

汉沽盐场浮游植物生态特征^{*}

邓元告 董景岗 黄琼叶 隋丽英^{**}

(天津科技大学, 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457)

摘要 2012年5—12月,对渤海湾长芦汉沽盐场盐度从5~20 °Bé逐级升高的5个盐池进行了卤水理化指标以及浮游植物种类和丰度分析。结果表明:调查取样鉴定检测出浮游植物共5门27种,其中硅藻18种,占绝对优势;各盐度盐池中(A1~A5)蓝藻门颤藻(*Oscillatoria* spp.)均为优势种,硅藻门菱形海线藻(*Thalassionema nitzschiooides*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、菱形藻(*Nitzschia* spp.)和圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)等在较低盐度盐池中(A1和A2)占优势,而绿藻门杜氏藻(*Dunaliella* spp.)在中高盐度盐池中(A3~A5)为优势种;不同盐度盐池中浮游植物密度为 $6.47 \times 10^3 \sim 5.07 \times 10^6$ ind · L⁻¹,多样性指数为0.13~1.57,均匀度为0.01~0.58,优势度均>0.5,且均随盐度和季节呈规律性变化。总体而言,汉沽盐场浮游植物种群多样性和均匀度较低,优势度明显,且随卤水盐度升高和温度降低,浮游植物多样性和密度降低。

关键词 盐田; 浮游植物; 盐度; 温度; 优势种

中图分类号 Q9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)4-0959-07

Ecological characteristics of phytoplankton in Hangu Saltworks. DENG Yuan-gao, DONG Jing-gang, HUANG Qiong-ye, SUI Li-ying^{**} (Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 959–965.

Abstract: The present study was undertaken in Changlu Hangu Saltworks, which is situated in Bohai Bay coastal area, China in the period of May to December in 2012. The physicochemical variables, species diversity and density of phytoplankton were determined in five sampling saltponds with salinities ranging from 5–20 °Bé. The results indicated that five phylum and 27 phytoplankton genera were identified, of which 18 genera belonged to *Bacillariophyta*. Blue green algae *Oscillatoria* spp. was abundant in all sampling saltponds (A1–A5), diatoms such as *Thalassionema nitzschiooides*, *Skeletonema costatum*, *Nitzschia* spp. and *Coscinodiscus* spp. were dominant in the saltponds at lower salinities (A1 and A2), whilst green algae *Dunaliella* spp. were superior in the saltponds at higher salinities (A3–A5). The density of phytoplankton ranged $6.47 \times 10^3 \sim 5.07 \times 10^6$ ind · L⁻¹, diversity index ranged from 0.13 to 1.57, evenness index ranged from 0.01 to 0.58, and the overall dominance index was greater than 0.5, depending on salinities and seasons. Overall, the diversity and evenness of phytoplankton in Hangu Saltworks were lower, but with apparent dominance. The diversity and biomass density in the saltponds reduced with increasing salinity and decreasing temperature.

Key words: saltponds; phytoplankton; salinity; temperature; dominant species.

日晒盐场盐田是由一系列相通并可人为控制走水的盐池构成的生态系统,卤水在系统内流动过程中,由于太阳能和风力的作用水分不断蒸发,盐度不

断增高,直至氯化钠结晶析出。一般按照盐度高低将盐池划分为3部分,即蓄水区(3~7 °Bé)、蒸发区(8~19 °Bé)和结晶区(20 °Bé以上)。除了日晒、风力和降雨等物理因素的作用,由浮游和底栖藻类、卤虫和嗜盐菌等主要生物种群所构成的平衡的盐田生态系统,可有效降低卤水粘度、促进卤水蒸发,提

* 科技部国际科技合作计划项目(2010DFA32300)和天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC28700)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: suily@ hotmail. com

