

文章编号: 1674-5566(2018)03-0336-08

DOI:10.12024/jsou.20171210001

## “21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水浮游植物群落特征

杨逸凡<sup>1,2</sup>, 薛俊增<sup>1,2</sup>, 刘 亮<sup>1,2</sup>, 王晓媛<sup>1,2</sup>, 吴惠仙<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 港航生态安全研究中心, 上海 201306)

**摘 要:** 2015 年 4 月至 2016 年 7 月采集了停泊于上海洋山港的 9 艘“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水水样, 压载水隶属于中国南海区、阿拉伯海区、红海区和地中海区。对其浮游植物的种类组成和丰度进行了分析, 共检出压载水中浮游植物 30 种, 隶属于 4 门 18 属。其中硅藻门 12 属 21 种, 甲藻门 4 属 7 种, 蓝藻门和绿藻门各 1 种。各船舶压载水中浮游植物种类数变化范围为 2~7 种, 优势种为星形明盘藻 (*Hyalodiscus stelliger*)、具槽直链藻 (*Melosira sulcata*)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和具尾翅甲藻 (*Dinophysis caudata*), 其中具尾翅甲藻出现频率最高。春季压载于香港港的样品中浮游植物丰度最高, 为  $(3.983 \pm 1.695) \times 10^3$  cells/L; 夏季压载于新加坡港的样品中浮游植物丰度最低, 为  $(0.317 \pm 0.347) \times 10^3$  cells/L。此外鉴定到赤潮藻 13 种, 包括 3 种有毒藻类, 分布于 8 艘船舶压载水中。结果显示, 来自中国南海区的压载水样品中浮游植物种类数和丰度较其他海区高, 4 个海区的压载水均具有潜在的生物入侵风险, 若部分赤潮藻种随压载水排入洋山港区, 赤潮发生潜在风险增大, 进而危害当地海域的生态环境。

**关键词:** 21 世纪海上丝绸之路; 洋山深水港; 压载水; 浮游植物

**中图分类号:** Q 89; S 917 **文献标志码:** A

船舶航行过程中压载水的排放, 是引发外来海洋物种入侵和传播的重要途径, 已被全球环境基金组织 (Global Environment Facility) 确定为世界海洋环境的四大威胁之一<sup>[1]</sup>。压载水中携带的生物有机体随压载水排放, 对排放地海洋生态环境造成严重影响, 甚至导致整个海域生态系统的崩溃<sup>[2-3]</sup>。据统计, 全球数百次海洋物种入侵事件中有至少 1/3 与船舶压载水有关<sup>[4]</sup>。曾有报道指出, 英国水域的入侵物种中至少有一半来自入境船舶排放的压载水和船体表面携带的污损生物<sup>[5]</sup>。20 世纪 80 年代欧洲的斑马贻贝随船舶压载水排放到北美水域, 影响了整个水域的生态平衡并对当地造成了重大经济损失<sup>[6]</sup>。

21 世纪以来, 随着国际贸易发展以及经济全球化趋势不断加深, 中国提出了“一带一路”战略, 致力于亚、欧、非大陆及周边海洋的互联互通, 实现沿线各国共同、平衡发展<sup>[7]</sup>。“21 世纪海

上丝绸之路”作为“一带一路”的重要组成部分, 是中国与世界其它地区进行经济文化交流的上海通道, 其为各国发展带来机遇的同时, 也带来了一系列挑战<sup>[8]</sup>。由船舶压载水带来的海洋外来生物入侵问题则是其中重要的生态问题<sup>[9-10]</sup>, 压载水传播的外来物种对港口生态环境影响日益严重, 其中浮游植物是主要的组成成分<sup>[11]</sup>。浮游植物是海洋中的初级生产者, 在海洋生态系统中发挥着重要作用<sup>[12]</sup>, 船舶压载水中的浮游植物随压载水排放到当地港口后, 部分有害藻类可能会暴发, 导致赤潮发生<sup>[13-15]</sup>。

