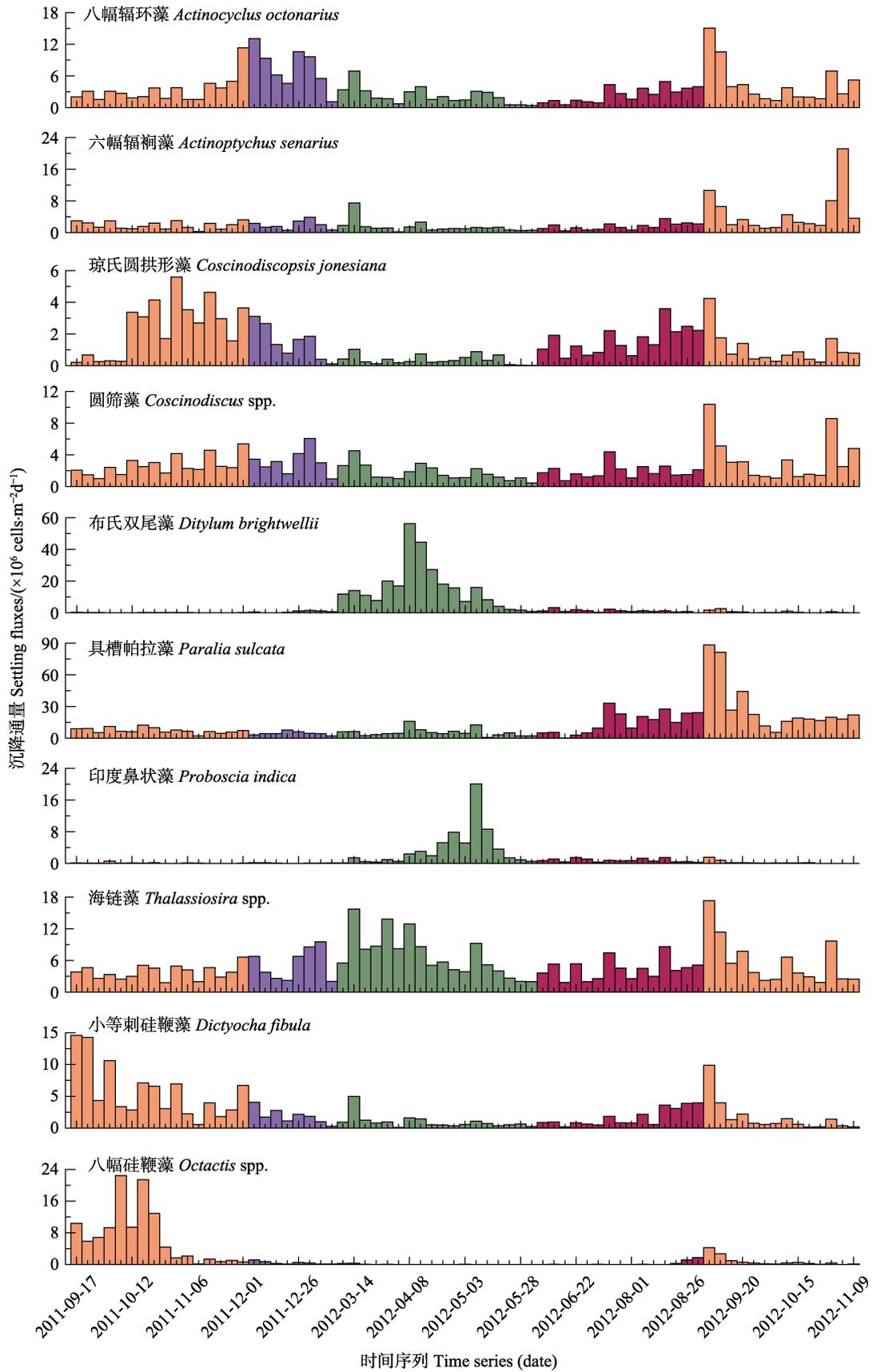


图 3 优势种沉降通量的周年变化  
Fig.3 Annual variations on the settling fluxes of dominant taxa