收稿日期: 2013-08-07 接受日期: 2013-12-09

高盐的结晶粒度和纯度,对盐产量和质量产生积极的影响(Haxby & Tackaert, 1987; Davis, 2006)。

渤海湾盐场是中国重要的海盐产地,海盐产量占全国盐总产量约40%,2011年达到3200万t。但长期以来由于缺乏盐田生物管理,渤海湾盐场单位面积盐产和盐质一直处于较低的水平。同时人口密集、高度工业化和区域水交换缓慢等造成渤海湾海水氮磷的富营养化较为严重(王晓宇等,2011;李桂菊等,2012),因此盐田卤水中氮磷含量普遍较高。浮游植物是盐田生态系统的重要初级生产力,其生长繁殖既可以降低卤水的富营养化水平,又可为浮游动物(尤其是盐田中的主要浮游动物卤虫)提供丰富的饵料(Tackaert & Sorgeloos, 1986)。但是某些藻类在不平衡的生态条件下大量繁殖(如绿球藻 *Coccochloris*,棕鞭藻 *Ochromonas*),也会增加卤水的粘度,降低卤水的蒸发量(Davis, 2006)。

与海水和淡水环境不同,盐场蒸发池和结晶池中卤水多变的物理和化学环境形成了独特的盐田生态系统,即在盐度较低的卤水中物种丰富但每个物种丰度有限;随盐度增加,物种丰度降低,但优势种群丰度增加;而在结晶池中仅有少量单细胞藻类和嗜盐微生物存在(Haxby & Tackaert, 1987),是极具生态学研究价值的近海水域生态系统。

有关渤海湾盐田浮游植物种类和丰度的调查研究始于20世纪90年代初期(徐宝正和杨流平,1989; Davis, 1990; Zhang et al., 1990),而后鲜有报道。本文通过对盐田卤水定期定点取样,对其中温度、盐度、氮磷含量、浮游植物种群和丰度进行分析,旨在探索渤海湾盐场浮游植物种类和丰度随盐度和温度的变化规律,为研究盐田生态系统和进行盐田生物调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查取样盐池

调查取样地点为天津长芦汉沽盐场蒸发池(图1),取样时间为2012年5—12月,每月上旬选择干燥晴朗的天气,在8:00—11:00进行取样。选取盐度从5~20 °Bé依次升高的5个盐池(A1~A5),每池盐度梯度差为3~4 °Bé(表1)。

1.2 卤水中物化因子的测定

卤水盐度(波美度)的测定:卤水波美度由密度换算而得。卤水密度的测定采用密度计(Mettler DE51),测定温度20 °C。密度与波美度的换算公式

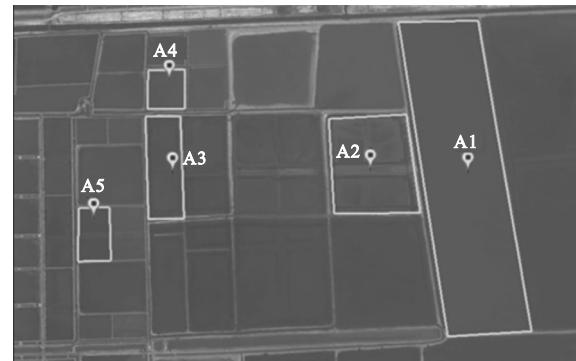


图1 汉沽盐场取样池分布

Fig. 1 Distribution of the sampling saltponds in Hangu Saltworks

盐池A1~A5盐度从5~20 °Bé逐渐升高。

表1 取样池卤水预设盐度与实测盐度(°Bé)

Table 1 Expected and actual salinities of brine in the sampling saltponds

取样站位	预设盐度	平均实际盐度
A1	5	4.7(3.6~5.8)
A2	8	8.3(6.1~10.4)
A3	12	11.5(10.4~12.6)
A4	16	14.3(12.4~16.2)
A5	20	19.8(16.7~22.9)

为:波美度 = (144.3×密度-144.15)/密度

总氮和总磷的测定:取样卤水用0.45 μm醋酸纤维素滤膜进行过滤,对滤液进行总氮和总磷的测定。总氮的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 12763.4-2007),总磷测定采用钼酸铵分光光度测定法(GB/T 12763.4-2007)。