上海洋山深水港位于浙江嵊泗崎岖列岛, 是上海国际航运中心的集装箱深水枢纽港区, 也是世界第一大集装箱港<sup>[16]</sup>。随着上海国际航运中心自由贸易港的建设和“一带一路”战略的实施, 第四期码头工程的开港运行<sup>[17]</sup>, 洋山港船舶往来会更加频繁, 港口压载水的排放也会进一步增

收稿日期: 2017-12-25 修回日期: 2018-03-25

基金项目: 上海市科委科研项目(17DZ1202905); 上海市科委研发平台专项(16DZ2293800); 上海市自然科学基金(15ZR1420900); 海洋工程装备检测试验技术国家工程实验室建设项目[沪发改高技(2016)99号]

作者简介: 杨逸凡(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶压载水生态学。E-mail: 1254625554@qq.com

通信作者: 吴惠仙, E-mail: hxwu@shou.edu.cn

加,其对洋山港海域的生态环境影响日益严重。开展外来海洋生物的调查研究日趋重要,因此我们对停靠在洋山港的“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水进行了抽样调查分析,为洋山港和周边海域生态学研究、海洋外来生物监测等提供理论依据。同时,关注“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水问题,也有利于维护我国海洋利益,对“一带一路”战略和平稳定发展具有重要的现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样船舶

2015 年 4 月至 2016 年 7 月,选取停泊于上海洋山港的 9 艘“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶(表 1),进行压载水样品采集分析(样品编号以船名缩写命名)。所有采样船舶压载水来源地均为该船最近一次压载地,除船舶 ME 在亚丁湾

公海压载外,其余 8 艘均在港口进行压载(图 1)。

样品的船名、航线、水龄等信息,均通过各船舶压载水航行记录(Ballast water log)获得。采集的 9 份样品的水龄变化范围为 5 ~ 110 d。除了样品 ME 水龄为 110 d 外,其它样品的水龄皆低于 60 d(表 1)。

### 1.2 浮游植物的采集与分析

打开船体人孔盖进入压载水舱,使用 10 L 有机玻璃采水器进行浮游植物样品采集,经过 10  $\mu\text{m}$  浮游生物网过滤后收集滤样于 50 mL 采样瓶中,使用鲁哥氏液固定,低温保存即时将样品运回实验室,静置沉淀后浓缩并定容至 50 mL,取 0.1 mL 处理后样品移至浮游植物计数框内,在光学显微镜下进行种类鉴定及细胞计数,每个样品重复鉴定 3 片。

标本鉴定参考《海洋浮游藻类图谱》等。



图 1 船舶压载地

Fig. 1 Ships ballasting locations

表 1 采样船舶及样品信息

Tab. 1 Sampling ship and sample information

编号 Number	船名缩写 Abbreviation	采样日期 Sampling date	压载地 Ballast location	所属海区 Sea area	水龄 Water age
1	NYK	2015. 04. 17	香港港(中国)	中国南海区	5
2	ME	2015. 05. 06	亚丁湾	阿拉伯海区	110
3	TT	2015. 05. 26	巴生港(马来西亚)	中国南海区	14
4	YU	2015. 06. 18	科伦坡港(斯里兰卡)	阿拉伯海区	34
5	EL	2015. 06. 18	新加坡港(新加坡)	中国南海区	8
6	EL2	2015. 06. 18	吉达港(沙特阿拉伯)	红海区	29
7	TT2	2015. 08. 04	丹戎帕拉帕斯港(马来西亚)	中国南海区	55
8	YW	2015. 09. 18	比雷埃夫斯港(希腊)	地中海区	27
9	CS	2016. 07. 06	深圳港(中国)	中国南海区	7