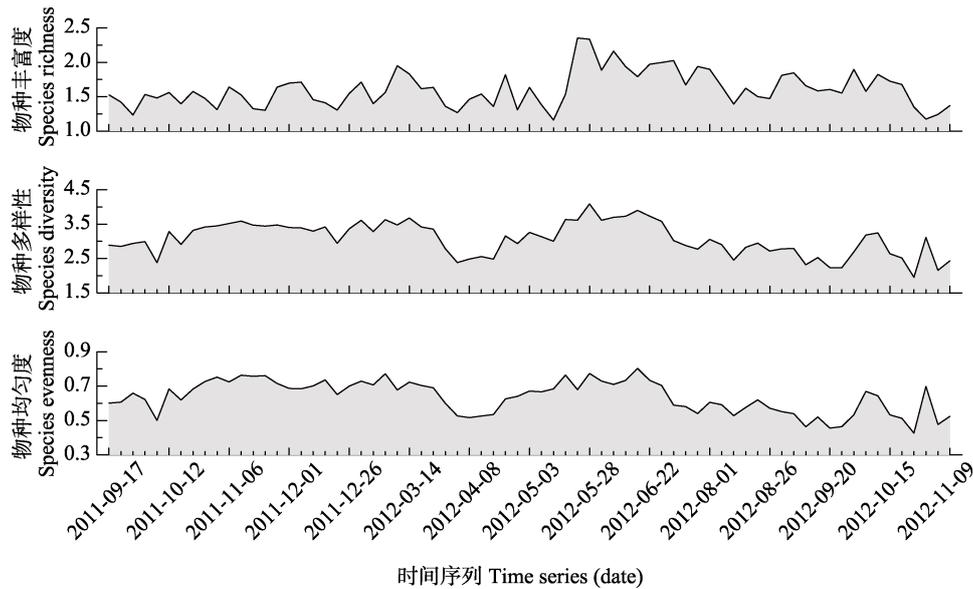


图 4 沉降浮游植物多样性的周年变化

Fig.4 Annual variations on the diversities of settling phytoplankton

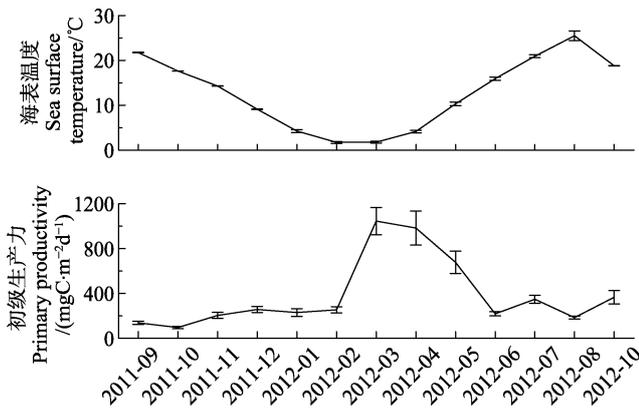


图 5 捕集器邻近水域海表温度和初级生产力的同期变化  
Fig. 5 Variations on sea surface temperature and primary productivity in adjoining waters of the sediment trap during the same period with deployment

在深海稳定的水体中,浮游植物深层沉降常被用来表征表层水体的初级生产力变化(Honjo *et al.*, 2008),而在浅海海域,风浪、潮汐、平流和再悬浮等过程皆会影响到浮游植物的沉降过程(张岩松等, 2004)。与捕集器邻近水域海表温度和初级生产力的同期变化进行了比较,发现从海表温度逐渐回升的初春开始持续到春末,水体的初级生产力较高,已有季节资料也印证了獐子岛海域 3 月的初级生产力高峰(张继红等, 2008),这表明春季浮游植物的沉降与水体的初级生产力水平有着密切的关系,很好地反映了其在自然水体中的生产和输出。此外,从沉降浮游植物组成来看,春季的海链藻、布氏双尾藻、鼻状藻(*Proboscia*)等硅藻物种,贡献了大部分的初级生产和沉降通量;秋季主要沉降浮游植物则转换成硅鞭藻、具槽帕拉藻、圆

筛藻等物种,这与张雪等(2016)对秋季獐子岛底播区表层水体浮游植物优势种组成的研究结果相吻合。

### 3.2 浮游植物沉降对底播扇贝的影响

双壳贝类主要滤食水体中的浮游植物和悬浮颗粒物,已有研究表明,长海县邻近水域初级生产力时空分布处于较高的水平,能够为养殖区贝类生长提供充足的饵料(李洪波等, 2011)。扇贝的摄食具有一定的选择性(王芳等, 2000),食物组成以具槽帕拉藻、圆筛藻、海链藻、舟形藻等硅藻为主(郭皓等, 1999),而这些物种也常被作为扇贝养殖区的饵料指示种(张雪等, 2016)。2011 年期间底播扇贝养殖水域集中在  $38.83\sim 39.18^{\circ}\text{N}$ 、 $122.32\sim 123.12^{\circ}\text{E}$  区域,2012 年期间底播区域向南部深水区  $38.73^{\circ}\text{N}$  略有扩大,本研究捕集器 3 次布放和回收位置皆位于底播区域的中心水域,因此其沉降浮游植物的周年变化特征,直接反映了底播虾夷扇贝的食物来源、饵料组成及其通量水平的变动。从优势种来看,具槽帕拉藻和海链藻在全年对沉降通量的贡献都很高,是底播扇贝生长的重要饵料基础。从季节来看,秋季扇贝底播到冬季扇贝越冬时,正是具槽帕拉藻、圆筛藻、琼氏圆拱形藻、八幅辐环藻等饵料种的高通量时段;进入来年春季,海链藻、布氏双尾藻、鼻状藻等链状及细胞个体较大的硅藻物种出现高通量,为扇贝春季生长提供及时的饵料补充,已有研究表明,春季 5 月虾夷扇贝的各项摄食生理指标(滤水率、摄食率、吸收率、吸收效率)皆为全年最高(张继红等, 2007);而从春末到整个夏季期间,尽管甲藻通量水平有一定的提升,但是甲、硅藻