叶绿素a含量的测定:取1 L卤水样品,加入3 mL碳酸镁混匀,用0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤。滤膜用90%的丙酮溶液萃取过夜,采用分光光度法测定卤水中叶绿素a含量(GB 17378.7-1998)。

1.3 浮游植物取样与分析方法

在盐池均匀分布的4个固定位置分别取水,总水体为20 L。用浅水Ⅲ型浮游生物网将水样过滤,浓缩至100~150 mL,立即加入5%甲醛固定。水样在实验室中静置过夜,去上清,将浓缩样品定容至25 mL,摇匀后取0.25 mL置于浮游植物计数框,于显微镜下进行浮游植物种类鉴定和细胞计数。

1.4 数据处理和统计分析

Shannon 多样性指数

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

式中,s为物种数,P_i为第i种在所有物种中的比例

($P_i = n_i/N$), n_i 为第*i*种的个体数, N 为所有物种的个体总数(施并章和沈国英,2008)。

$$\text{均匀度 } J = H'/\log_2 N$$

式中, H' 为Shannon多样性指数值, N 为总物种数。

$$\text{优势度 } Y = Pf_i$$

式中, P_i 为第*i*种在所有物种中的比例, f_i 为第*i*种出现的频率,以 $Y > 0.02$ 为优势种。

2 结果与分析

2.1 卤水盐度、温度及叶绿素a含量

本次调查取样池的预计盐度为5~20 °Bé,各池盐度梯度差为3~4 °Bé。但受汉沽盐场走水、蒸发和降雨等气候因素的影响,实际测得盐度有所波动(表1)。卤水温度随季节变化明显,且同一取样月份卤水温度随盐度增加略有升高。卤水温度5月为21.2~23.1 °C,6月为23.4~26.6 °C,7月为26.8~29.6 °C,8月为26.7~29.2 °C,10月为15.3~18.3 °C,12月为2.2~4.3 °C。

图2所示,除个别月份外,卤水中总氮和总磷含量随盐度升高而增加。各取样池中总氮和总磷含量在8和10月分别出现较高值,总氮最高值出现在10月的A5站位,为812.2 μg·L⁻¹;而总磷含量最高值出现在8月的A5站位,为117.0 μg·L⁻¹。

由图3可见,浮游植物生物量在低盐度盐池A1中较高,随着盐度升高,生物量逐渐降低,在盐度最高的盐池A5中叶绿素a含量最低。生物量也呈现一定季节性变化,春夏季浮游植物生物量(5—8月)

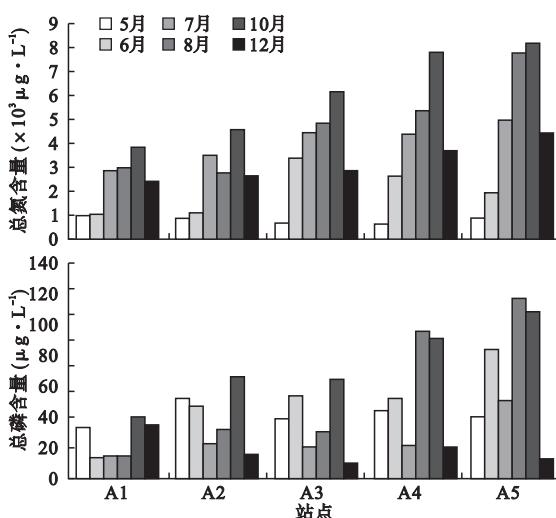


图2 不同月份和不同盐度取样池卤水总氮和总磷含量

Fig. 2 Total nitrogen and phosphorus contents of brine in the sampling saltponds in different months and salinities

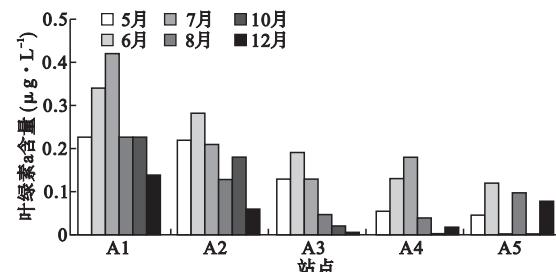


图3 不同月份和不同盐度取样池卤水叶绿素a的含量

Fig. 3 Chlorophyll a content of brine in the sampling saltponds in different months and salinities

明显高于秋冬季(10和12月)。

2.2 浮游植物种类

本次调查鉴定检出浮游植物种类共27种,分属于硅藻门 Bacillariophyta(18种)、绿藻门 Chlorophyta(5种)、蓝藻门 Cyanophyta(2种)、甲藻门 Pyrrhophyta(1种)以及隐藻门 Cryptophyta(1种)5个类群,其中硅藻门藻类种类占绝对优势,占所有检出浮游植物种类的67%(表2)。各盐度盐池中(A1~A5)蓝藻门颤藻均为优势种,硅藻门如菱形海线藻、舟形藻、中肋骨条藻、菱形藻、圆筛藻、桥弯藻和曲舟藻等在较低盐度盐池中(A1~A2)占优势,而绿藻杜氏藻在中高盐度盐池中(A3~A5)为优势种。

2.3 盐田浮游植物的生态特征

汉沽盐田浮游植物的种类和密度分布特征呈明显的季节和盐度变化,最高均出现在6月份的A1站点,分别为27种和 5.07×10^6 ind·L⁻¹,最低出现在12月的A5站点,分别为3种和 6.47×10^3 ind·L⁻¹(图4)。浮游植物种类和密度随盐度升高而下降,从6个取样月份的平均值看,不同站点的浮游植物种类均值与盐度呈显著的负相关($R^2=0.927$),但密度均值与盐度的相关性不显著($R^2=0.735$)。盐田浮游植物种类随季节变化亦很明显,每月取样五个站点平均种类为6月>7月>5月>8月>10月>12月,5个站点平均密度为6月>7月>5月>10月>8月>12月。6月5站点的种类和密度均值最高,分别为16种和 4.32×10^6 ind·L⁻¹,明显高于其他月份;12月最低,分别为7种和 5.22×10^4 ind·L⁻¹。

盐田浮游植物多样性指数 H' 值在0.13~1.57,均匀度 J 值在0.01~0.58,整体偏低,说明盐田浮游植物群落结构较为简单,优势度 Y 值在0.73~1,均>0.5,说明优势物种很明显。对5个站位6个月份取 H' 、 J 和 Y 均值(图5),5个站点 H' 、 J 和 Y 均值分别为0.22~0.9、0.09~0.28和0.71~0.99,

表2 取样池(A1~A5)中浮游植物种类和密度

Table 2 Species and density of phytoplankton in the sampling saltponds (A1~A5)

密度	种类	5月	6月	7月	8月	10月	12月
A1	蓝藻门 Cyanophyta 颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	++	++++	++++	++++	++++	++++
	绿藻门 Chlorophyta 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp.			++		++	
	扁藻 <i>Platymonas</i> sp.						
	硅藻门 Bacillariophyta 羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.		+	++	+		
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		++	++++	++	++	++
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>	+	+++	++++	++	+++	++
	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.		+++	++++	++++	+++	+++
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	+	++++	+++	++	+++	++
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.		++	+++	++	++++	+++
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.			+			
	桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.		+++	++++	++	+++	+
	革形藻 <i>Amphirora</i> sp.		+++	++	+++	+	
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	+	+++	+++	++++	+++	++
	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> spp.		+++	+++	+++	+	
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.		+				
	甲藻门 Pyrrhophyta 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	+	+	++			
	隐藻门 Cryptophyta 尖隐藻 <i>Cryptomonas acuta</i>		+	+			
A2	蓝藻门 Cyanophyta 颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	++	++++	++++	++++	++++	++
	绿藻门 Chlorophyta 盐藻 <i>Dunaliella</i> spp.	+	+++	+		++	++
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp.					++	
	扁藻 <i>Platymonas</i> sp.	+					
	硅藻门 Bacillariophyta 羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.		+				
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		++	++++	++	++	
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>	+	+++	+++	++	++	+
	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.		+++	++++	+++	+++	
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	+	+++	++++	+++	+++	+
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.		+++	+++	++++	+++	+++
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.			+			
	桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.		++++	++++	++++	+++	+
	革形藻 <i>Amphirora</i> sp.		+++	++	+	+	
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	++	+++	++++	+++	+++	+
	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> spp.		++	+			
	甲藻门 Pyrrhophyta 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	++	+++	+	++		
A3	蓝藻门 Cyanophyta 颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	+++	++	++++	++++	++++	+
	绿藻门 Chlorophyta 盐藻 <i>Dunaliella</i> spp.	+	+++	+++	++++	+++	+++
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp.	+	+	+++	++	++	
	硅藻门 Bacillariophyta 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	+	++	+++	++	+	+
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>		+++	++	++		
	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.	+	++	++	+	+	+
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	+	+++	+++	++	++	+
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.		+	++	++	++	+
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.		+				
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	+	++	+	++	++	
	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> spp.		++				
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.		+	++			
	甲藻门 Pyrrhophyta 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	++	++	++	++	++	

续表 2

Table 2 Continued

密度	种类	5月	6月	7月	8月	10月	12月
A4	蓝藻门 Cyanophyta 颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	+++	++++	++++	++++	+++	+
	绿藻门 Chlorophyta 盐藻 <i>Dunaliella</i> spp.	++	++++	++++	+++	++++	+++
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp.	++	+			++	
	硅藻门 Bacillariophyta 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>			+			
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>	+	+				
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	++	+		+		
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.		+				
	桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.		+		+		
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.				+		
	甲藻门 Pyrrhophyta 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.				+		
A5	蓝藻门 Cyanophyta 颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	+	++	+++	++	++	+
	绿藻门 Chlorophyta 盐藻 <i>Dunaliella</i> spp.	++	++++	++++	+++	++++	++
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> spp.			++	++	++	
	硅藻门 Bacillariophyta 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		+				
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.			+			
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.			+			

++++ 该浮游植物种类密度 $\geq 1000 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, +++ 该浮游植物种类密度为 $100 \sim 1000 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, ++ 该浮游植物种类密度为 $10 \sim 100 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, + 该浮游植物种类密度 $\leq 10 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

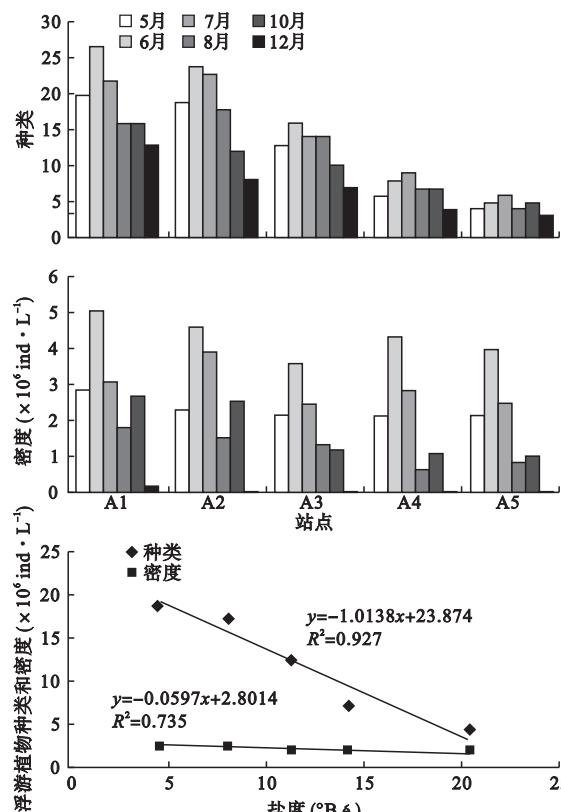


图 4 不同月份和不同盐度取样池中浮游植物种数、密度及种类密度与盐度的相关性

Fig. 4 Phytoplankton species and density in the sampling saltponds in different months and salinities and linear regression between species, densities and salinities

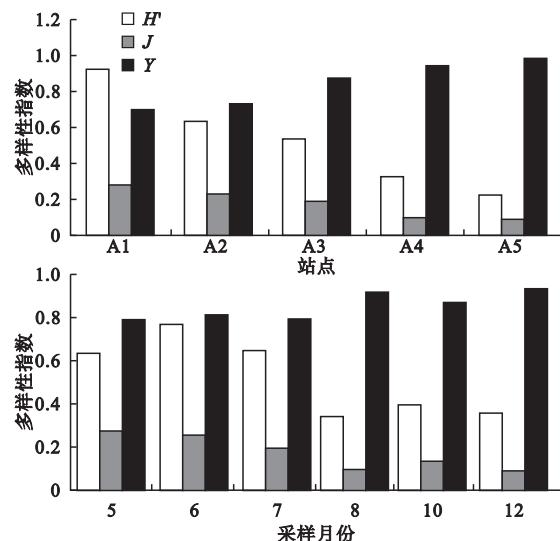


图 5 浮游植物各站点和各取样月份 Shannon 多样性指数 (H')、均匀度 (J) 和优势度 (Y)

Fig. 5 Shannon's diversity index (H'), evenness index (J) and dominance index (Y) of phytoplankton based on sampling ponds and sampling months

H' 和 J 随盐度变化呈规律性的下降, 而 Y 则呈相反的趋势; 6 次采样(月份) H' 、 J 和 Y 均值分别为 $0.35 \sim 0.79$ 、 $0.10 \sim 0.28$ 和 $0.8 \sim 0.94$, H' 和 J 均值, 6 月份最高, 而在高温的 8 月份和低温的 12 月份相对较低。而优势度 Y 均值在 8 月和 12 月较高。

3 讨 论

3.1 盐度和温度对浮游植物生态特征的影响

本研究中,浮游植物的种类和密度随盐度升高而明显降低,表明盐度是盐田生物群落的主要决定因素。日晒盐场中,随盐度的升高,卤水溶解氧减低、渗透压增加、高盐度盐池较低的水位使夏季卤水温度升高较快,对生物形成环境胁迫(Abdul *et al.*, 1990; Sundararaj *et al.*, 2006; 王婧等,2012)。因此,在盐度由低到高的变化过程中,卤水中生物多样性不断降低,种类丰富的复杂群落逐渐演替成为由广盐性和嗜盐性物种组成的简单群落(Abdul *et al.*, 1990; Zhang *et al.*, 1990; Nicolas *et al.*, 2005; Sundararaj *et al.*, 2006; Evangelopoulos *et al.*, 2007)。通过对比近年来渤海湾天津海域近岸浮游植物种类调查结果(李清雪和陶建华,2000; 王俊,2003; 孙军等,2004),本研究发现,随盐度的升高,汉沽盐场盐池中典型的海洋浮游植物物种逐渐消失。本研究中,具有广盐分布特征(Nagasathya & Thajuddin, 2008)的颤藻在各个盐度盐池中广泛分布且丰度较高。较低盐度(平均盐度4.7~8.3 °Bé)适合多种硅藻的生长,盐池中硅藻的种类和密度都处于优势,但随盐度的增加,其种类和密度大幅下降。在高盐度盐池A3~A5(平均盐度11.5~19.8 °Bé)卤水中,绿藻门杜氏藻逐渐占据主导地位,这主要是由于杜氏藻细胞可通过合成甘油等进行渗透压调节(Goyal, 2007),可在高盐胁迫环境下生存;同时高盐环境条件下竞争藻类减少,也使其丰度增加(Zhang *et al.*, 1990)。

本研究中,浮游植物种类和密度随温度呈现出规律性变化。本次调查取样时间为5—12月,卤水温度在2~30 °C变化。5月上旬中午水温虽然已达到20 °C以上,但由于前期水温过低和昼夜温差较大,此时藻类生物量不高。6月水温已达23.4~26.6 °C,昼夜温差小,是藻类生长繁殖最适合季节,藻类生物量和种类数最多。进入7—8月,水温持续升高至近30 °C,特别是中午表层水温可高达40 °C,藻类生长受到抑制,生物量有所降低。而10月上旬温度已低于20 °C,藻类生长放缓。12月下旬低盐度盐池卤水(A1~A3)已结冰,不利于浮游植物的生

长和繁殖,此时藻类的种类和密度均最低。

3.2 氮磷营养对浮游植物生态特征的影响

氮和磷元素浮游植物生长的必需元素,但氮磷含量过高,造成水体富营养化,成为引发赤潮的一个重要因素。汉沽盐场位于渤海湾海水富营养化区域,而且由于卤水在蒸发过程中高度浓缩,卤水中总氮和总磷含量往往随盐度升高而增加。本研究中平均盐度为4.7 °Bé的A1盐池卤水,总氮浓度为914~3807 μg·L⁻¹,高于天津近岸海水总氮的浓度范围(114~857 μg·L⁻¹)(王晓宇等,2011; 李桂菊等,2012);总磷浓度为14~39 μg·L⁻¹,在天津近岸海水总磷的浓度范围之间(7~69 μg·L⁻¹)。卤水中较低的总磷含量可能与高盐条件下钙和镁离子容易与磷结合形成沉淀物有关(Javor, 1989)。总体而言,卤水中总氮和总磷浓度与季节和温度变化关系不大。10月浓度较高,可能与这一季节降雨少、蒸发量大且浮游植物种群密度低有关。

3.3 浮游动物对浮游植物生态特征的影响

本次调查中,浮游植物丰度除了随盐度和温度变化外,还受卤虫种群密度的影响。一般而言,在较低盐度环境(3.5~10 °Bé)中,原生动物(Protozoa)、轮虫(Rotifers)、桡足类(Copepods)和卤虫(*Artemia*)等为主要浮游动物种群,而在较高盐度环境(10~18 °Bé)中,卤虫为主要浮游动物种群(Davis, 1990),单细胞藻类是这些浮游动物最好的生物饵料。研究表明,卤水中卤虫密度与浮游植物密度成反比关系,低盐度时卤虫密度较低,浮游植物密度达到最高(Abdul *et al.*, 1990; Zhang *et al.*, 1990)。本研究中,盐池平均盐度范围为4.7~19.8 °Bé,浮游动物在盐度较低的A1和A2站点主要以原生动物和桡足类为主,密度较高,A1站点未发现卤虫,A2站点卤虫密度极低;A3站点卤虫成为优势种,密度最高;盐度较高的A4和A5站点,卤虫虽然仍为优势种,但密度逐渐降低(数据另发表)。因此,浮游植物密度与卤虫密度呈一定的负相关。

综上所述,卤水中浮游植物生物量除了与水体的盐度、温度和氮磷营养盐含量等密切相关外,作为食物链的基础,其种群密度还与捕食者(主要为卤虫)的存在及其丰度密切相关。总体而言,汉沽盐场浮游植物种群多样性和均匀度较低,优势度明显,

且随卤水盐度升高和温度降低,浮游植物多样性和密度降低。

致 谢 本研究野外采样得到天津长芦汉沽盐场有限责任公司王洪庆、刘保国和史宝仓三位工程师的大力协助,在此表示衷心感谢。天津科技大学张蔷和林丽珠同学参与样品的部分分析工作。

参考文献

- 李桂菊,马玉兰,李伟,等. 2012. 春季渤海湾营养盐分布及潜在性富营养化评价. 天津科技大学学报, **27**(5): 22–27.
- 李清雪,陶建华. 2002. 天津近岸海域浮游植物生态特征的研究. 天津大学学报, **33**(4): 464–469.
- 施并章,沈国英. 2008. 海洋生态学(第2版). 北京: 科学出版社.
- 孙军,刘东艳,白洁,等. 2004. 2001年冬季渤海的浮游植物群落结构特征. 中国海洋大学学报, **34**(3): 413–422.
- 王婧,隋丽英,贺华,等. 2012. 山东埕口盐场海欣分场卤虫种群生态调查. 生态学杂志, **31**(11): 2848–2854.
- 王俊. 2003. 渤海近岸浮游植物种类组成及其数量变动的研究. 海洋水产研究, **24**(4): 44–50.
- 王晓宇,杨红生,孙金生,等. 2011. 天津近岸海域氮磷营养盐分布及富营养化评价. 海洋科学, **39**(9): 56–61.
- 徐宝正,杨流平. 1989. 塘沽盐场嗜盐生物. 海湖盐与化工, **18**(2): 13–17.
- Abdul AR, Sosamma E, Ambika DM. 1990. Hydrobiology of *Artemia* in solar saltworks of Vedaranyam, India// Cheng L, ed. Proceeding of International Symposium on Biotechnology of Saltponds. Tianjin, China: 148–165.
- Davis JS. 1990. Biological management for the nutrients-rich Chinese solar saltworks// Cheng L, ed. Proceeding of International Symposium on Biotechnology of Saltponds. Tianjin, China: 128–132.
- Davis JS. 2006. Biological and physical management information for commercial solar saltworks// Lekkas TD, ed. Proceeding of the 1st International Conference on the Ecological Importance of Solar Saltworks. Santorini Islands, Greece: Global NEST: 1–14.
- Evagelopoulos A, Spyros E, Koutsoubas D. 2007. The biological system of the lower salinity ponds in Kalloni Saltworks (NE, Aegean Sea, Greece): Phytoplankton and macrobenthic invertebrates. *Transition of Waters Bulletin*, **3**: 23–25.
- Goyal A. 2007. Osmoregulation in *Dunaliella*, Part II: Photosynthesis and starch contribute carbon for glycerol synthesis during a salt stress in *Dunaliella tertiolecta*. *Plant Physiology & Biochemistry*, **45**: 705–710.
- Haxby RE, Tackaert W. 1987. Role of *Artemia* in solar salt operations// Sorgeloos P, Bengtson DA, Decler W, eds. *Artemia Research and Its Applications*. Wetteren: Universa Press: 291–293.
- Javor B. 1989. Hypersaline Environment: Microbiology and Bio-geochemistry. Berlin: Springer-Verlag.
- Nagasathya A, Thajuddin N. 2008. Cyanobacterial diversity in the hypersaline environment of the saltpans of southeastern coast of India. *Asian Journal of Plant Science*, **7**: 473–478.
- Nicolas PD, Triantafyllos T, Theodore JA, et al. 2005. Abundance and growth response of microalgae at Megalon Embolon solar saltworks in northern Greece: An aquaculture prospect. *Journal of Applied Phycology*, **17**: 39–49.
- Sundararaj TD, Ambika DM, Shanmugasundaram C, et al. 2006. Dynamics of solar saltworks ecosystem in India// Lekkas TD, ed. Proceeding of the 1st International Conference on the Ecological Importance of Solar Saltworks. Santorini Islands, Greece: Global NEST: 122–128.
- Tackaert W, Sorgeloos P. 1986. Brine shrimp *Artemia* in coastal saltworks: hydrobiological key to improved salt production and inexpensive source of food for vertically integrated aquaculture// D'Amelio V, Santielli S, eds. Proceeding of International Meeting on Saltworks Conversion for Aquaculture. Trapani, Italy: Libera Universita: 133–141.
- Zhang RS, Xu ZK, Zhong YC, et al. 1990. A preliminary ecosystem investigation of the Tanggu Solar Saltworks// Cheng L, ed. Proceeding of International Symposium on Biotechnology of Saltponds. Tianjin, China: 133–137.

作者简介 邓元告,男,1974年生,硕士,讲师,主要研究方向为盐田和近海生态、微生物代谢工程等。E-mail: grindstone@tust.edu.cn。

责任编辑 李凤芹