### 1.3 数据分析

浮游植物优势种按照物种优势度值( $Y$ )确定:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中: $Y$ 为优势度, $n_i$ 为第*i*种浮游植物的个体数, $N$ 为总浮游植物个体数, $f_i$ 为第*i*种浮游植物在船舶中出现的频率,当 $Y$ 值大于0.01时,表示该物种为主要优势种<sup>[18]</sup>。

浮游植物出现率 $f_i$ 计算公式为:

$$f_i = H_i/M \quad (2)$$

式中: $H_i$ 为第*i*种浮游植物在调查船舶中出现的次数, $M$ 为调查船舶的总数,出现率大于30%为常见种<sup>[19]</sup>。

使用 GraphPad Prism 7 软件绘制柱形图。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成

对9艘“21世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水进行调查,从采集的样品中共鉴定出浮游植物4门18属30种(含变种和未定种,表2)。所有浮游植物中硅藻门种类最多,共12属21种,占总数的70%,其中样品ME、TT2、YW中只发现硅藻类;甲藻门4属7种,占总数的23.3%;蓝藻门和绿藻门各1种,均仅在样品TT中出现。所有浮游植物中具尾翅甲藻(*Dinophysis caudata*)出现频率最高,在样品NYK、TT、YU、EL中均有检出。

所有采样船舶中硅藻门物种占绝对优势,甲藻门次之,蓝藻门和绿藻门均只出现一种。浮游植物优势度值( $Y$ )显示,所有调查船舶压载水中浮游植物优势种为星形明盘藻(*Hyalodiscus stelliger*),优势度为0.0328;具槽直链藻(*Melosira sulcata*),优势度为0.0813;中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*),优势度为0.0123;具尾翅甲藻(*Dinophysis caudata*),优势度为0.0326,其余物种优势度均小于0.01。浮游植物物种出现率显示,常见种为具尾翅甲藻,出现率为44.4%;菱形海线藻小形变种(*Thalassionema nitzschioides var. parva*),出现率为33.3%。另外,

海洋角毛藻(*Chaetoceros pelagicus*),劳氏角毛藻(*C. lorenzianus*),念珠直链藻(*M. moniliformis*),具槽直链藻(*M. sulcata*),中肋骨条藻(*S. costatum*)出现率均为22.2%,其余浮游植物仅在单艘船舶中出现。

### 2.2 浮游植物种类数量分布及丰度比较

不同船舶压载水中浮游植物种类组成具有一定差异,同一船舶压载水中浮游植物各类群的种类数也有差异,各船舶压载水中浮游植物种类数变化范围为2~7种(图2)。压载于马来西亚巴生港的样品TT中浮游植物种类最多,共7种,其中硅藻门4种,甲藻门、蓝藻门和绿藻门各1种;样品CS次之,共出现浮游植物6种,硅藻门和甲藻门各3种;样品ME种类数最少,仅出现2种浮游植物。所有浮游植物中角毛藻属、圆筛藻属和原甲藻属的种类数较多,其中角毛藻属最多,为4种。

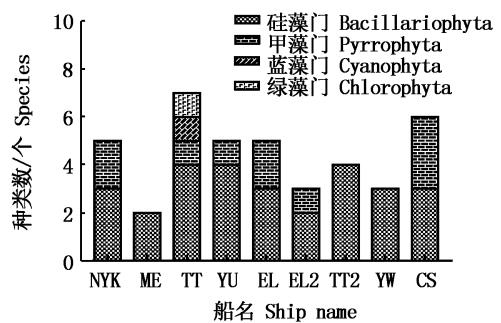


图2 不同船舶压载水中各类浮游植物种类数分布  
Fig. 2 Distribution of species of phytoplankton in ballast water of different ships