的通量比仍处于很低的水平( $<0.1$ ), 因此不会对扇贝的饵料结构构成影响, 夏季硅藻的通量水平对扇贝的持续生长仍能够提供一定的饵料保障。

综上所述, 獐子岛海域虾夷扇贝底播区的沉降浮游植物, 无论是从饵料种的组成与结构, 还是从沉降通量水平来看, 其在整个周年皆为底播虾夷扇贝的重要饵料基础。但是, 海洋浮游植物对海水理化环境的变化非常敏感(比如冷水团等过程), 局地短期的赤潮、有毒藻水华等现象也会给扇贝养殖带来不利影响, 因此, 对于獐子岛海域水体浮游植物和沉降浮游植物的演替特征及其长周期变化规律, 还需要更多资料的积累和多学科的工作来验证和完善。

### 参 考 文 献

- Chen JF, Zheng LF. Sediment trap and global change study. *Marine Science Bulletin*, 1996, 15(1): 41–47 [陈建芳, 郑连福. 沉积物捕获器与全球变化研究. *海洋通报*, 1996, 15(1): 41–47]
- Dong J, Li PJ, Liu Y, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton community inshore of the Northern Yellow Sea. *Fisheries Science*, 1999, 18(5): 12–15 [董婧, 李培军, 刘悦, 等. 黄海北部近岸浮游植物生态特征分析. *水产科学*, 1999, 18(5): 12–15]
- Fu CD, Li DC, Yu ZA, *et al.* The variation in species composition and density of phytoplankton in the ranched northwest coast in Changhai Country, Liaoning Province, China. *Fisheries Science*, 2012, 31(7): 408–412 [付成东, 李大成, 于佐安, 等. 长海县西北部海域浮游植物种类及密度的变化. *水产科学*, 2012, 31(7): 408–412]
- Guo H, Yan QL, Cao L. The relationship between food structure of raft for cultivated shellfish and phytoplankton in Changjiang'ao, Dalian. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1999, 8(2): 112–118 [郭皓, 闫启仑, 曹丽. 大连常江澳筏养养殖贝类的饵料结构与浮游植物的关系. *上海水产大学学报*, 1999, 8(2): 112–118]
- Honjo S, Manganini SJ, Krishfield RA, *et al.* Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Progress in Oceanography*, 2008, 76(3): 217–285
- Jin DX, Chen JH, Huang KG. *Planktonic diatoms in China Seas*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1965, 1–230 [金德祥, 陈金环, 黄凯歌. *中国海洋浮游硅藻类*. 上海: 上海科学技术出版社, 1965, 1–230]
- Li HB, Liu GZ, Liang YB, *et al.* Distribution of Chl *a* and primary productivity in Changhai waters of Liaoning. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(1): 32–36 [李洪波, 柳圭泽, 梁玉波, 等. 辽宁长海海域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布. *海洋环境科学*, 2011, 30(1): 32–36]
- Tallberg P, Heiskanen AS. Species-specific phytoplankton sedimentation in relation to primary production along an inshore-offshore gradient in the Baltic Sea. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(11): 2053–2070
- Tang QS. Carbon-sink fisheries and the sound and fast development of modern fisheries. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2011(2): 5–7 [唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业. *江西水产科技*, 2011(2): 5–7]
- Tomas CR. *Identifying marine phytoplankton*. San Diego: Academic Press, 1997, 1–858
- Wang F, Dong SL, Zhang S, *et al.* Experimental studies on feeding selectivity and the filter-feeding rate of *Argopecten irradians* and *Crassostrea gigas*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(2): 139–144 [王芳, 董双林, 张硕, 等. 海湾扇贝和太平洋牡蛎的食物选择性及滤除率的实验研究. *海洋与湖沼*, 2000, 31(2): 139–144]
- Wang J, Li GZ, Wang XY. Phytoplankton abundance distribution and seasonal changes in adjoining waters around the Changhai. *Fishery Sciences*, 1995, 14(2): 23–27 [王鉴, 李桂珍, 王秀艳. 长海县水域浮游植物数量分布和季节变化. *水产科学*, 1995, 14(2): 23–27]
- Xu M, Zhu ZX, Xu BF, *et al.* Phytoplankton in the natural reserve waters of choicest seafood around Hedatuozhi, Changhai. *Fishery Sciences*, 1994, 13(3): 10–13 [徐铭, 朱志祥, 徐步峰, 等. 长海县核大砣子海珍品自然保护区海域的浮游植物. *水产科学*, 1994, 13(3): 10–13]
- Yu JL, Li RX. The study on the phytoplankton ecology in the Bohai and Yellow Seas. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1993, 11(3): 52–59 [俞建鑫, 李瑞香. 渤海、黄海浮游植物生态的研究. *黄渤海海洋*, 1993, 11(3): 52–59]
- Zhang JH, Fang JG, Wang W, *et al.* Feeding physiology of scallop *Patinopekten yessoensis* and population filtering capacity in Zhangzidao Island aquacultural area. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)*, 2007, 28(4): 85–90 [张继红, 方建光, 王巍, 等. 虾夷扇贝的摄食生理及其在獐子岛海域的群体滤水能力. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(4): 85–90]
- Zhang JH, Fang JG, Jiang ZJ, *et al.* Seasonal variation of primary production and spatial-temporal distribution of chlorophyll *a* in mariculture area of Zhangzidao Island. *Marine Fisheries Research*, 2008, 29(4): 22–28 [张继红, 方建光, 蒋增杰, 等. 獐子岛养殖水域叶绿素含量时空分布特征及初级生产力季节变化. *海洋水产研究*, 2008, 29(4): 22–28]
- Zhang X, Luan QS, Sun JQ, *et al.* Annual variation in phytoplankton community and its relationship with ambient environmental factors in adjacent waters of Zhangzi Island. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, 31(3): 315–323 [张雪, 栾青杉, 孙坚强, 等. 獐子岛海域浮游植物群落周年变化及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2016, 31(3): 315–323]
- Zhang YS, Zhang FJ, Guo XW, *et al.* Vertical flux of the settling particulate matter in the water column of the Yellow Sea in summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 230–238 [张岩松, 章飞军, 郭学武, 等. 黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 230–238]