不同船舶压载水样品中浮游植物丰度差异较大(图3),样品NYK中浮游植物丰度最高,为 $(3.983 \pm 1.695) \times 10^3$  cells/L,其中具槽直链藻丰度就高达 $(3.816 \pm 1.708) \times 10^3$  cells/L,该样品为春季压载于香港港,水龄5天;样品TT2次之,浮游植物丰度为 $(3.45 \pm 2.689) \times 10^3$  cells/L,其中星形明盘藻丰度高达 $(3.283 \pm 2.558) \times 10^3$  cells/L。样品EL浮游植物丰度最小,为 $(0.317 \pm 0.347) \times 10^3$  cells/L,该样品为夏季压载于新加坡港,水龄8天。

表 2 各船舶压载水中浮游植物种类组成

Tab.2 The species composition of phytoplankton in ballast water of different ships

门 Phylum	种类 Species	NYK	ME	TT	YU	EL	EL2	TT2	YW	CS	优势度 Dominance
硅藻门 Bacillariophyta	海洋角毛藻 <i>Chaetoceros pelagicus</i>			+	+						
	双脊角毛藻 <i>C. costatus</i>			+							
	亚盐角毛藻 <i>C. subsalsum</i>	+									
	劳氏角毛藻* <i>C. lorenzianus</i>	+					+				
	虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>									+	
	琼氏圆筛藻* <i>C. jonesiana</i>						+				
	苏氏圆筛藻 <i>C. thorii</i>								+		
	星形明盘藻 <i>Hyalodiscus stelliger</i>								+		0.0328
	一种直链藻 <i>Melosira sp.</i>				+						
	念珠直链藻* <i>M. moniliformis</i>				+					+	
	具槽直链藻* <i>M. sulcata</i>	+	+								0.0813
	膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>								+		
	双喙长筒藻 <i>Neidium amphirhynchus</i>			+							
	新月菱形藻* <i>Nitzschia closterium</i>									+	
	亚得里亚足囊藻 <i>Podocystis adriatica</i>								+		
	一种根管藻 <i>Rhizosolenia sp.</i>						+				
	宽型笔尖根管藻* <i>R. styliformis var. latissimi</i>							+			
一种骨条藻 <i>Skeletonema sp.</i>							+				
中肋骨条藻* <i>S. costatum</i>									+	+	0.0123
一种针杆藻 <i>Synedra sp.</i>									+		
菱形海线藻小形变种* <i>Thalassionema nitzschioides var. parva</i>			+	+	+						
甲藻门 Pyrrophyta	叉状角藻矮胖变种* <i>Ceratium furca var. eugrammum</i>	+									
	三角角藻* <i>C. tripos</i>									+	
	具尾翅甲藻* <i>Dinophysis caudata</i>	+		+	+	+					0.0326
	一种多甲藻 <i>Peridinium sp.</i>							+			
	一种原甲藻 <i>Prorocentrum sp.</i>									+	
	利马原甲藻* <i>P. lima</i>						+				
海洋原甲藻* <i>P. micans</i>									+		
蓝藻门 Cyanophyta	两栖颤藻 <i>Oscillatoria amphibia</i>			+							
绿藻门 Chlorophyta	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>			+							

注: + 表示该浮游植物出现在对应的船舶, \* 表示该种为赤潮藻, 优势度下空白处表示优势度值小于 0.01

Note: + indicates that the phytoplankton appears on this ship, \* indicates that the species is red-tide algae, The vacancy space indicates that the dominance value is less than 0.01

### 2.3 赤潮种

此次调查的“21 世纪海上丝绸之路”航线上 9 艘船舶压载水中共鉴定出 13 种赤潮藻, 隶属于 2 门 10 属(含变种、变型)。其中硅藻门 7 属 8 种, 分别为劳氏角毛藻、琼氏圆筛藻、念珠直链藻、具槽直链藻、新月菱形藻、宽型笔尖根管藻、中肋骨条藻和菱形海线藻小形变种。甲藻门 3 属 5 种, 分别为叉状角藻矮胖变种、三角角藻、具尾翅甲藻、利马原甲藻和海洋原甲藻。其中具尾翅甲藻在所有赤潮藻中出现频率最高, 菱形海线藻小形变种、劳氏角毛藻, 念珠直链、具槽直链

藻、中肋骨条藻次之。赤潮藻中优势种为具槽直链藻、中肋骨条藻和具尾翅甲藻。此外, 这些赤潮藻中出现了 3 种产毒藻类, 分别为具尾翅甲藻、利马原甲藻和海洋原甲藻, 全部隶属于甲藻门。

### 3 讨论

本次调查共检出浮游植物 30 种, 其中硅藻门在种类和丰度上占绝对优势。因为压载舱内黑暗无光、营养盐缺乏的特殊环境, 大多数浮游植物会沉入压载舱底部进而衰败, 但部分硅藻对

不良环境的适应能力较强,可以存活下来<sup>[20]</sup>。“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水中浮游植物主要由 26.67% 的广温广布种、40% 的近岸暖水种、13.33% 的近岸广温种以及 20% 的未定种组成,这可能是由于大部分船舶均在港口进行压载所导致的。调查结果显示本次采样船舶压载水中浮游植物与洋山港海域浮游植物的种类组成及优势种均存在一定差异<sup>[21]</sup>。

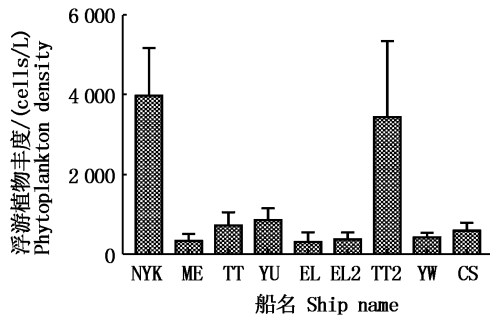


图 3 各船舶压载水中浮游植物丰度

Fig. 3 Density of phytoplankton in ballast water of all ships

不同船舶压载水中浮游植物的种类、丰度皆存在差异,压载地海域特点会对压载水中浮游植物组成和丰度产生一定影响,多数船舶压载水中浮游植物优势种与其压载海域相应季节的优势种存在相似性<sup>[22]</sup>。按照已确定的全球 64 个大海洋生态系对船舶压载地进行分区<sup>[23]</sup>。压载地距上海洋山港较近的香港港和深圳港属于中国南海区,两个港口地理位置相毗邻,且均是“21 世纪海上丝绸之路”中国沿海的枢纽港。香港港压载水中鉴定的 5 种浮游植物中有 4 种为赤潮藻,包括产毒种具尾翅甲藻,这与当季当地海域浮游植物群落组成具有相似性<sup>[24]</sup>。另外其浮游植物丰度最高,可能由于港口距离较近,部分藻类在短时间压载条件下仍有较高的存活率。深圳港压载水中浮游植物种类组成和丰度与香港港有较大差别,一方面可能与两者压载季节不同有关,另一方面具槽直链藻在香港港压载水中丰度占比很大,而未在深圳港压载水中出现。“21 世纪海上丝绸之路”东南亚三个港口也隶属于中国南海区,其压载水中浮游植物种类也相对丰富。压载于马来西亚巴生港、新加坡港的样品水龄都较短,浮游植物种类丰富但丰度较低,可能大部分藻类都不适应压载舱环境,即使在短时间短途运

输中也出现了大规模衰败。虽然压载于马来西亚丹戎帕拉帕斯港的样品水龄高达 55 天,只有 4 种硅藻类存活,但其浮游植物丰度相对较高,其中星形明盘藻所占比重较大,可能是因为星形明盘藻对压载舱特殊环境的适应能力更强。另外调查发现,鉴定的 13 种赤潮藻中有 11 种在压载自中国南海区的船舶中有分布,包括全部 3 种产毒藻类。洋山港作为离岸式狭岛型深水港,受到潮汐和海浪的影响较小,港区海域环境相对稳定<sup>[25]</sup>,如果这些物种随压载水排放到洋山港,特殊的地理位置优势可以为压载水中外来浮游植物提供良好的生存条件,一旦在当地栖息下来,将会对洋山港海域的浮游植物群落产生影响。如果赤潮藻大量爆发,可能会对当地海域生态环境和经济发展造成影响,甚至会危害到人类的健康与安全。由此可见,对于压载自“21 世纪海上丝绸之路”中与洋山港相近海区的船舶应严格筛查,限制排放。

压载地距洋山港较远的海区有阿拉伯海区、地中海区和红海区,压载水水龄较长,浮游植物种类和丰度也相对较低。其中压载于亚丁湾的样品水龄最长,仅发现两种浮游植物为具槽直链藻和菱形海线藻小形变种,均隶属于硅藻门且都是赤潮藻。压载于科伦坡港、吉达港和比雷埃夫斯港的样品中也均有赤潮藻分布。虽然在距离较远海区进行压载的船舶中浮游植物丰度不高,但部分赤潮藻,如具槽直链藻等适应压载舱特殊环境的能力较强,随压载水排放后,在适宜的条件下不排除有大量繁殖而引发赤潮的可能。随着“一带一路”的发展,中国与南亚、中东乃至欧洲港口间船舶的往来会更加频繁,虽然港口距离较远,海区生态环境差异较大,但压载水的入侵风险不容小觑。

#### 4 结论

此次对“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水的调查结果显示,共发现浮游植物 4 门 18 属 30 种(含变种和未定种),其中硅藻门种类最多,共 12 属 21 种;甲藻门 4 属 7 种;蓝藻门和绿藻门各 1 种。浮游植物优势度值显示,优势种为星形明盘藻、具槽直链藻、中肋骨条藻和具尾翅甲藻,其中具尾翅甲藻出现频率最高。浮游植物种类组成及丰度显示部分物种具有潜在生物入侵风

险。所有浮游植物中有赤潮藻 13 种,包括 3 种有毒藻类,调查发现的部分浮游植物变种和未定种也有可能对洋山港海域生态环境造成潜在威胁。船舶压载水航行记录显示,9 艘船舶中仅有 1 艘在亚丁湾公海进行换水,其余均在当地港口压载后直接前往目的港,未严格按照国际压载水公约进行换水且未安装压载水处理设备,未经处理的压载水排放后可能造成生物入侵。来自不同海区的船舶压载水中浮游植物的种类、丰度皆存在差异,压载地海域特点会对压载水中浮游植物组成和丰度产生一定影响。其中压载于中国南海区的船舶中浮游植物种类数和丰度较高,赤潮藻也相对较多,如果这些藻类随压载水排入洋山港海区,将增大当地海域赤潮发生的几率。因此,鉴于“一带一路”战略的蓬勃发展,应加强“21 世纪海上丝绸之路”航线船舶压载水的检测,并制定相关标准及应急处理措施。

#### 参考文献:

- [1] 陈煜,王兴琦. 浅析国际船舶压载水和沉积物控制与管理公约[J]. 世界海运, 2005, 28(2): 43-45.  
CHEN Y, WANG X Q. Analysis on the international convention for the control and management of Ships' ballast water and sediments [J]. World Shipping, 2005, 28(2): 43-45.
- [2] 刘艳,吴惠仙,薛俊增. 海洋外来物种入侵生态学研究[J]. 生物安全学报, 2013, 22(1): 8-16.  
LIU Y, WU H X, XUE J Z. The ecology of invasions by marine exotic species [J]. Journal of Biosafety, 2013, 22(1): 8-16.
- [3] 石红旗,姜伟,衣丹. 外来海洋物种入侵风险评价研究进展[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(s1): 127-131.  
SHI H Q, JIANG W, YI D. Advances in study on invasive risk assessment of alien marine species [J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(s1): 127-131.
- [4] HEWITT C L, CAMPBELL M. The relative contribution of vectors to the introduction and translocation of invasive marine species[R]. Canberra, Australia: Australian Department of Agriculture Fisheries and Forestry, 2010.
- [5] ENO N C, CLARK R A, SANDERSON W G. Non-native marine species in British waters: a review and directory[M]. Peterborough: Joint Nature Conservation Committee, 1997.
- [6] ROBERTS L. Zebra mussel invasion threatens U. S. waters [J]. Science, 1990, 249(4975): 1370-1372.
- [7] 何帆,朱鹤,张骞. 21 世纪海上丝绸之路建设: 现状,机遇,问题与应对[J]. 国际经济评论, 2017(5): 116-133, 7.  
HE F, ZHU H, ZHANG Q. The 21st-Century Maritime Silk Road: current situation, opportunities, challenges and solutions [J]. International Economic Review, 2017(5): 116-133, 7.
- [8] 扈琼琳. 21 世纪海上丝绸之路面临的非传统安全问题研究[J]. 江汉大学学报(社会科学版), 2017, 34(3): 76-80.  
HU Q L. Research on the non-traditional maritime security issues of the 21st-Century Maritime Silk Road [J]. Journal of Jiangnan University(Social Science Edition), 2017, 34(3): 76-80.
- [9] WU H, CHEN C, WANG Q, et al. The biological content of ballast water in China: A review [J]. Aquaculture & Fisheries, 2017, 2(6): 241-246.
- [10] 薛俊增,刘艳,王金辉,等. 洋山深水港入境船舶压载水浮游动物种类组成分析[J]. 海洋学报(中文版), 2011, 33(1): 138-145.  
XUE J Z, LIU Y, WANG J H, et al. A biological survey of zooplankton taken from ballast water of the international navigation ships entering the Shanghai Yangshan Deep-water Port in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(1): 138-145.
- [11] HALLEGRAEFF G M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase [J]. Phycologia, 1993, 32(2): 79-99.
- [12] KATZ M E, FINKEL Z V, GRZEBYK D, et al. Evolutionary trajectories and biogeochemical impacts of marine eukaryotic phytoplankton [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35: 523-556.
- [13] BUTRÓN A, ORIVE E, MADARIAGA I. Potential risk of harmful algae transport by ballast waters: the case of Bilbao Harbour [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(4): 747-757.
- [14] 刘志国,王金辉,蔡芃,等. 米氏凯伦藻分布及其引发赤潮的发生规律研究[J]. 国土与自然资源研究, 2014(1): 38-41.  
LIU Z G, WANG J H, CAI P, et al. Distribution of Kareniamikimotoi and rules of its causing red tide [J]. Territory & Natural Resources Study, 2014(1): 38-41.
- [15] 周淑辉,吴俊,孟庆松,等. 上海港外来船舶压舱水中赤潮种的调查及风险分析[J]. 植物检疫, 2012, 26(3): 40-43.  
ZHOU S H, WU J, MENG Q S, et al. The investigation and risk analysis of the red tide species in ballast waters of foreign ships harboring in Shanghai Port. [J]. Plant Quarantine, 2012, 26(3): 40-43.
- [16] 陈辰. 洋山港典型航线压载水浮游生物组成及群落规律研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.  
CHEN C. The research of phytoplankton composition and characteristic in ballast water of three typical routes at Yangshan Port [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [17] 宋杰. 全球最大单体全自动化码头上海洋山港四期开港

- [J]. 中国经济周刊, 2017(49): 58-60.
- SONG J. The world's largest single-unit fully-automated terminal opens the fourth phase of Ocean Hill Harbor [J]. China Economic Weekly, 2017(49): 58-60.
- [18] 李晓琳, 薛俊增, 吴惠仙. 洋山港海域浮游植物群落结构特征及演变趋势[J]. 生物学杂志, 2016, 33(6): 62-67.
- LI X L, XUE J Z, WU H X. The community succession and structure characteristics of phytoplankton in Yangshan port [J]. Journal of Biology, 2016, 33(6): 62-67.
- [19] 宫恩昊, 王钰婷, 刘艳, 等. 上海港船舶压载水浮游植物组成及生态因子的相关性[J]. 海洋湖沼通报, 2015 (4): 161-167.
- GONG E H, WANG Y T, LIU Y, et al. Species abundance of phytoplankton in ballast water of shanghai port and its correlation with ecological factors [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015 (4): 161-167.
- [20] RIGBY G, HALLEGRAEFF G M. Ballast water exchange trials and marine plankton distribution on the MV "Iron Whyalla" [R]. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1993, 2: 123.
- [21] 孙玲霜, 薛俊增, 庄骅, 等. 洋山港浮游植物群落特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2012 (3): 50-57.
- SUN L S, XUE J Z, ZHUANG H, et al. Ecological features of phytoplankton community of Yangshan port [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012 (3): 50-57.
- [22] BAX N, WILLIAMSON A, AGUERO M, et al. Marine invasive alien species: a threat to global biodiversity [J]. Marine Policy, 2003, 27(4): 313-323.
- [23] SHERMAN K, HEMPEL G. The UNEP large marine ecosystem report: a perspective on changing conditions in LMEs of the world's regional seas [R]. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2008.
- [24] 林旭吟. 香港海域浮游植物种类多样性与群落动态研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- LIN X Y. Species diversity and community dynamics of phytoplankton in coastal waters of Hong Kong [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [25] 张耀光, 崔玉阁, 殷艳, 等. 上海洋山深水港建设的地域空间作用分析[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(3): 85-87, 100.
- ZHANG Y G, CUI Y G, YIN Y, et al. Analysis on regional space affect of Shanghai Yangshan Deep-Water Port [J]. Geography and Geo-information Science, 2006, 22(3): 85-87, 100.

## Phytoplankton community characteristics of ship ballast water on the 21st-Century Maritime Silk Road

YANG Yifan<sup>1,2</sup>, XUE Junzeng<sup>1,2</sup>, LIU Liang<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyuan<sup>1,2</sup>, WU Huixian<sup>1,2</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Centre for Research on the Ecological Security of Ports and Shipping, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The samples of ballast water were taken at Shanghai Yangshan Port from April 2015 to July 2016 from nine vessels which had sailed along 21st-Century Maritime Silk Road. The seawater was ballasted in South China Sea area, Arabian Sea area, Red Sea area and Mediterranean area. The biodiversity and abundance of phytoplankton were analyzed. In this survey, 30 species of phytoplankton were detected in ballast water, belonging to 4 phyla and 18 genera. Among them, there are 21 species under 12 genera of Bacillariophyta, 7 species from 4 genera of Pyrrophyta, and 1 species of Cyanophyta and Chlorophyta, respectively. The number of species of phytoplankton in ballast water varies from 2 to 7. The dominant species were *Hyalodiscus stelliger*, *Melosira sulcata*, *Skeletonema costatum*, and *Dinophysis caudata*, among which *Dinophysis caudata* has the highest frequency. The highest abundance of phytoplankton was  $(3.983 \pm 1.695) \times 10^3$  cells/L, sampled from the seawater ballasted in Hongkong in spring. The lowest abundance of phytoplankton,  $(0.317 \pm 0.347) \times 10^3$  cells/L, was from the samples of Singapore water ballasted in summer. In addition, 13 species of red-tide algae were identified, including 3 species of toxic algae from 8 ballast water samples. The results showed that the biodiversity and abundance of phytoplankton in the ballast water samples from the South China Sea area were higher than those in other sea areas. Ballast water in all four sea areas has the potential for biological invasion. If some red-tide algae species are released into the Yangshan Port area upon discharging ballast water, the potential risk of red tides will increase, which will endanger the ecological environment of local sea areas.

**Key words:** 21st-Century Maritime Silk Road; Yangshan Deepwater Port; ballast water; phytoplankton