## Annual Variations in the Phytoplankton Settling Flux in the Northern Yellow Sea off Zhangzi Island

LUAN Qingshan<sup>1,2</sup>, SUN Jianqiang<sup>1</sup>, Qiao Rui<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1,3①</sup>, ZANG Youcai<sup>4</sup>, ZHANG Yuan<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. Zhangzidao Group Co. Ltd., Dalian 116001)

**Abstract** A German-made sediment trap, MST24, was deployed at 5-day intervals in the Northern Yellow Sea off Zhangzi Island from September 2011 to November 2012 for the purpose of revealing the settling phytoplankton composition and estimating the annual variations of fluxes. A total of 51 genera and 93 taxa were recorded, with diatoms (38 genera, 66 taxa) as the dominant sedimentation group. The predominant settling species were diatoms such as *Paralia sulcata*, *Thalassiosira excentric*, *Ditylum brightwellii*, *Coscinodiscus radiatus*, and *Actinocyclus octonarius*, as well as silicoflagellates such as *Dictyocha fibula* and *Octactis octonaria*. Total phytoplankton fluxes varied between  $6.1 \times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d and  $169 \times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d, averaging  $39.4 \times 10^6$  cells/m<sup>2</sup>d. The periods of high fluxes occurred during the spring and autumn seasons, with diatoms contributing more in spring and diatoms and silicoflagellates both contributing the most in autumn. The seeding and growing periods of *Patinopecten yessoensis* in the adjoining waters off Zhangzi Island were synchronized with the annual dynamics of the phytoplankton that comprise its diet and phytoplankton settling fluxes. Diatom taxa such as *Paralia sulcata*, *Thalassiosira* spp., and *Coscinodiscus* spp. are all important food sources and grazing structure for scallops. By studying phytoplankton sedimentation with a high sampling frequency and clarifying the scallop diet taxa with settling fluxes, this research will provide a baseline database and references for sustainable aquaculture in the adjoining waters off Zhangzi Island, China.

**Key words** Phytoplankton; Settling flux; Annual variation; Zhangzi Island; *Patinopecten yessoensis*

① Corresponding author: WANG Jun, E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn